

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

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

PAR  
**Alain MAILHOT**  
**Samuel BOLDUC**  
**Guillaume TALBOT**

RAPPORT FINAL

SEPTEMBRE 2022



## REMERCIEMENTS

Un grand merci d'abord aux intervenants d'Ouranos impliqués dans ce projet, Mme Alexandrine Bisailon, M. Mohammad Bizhanimanzar et M. Gabriel Rondreau-Genesse, ainsi qu'aux intervenants de la Direction de l'expertise hydrique du MELCC, Mme Claudine Fortier, M. Thomas-Charles Fortier-Fillion 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. Thibault Mathevet (Électricité de France), Mme Stéphanie Moore (Relevés hydrologiques du Canada) et Mme Élane Robichaud (Hydro-Québec).

Nos remerciements vont aussi à Mme Audrey Lavoie du MELCC et à son collègue M. Vincent Tremblay pour nous avoir fourni les données des simulations hydrauliques de la rivière Aux Sables et de la rivière Etchemin. Notre reconnaissance également à Mme Mélanie Trudel, professeure à l'Université de Sherbrooke, pour nous avoir fait bénéficier des résultats des modélisations hydrauliques des rivières Saint-François et Au Saumon.

Les auteurs souhaitent remercier M. Jonathan Jalbert, Mme Rahma Jebali et Mme Claudie Ratté-Fortin de Polytechnique Montréal.

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 MATIERES

REMERCIEMENTS.....	III
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX .....	XIX
ABRÉVIATIONS.....	XXIII
CHAPITRE 1. INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2. COLLECTE, STRUCTURATION ET ANALYSE DES PROCÉDURES ACTUELLES ET DES DONNÉES DISPONIBLES.....	3
2.1 DOCUMENTATION DES PROCÉDURES ACTUELLES.....	3
2.2 DOCUMENTATION ET DESCRIPTION DES APPROCHES ACTUELLES DE JAUGEAGE .....	4
2.2.1 NIVEAU DE RÉFÉRENCE .....	5
2.2.2 MESURE DE LA VARIATION DU NIVEAU D’EAU DURANT LE JAUGEAGE .....	7
2.2.3 MESURE DES DÉBITS PAR EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES.....	9
2.2.4 ESTIMATION DES DÉBITS EN MOUVEMENT CONTINU .....	13
2.3 INFORMATIONS RELATIVES AUX DONNÉES DE JAUGEAGES ET AUX CT .....	16
2.4 DONNÉES DE DÉBITS ESTIMÉS AUX STATIONS HYDROMÉTRIQUES.....	19
2.5 STATIONS HYDROMÉTRIQUES ET JAUGEAGES RETENUS .....	19
2.6 ANALYSES PRÉLIMINAIRES DES DÉBITS ESTIMÉS ET DES JAUGEAGES.....	20
CHAPITRE 3. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES COURBES DE TARAGE	25
3.1 CONSIDÉRATIONS HYDRAULIQUES .....	25
3.2 REPRÉSENTATION MATHÉMATIQUE DE LA RELATION NIVEAU-DÉBIT.....	26
3.2.1 RÉGRESSION HYDRAULIQUE .....	27
3.2.2 APPROCHE DE TYPE INTERPOLATION.....	29
CHAPITRE 4. APPROCHE ACTUELLE DU MELCC POUR LA CONSTRUCTION DES COURBES DE TARAGE .....	31

<b>4.1 SPLINES CUBIQUES.....</b>	<b>31</b>
<b>4.2 POINTS PIVOTS .....</b>	<b>33</b>
<b>4.3 ESTIMATION DES PARAMÈTRES DES SPLINES CUBIQUES .....</b>	<b>35</b>
<b>4.4 CONSTRUCTION ET RÈGLES DE MISES À JOUR DES COURBES DE TARAGE .....</b>	<b>35</b>
<b>4.4.1 DOCUMENTATION RELATIVE AUX COURBES DE TARAGE .....</b>	<b>35</b>
<b>4.4.2 JAUGEAGES RETENUS .....</b>	<b>35</b>
<b>4.4.3 JAUGEAGES EN REFOULEMENT .....</b>	<b>36</b>
<b>4.4.4 MISE À JOUR DES COURBES DE TARAGE .....</b>	<b>36</b>
<b>4.5 ANALYSE CRITIQUE DE L'APPROCHE DE TYPE INTERPOLATION UTILISÉE PAR LA DEH .....</b>	<b>40</b>
<b>CHAPITRE 5. ANALYSE FRÉQUENTIELLE DES NIVEAUX MESURÉS .....</b>	<b>43</b>
<b>5.1 TEST DE TENDANCES ET DE RUPTURE .....</b>	<b>44</b>
<b>5.2 PROBABILITÉ MENSUELLE D'OCCURRENCE DES NMAXA ET DES NMINA.....</b>	<b>48</b>
<b>5.3 DISTRIBUTIONS DES SÉRIES DES NMAXA ET DES NMINA.....</b>	<b>48</b>
<b>5.4 ESTIMATION DES QUANTILES DES NMAXA .....</b>	<b>51</b>
<b>5.5 COMPARAISON DES NIVEAUX MESURÉS ET JAUGÉS.....</b>	<b>51</b>
<b>CHAPITRE 6. SOURCES D'ERREURS ET D'INCERTITUDES.....</b>	<b>55</b>
<b>6.1 INCERTITUDES SUR LES JAUGEAGES.....</b>	<b>55</b>
<b>6.2 INCERTITUDES SUR LES COURBES DE TARAGE .....</b>	<b>56</b>
<b>6.3 CHANGEMENT GÉOMORPHOLOGIQUE.....</b>	<b>57</b>
<b>6.4 CHANGEMENTS SAISONNIERS À LA SECTION DE CONTRÔLE .....</b>	<b>57</b>
<b>CHAPITRE 7. CONSTRUCTION DES COURBES DE TARAGE.....</b>	<b>59</b>
<b>7.1 RÉGRESSION HYDRAULIQUE ET AJUSTEMENTS DES COURBES DE TARAGE .....</b>	<b>59</b>
<b>7.2 APPROCHE RETENUE .....</b>	<b>61</b>
<b>7.2.1 PARTITION TEMPORELLE DES SÉRIES DE JAUGEAGES.....</b>	<b>61</b>

7.2.2 REPRÉSENTATION DE LA RELATION H-Q PAR PLUSIEURS RELATIONS HYDRAULIQUES.	72
7.3 EXPOSANTS DES RÉGRESSIONS HYDRAULIQUES .....	78
7.4 SYNTHÈSE ET LIVRABLES .....	83
<b>CHAPITRE 8. INCERTITUDES SUR LES COURBES DE TARAGE .....</b>	<b>85</b>
8.1 ESTIMATION DES RÉSIDUS RELATIFS AUX STATIONS.....	85
8.2 RÉSIDUS RELATIFS EN FONCTION DES DÉBITS NORMALISÉS .....	88
8.3 MODÈLES D'INCERTITUDES .....	90
8.3.1 BIAIS MOYENS DES RÉSIDUS RELATIFS DES SÉQUENCES.....	91
8.3.2 DISTRIBUTIONS RETENUES POUR REPRÉSENTER LES RÉSIDUS RELATIFS .....	94
8.3.3 MODÈLES DE DÉPENDANCE DES PARAMÈTRES D'ÉCHELLE EN FONCTION DU NIVEAU ..	94
8.3.4 MODÈLES D'INCERTITUDES CONSIDÉRÉS .....	95
8.4 MODÈLES D'INCERTITUDES SÉLECTIONNÉS .....	96
8.4.1 MODÈLE D'INCERTITUDES M1 .....	98
8.4.2 MODÈLES D'INCERTITUDES M2 .....	99
8.4.3 MODÈLES D'INCERTITUDES M3 .....	104
8.4.4 CAS SPÉCIAUX.....	105
8.5 INCERTITUDES SUR LES COURBES DE TARAGE EN INTERPOLATION ET EN EXTRAPOLATION .....	108
8.5.1 NIVEAUX CRITIQUES AUX SECTIONS DE CONTRÔLE .....	109
8.5.2 COMPARAISON PPNJ, PGNJ ET NC1 .....	110
8.5.3 TRAVAUX EXPLORATOIRES : ANALYSE DES INCERTITUDES DES PARTIES EXTRAPOLÉES DES COURBES DE TARAGE.....	118
8.6 SYNTHÈSE ET LIVRABLES .....	122
<b>CHAPITRE 9. CONSIDÉRATIONS HYDRAULIQUES SUR LES SECTIONS DE CONTRÔLE ET LES CT .....</b>	<b>125</b>
9.1 ESTIMATION DES NIVEAUX CRITIQUES .....	125

9.1.1	EXEMPLE DE LA STATION HYDROMÉTRIQUE GÉORÉFÉRENCÉE 011707 .....	129
9.1.2	IDENTIFICATION DES NIVEAUX CRITIQUES EN CONDITIONS DE FAIBLES DÉBITS .....	129
9.2	MODÉLISATION HYDRAULIQUE ET COMPARAISON AVEC LES COURBES DE TARAGE.....	132
9.2.1	RÉSULTATS .....	133
9.2.2	UTILISATION DE LA MODÉLISATION HYDRAULIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT DES COURBES DE TARAGE .....	136
	CHAPITRE 10. CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	139
	BIBLIOGRAPHIE.....	143
	ANNEXE A. CARACTÉRISTIQUES DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES RETENUES POUR LES ANALYSES .....	149
	ANNEXE B. PARAMÈTRES DE LA DISTRIBUTION GEV ET QUANTILES NMAXA AUX STATIONS .....	163
	ANNEXE C. NIVEAUX MINIMUMS ET MAXIMUMS JAUGÉS ET MESURÉS AUX STATIONS.....	169
	ANNEXE D. PARAMÈTRES DES COURBES DE TARAGE .....	173
	ANNEXE E. DISTRIBUTION LOGISTIQUE.....	187
	ANNEXE F. MODÈLES D'INCERTITUDES SÉLECTIONNÉS ET VALEURS DES PARAMÈTRES.....	189
	ANNEXE G. CAS SPÉCIAUX – COURBES DE TARAGE.....	203
	ANNEXE H. PROFIL DES SECTIONS DE CONTRÔLE ET INCERTITUDES .....	207
	ANNEXE I. MODÉLISATION HYDRAULIQUE ET COMPARAISON AVEC DES COURBES DE TARAGE (MÉTHODOLOGIE).....	213
I.1	ÉTAPES DE RÉALISATION : MODÉLISATION PROVENANT DE LA DEH.....	213
I.2	ÉTAPES DE RÉALISATION : MODÉLISATION PROVENANT DE L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE.....	223

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 – Schéma d’une section de contrôle d’une station de jaugeage. $N0$ : niveau de l’orifice du capteur/sonde et correspond au zéro effectif; $N1$ : niveau d’eau estimé par le capteur/sonde et transmis à l’enregistreur de données; $N2$ : niveau d’un repère de nivellement; $\Delta T$ : distance entre le zéro effectif et le repère de nivellement; $\Delta N1$ : distance entre le zéro effectif et le niveau d’eau; $\Delta N2$ : distance entre le niveau d’eau et le repère de nivellement. ....	7
Figure 2.2 – Lecture directe du niveau de l’eau à partir d’un repère temporaire en vue d’estimer la variation du niveau aux cours d’un jaugeage (Photo : Claudie Ratté-Fortin).....	8
Figure 2.3 – Illustration de l’application de la méthode des sections centrales (image adaptée de Turnipseed et Sauer, 2010). ....	11
Figure 2.4 – Distributions (box plots) des fractions mensuelles moyennes de débits estimés disponibles aux 175 SH retenues. ....	21
Figure 2.5 - Distribution mensuelle des dates de jaugeages aux 175 SH retenues. ....	22
Figure 2.6 – Comparaison entre le nombre de jaugeage en eau libre et A) le nombre de jaugeage total; B) le nombre d’années disponibles à chaque station. ....	22
Figure 2.7 - Nombre de jaugeages en eau libre disponibles aux 175 stations hydrométriques (SH) à l’étude .....	23
Figure 2.8 - Période couverte par les jaugeages en années pour les 175 stations hydrométriques (SH) à l’étude. ....	24
Figure 3.1 - Exemple de contrôles hydrauliques à une section critique selon différents niveaux. Le schéma de droite montre les profils en long du fond et des lignes d’eau pour différents niveaux et débits illustrés dans le schéma de gauche de la section critique (schéma tiré de Le Coz <i>et al.</i> 2014). ....	26
Figure 3.2 - Exemple de CT (courbe 022) à la station Sainte-Anne (050408) couvrant la période de 1965 à 2020. Les niveaux-débits jaugés sont indiqués par les points bleus et les points pivots par les points orange. La courbe orange est obtenue après interpolation des jaugeages par des splines cubiques (voir Chapitre 4) et la courbe bleue est obtenue après ajustement d’une RH (équation 3.1). Les valeurs des paramètres $a$ , $b$ et $c$ sont indiquées dans l’encadré. ....	28
Figure 4.1 - Représentation de la fonction passant par les points $(x_0, y_0)$ , $(x_1, y_1)$ , $(x_2, y_2)$ par les splines cubiques $s_1(x)$ et $s_2(x)$ . ....	32
Figure 4.2 – Contraintes imposées aux points de raccordements $(x_j, y_j)$ des splines cubiques $s_jx$ . ....	33
Figure 4.3 - Exemple de CT (courbe 022) à la station Sainte-Anne (050408) couvrant la période de 1965 à 2020. Les niveaux-débits jaugés sont indiqués par les points bleus et les points pivots par les points orange. La courbe orange est obtenue après	

interpolation des jaugeages par des splines cubiques et la courbe bleue après ajustement d'une RH (équation 3.1). Les valeurs des paramètres a, b et c sont indiquées dans l'encadré.....	34
Figure 4.4 – Niveaux et débits jaugés (en bleu), points pivots (points orange) et CT 024 à la station du Chêne (046709) couvrant la période de 2010 à 2020. La courbe orange est estimée à partir des splines cubiques et la courbe bleue après ajustement d'une RH. Les valeurs des paramètres a, b et c sont indiquées dans l'encadré. ....	34
Figure 4.5 – Schéma illustrant la procédure de mise à jour des CT utilisée par la DEH.	37
Figure 5.1 - Histogrammes du nombre de stations valides selon le nombre d'années de données valides disponibles pour les séries : a) NMaxA et b) NMinA. La partie en bleu correspond au nombre de stations stationnaires sans tendance ou rupture et la partie en rouge au nombre de stations avec des séries non stationnaires, c'est-à-dire avec une rupture ou une tendance significative. ....	46
Figure 5.2 - Distributions (box plots) des probabilités mensuelles d'occurrence aux stations des : a) NMaxA et des b) NMinA aux stations valides sans rupture ou tendance significative. ....	47
Figure 5.3 - Diagrammes des L-moment $\tau_4 - \tau_3$ pour : a) NMaxA et b) NMinA aux stations valides sans rupture ou tendance significative. Les points rouges correspondent aux valeurs des L-moments $\tau_4 - \tau_3$ pour les séries des NMaxA et NMinA normalisés regroupant toutes les stations. Seules les stations avec des séries stationnaires sont été considérées. Les courbes $\tau_4 - \tau_3$ des distributions suivantes à trois paramètres sont également présentées : logistique généralisée ( <i>Generalized Logistic – GLO</i> ), des valeurs extrêmes généralisée ( <i>Generalized Extreme Value – GEV</i> ), Pareto généralisée ( <i>Generalized Pareto – GPA</i> ), log normale (LN3), Pearson de type III (PE3). Les points correspondent aux distributions à deux paramètres suivantes : exponentielle (E), Gumbel (G), normale (N), logistique (L), uniforme (U).....	49
Figure 5.4 - Fonction de répartition : a) des NMaxA normalisés et b) des NMinA normalisés. Seules les stations avec des séries stationnaires sont été considérées. ....	50
Figure 5.5 - Histogramme du paramètre de forme des NMaxA normalisés aux différentes stations. Une valeur positive correspond à une distribution GEV à queue lourde ( <i>heavy-tailed</i> ). ....	52
Figure 5.6 - Box-plots des quantiles des NMaxA normalisés en fonction de la période retour.....	52
Figure 5.7 - Histogramme des périodes de retour associées aux PGNJ aux 110 stations hydrométriques avec des séries NMaxA stationnaires.....	54
Figure 7.1 - Exemple de la série des écarts relatifs entre débits jaugés et estimés à partir de la CTM à la station Du Loup (022513). La date de la rupture est identifiée par le trait vertical en tiret. La p-value du test de Pettitt est très inférieure à 0.001 dans ce cas. ....	63

- Figure 7.2 - Schéma décrivant la procédure utilisée pour la partition temporelle des séries des écarts relatifs à partir du test de Pettitt ( $n_{<}$  et  $n_{>}$  réfèrent respectivement aux nombres de jaugeages des séquences avant et après la date de rupture). ..... 64
- Figure 7.3 - Schéma montrant les étapes de la partition des jaugeages à la station St-Charles (050904) en appliquant la procédure présentée à la Figure 7.2. La séquence initiale des écarts relatifs est présentée sur le graphique du haut et les séquences successives après application du test de Pettitt sont présentées dans les graphiques des lignes suivantes, de haut en bas. Les triangles noirs correspondent aux points de rupture identifiés par le test. Les séquences en violet indiquent les séquences où une rupture est détectée, en vert les séquences sans rupture, et en rouge les séquences n'ayant pas assez de données pour appliquer le test de Pettitt. La partition finale en cinq séquences est présentée dans le graphique du bas. .... 68
- Figure 7.4 - Histogrammes du nombre de jaugeages par séquence pour les stations avec : a) 1 séquence (97 stations); b) 2 séquences (33 stations); c) 3 séquences (19 stations); d) 4 séquences ou plus (24 stations). Le nombre moyen de jaugeages par séquence est indiqué dans le coin supérieur droit de chacun des histogrammes. .. 70
- Figure 7.5 - Histogrammes des valeurs des MARE (en %) des séquences pour les stations avec : a) 1 séquence (97 stations); b) 2 séquences (33 stations); c) 3 séquences (19 stations); d) 4 séquences ou plus (24 stations). La valeur moyenne du MARE par séquence est indiquée dans le coin supérieur droit de chacun des histogrammes. 71
- Figure 7.6 - Histogrammes des rapports  $MARE_i/MARE_t$  où  $MARE_i$  est le MARE de la séquence  $i$  et  $MARE_t$  est le MARE de la séquence initiale avant partition pour les stations avec : a) 2 séquences (33 stations); b) 3 séquences (19 stations); c) 4 séquences ou plus (24 stations). La valeur moyenne des rapports  $MARE_i/MARE_t$  est indiquée dans le coin supérieur droit de chacun des histogrammes. .... 72
- Figure 7.7 - Exemple de séries des écarts relatifs en fonction du niveau jaugeé : a) aléatoire (station Petite rivière Cascapédia, 010902) ; b) non-aléatoire (station Des Trois-Pistoles, 022301). Les  $p$ -value du run test sont indiquées dans le coin supérieur droit de chacun des graphiques. .... 74
- Figure 7.8 - Schéma décrivant la procédure utilisée pour la segmentation des CT en plusieurs RH à l'aide du RT ( $n_{<h'}$  et  $n_{>h'}$  réfèrent respectivement aux nombres de jaugeages des séquences avant et après le niveau de transition estimé  $h'$ ). .... 75
- Figure 7.9 – Distributions des valeurs de l'exposant  $c$  des RH (équation 7.1) pour les 50 séquences (A1, B1) et les 254 séquences (A2, B2) représentées par une RH, et pour les 20 séquences (A2, B4) représentées par deux RH. Dans ce dernier cas,  $c_1$  réfère à l'exposant pour la RH associée aux petits niveaux et  $c_2$  aux exposants pour les 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 ( $c = 8/3$ ). .... 79

Figure 7.10 – CT à la station Rouge (040204) pour la période 1977-2020 représentée par une RH d'exposant $c = 5.49$ (voir Tableau 7.7).....	81
Figure 7.11 – Valeurs des exposants des 20 CT représentées par deux RH. $c_1$ (en abscisse) est l'exposant associé à la RH pour les plus petits niveaux et $c_2$ (en ordonnée) à l'exposant de la RH pour les plus grands niveaux. ....	82
Figure 8.1 - Histogramme du nombre de jaugeages par séquence pour les 325 séquences appartenant aux catégories (A1, B1), (A2, B2) et (A2, B4). ....	86
Figure 8.2 - Histogramme des valeurs du MARE aux : a) 325 séquences retenues ; b) 305 séquences représentées par 1 RH ; c) 20 séquences représentées par 2 RH. Les valeurs moyennes sont indiquées dans la partie supérieure droite de chaque histogramme. ....	87
Figure 8.3 – Résidus relatifs des jaugeages aux 325 séquences retenues en fonction du débit normalisé. A noter que les axes des x et des y ont été tronqués afin d'améliorer la visibilité de la figure. A noter également que l'axe des x est logarithmique. ....	89
Figure 8.4 - Moyennes et écart-types des résidus relatifs aux 325 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 correspond à l'équation de l'écart-type de la distribution logistique obtenue par Coxon <i>et al.</i> (2015) : $\pi 4.18 \exp - 3.051 Q + 3.5313$ où Q est le débit normalisé. La gamme de débit normalisé de cette courbe respecte les valeurs de débits normalisés considérées par Coxon <i>et al.</i> (2015).....	89
Figure 8.5 - Diagramme des L-moment $\tau_3 - \tau_4$ des distributions des RR des 325 séquences retenues regroupées en 48 intervalles de débit normalisé. Le diagramme présente également les courbes $\tau_3 - \tau_4$ pour les distributions suivantes à trois paramètres : logistique généralisée ( <i>Generalized Logistic – GLO</i> ), des valeurs extrêmes généralisées ( <i>Generalized Extreme Value – GEV</i> ), Pareto généralisée ( <i>Generalized Pareto – GPA</i> ), log normale (LN3), Pearson de type III (PE3). Les points correspondent aux distributions suivantes à deux paramètres : exponentielle (E), Gumbel (G), normale (N), logistique (L), uniforme (U). Le code de couleur à droite réfère à la valeur du débit normalisé de chacun des 48 intervalles du débit normalisé. ....	91
Figure 8.6 - Fonction cumulative des biais moyens des 298 séquences sous étude. Les lignes en tirets délimitent les 25 <sup>e</sup> et 75 <sup>e</sup> percentiles de même que la médiane de la distribution. La ligne pointillé rouge correspond à une moyenne des RR nulle. ....	92
Figure 8.7 - a) Kurtosis et <i>skewness</i> des séries des résidus relatifs des séquences retenues et b) zoom sur la partie centrale ( $-2 < skewness < 2$ ). Le point rouge correspond aux valeurs de la distribution normale ( <i>skewness</i> de zéro et kurtosis de 3) et le point orange aux valeurs de la distribution logistique ( <i>skewness</i> de zéro et kurtosis de 4.2). Les différents symboles et couleurs désignent les différents modèles d'incertitude et les résultats de l'application du test de K-S aux modèles N-M1 et L-N1 (p-value > 0.05 indique que le test rejette l'hypothèse que le modèle sélectionné	

représente adéquatement les distributions empiriques). La signification des différents symboles est la suivante : pleins : distribution N ; vides : distribution L; N-M1 (p-value < 0.05) : rond noir plein ; L-M1 (p-value < 0.05) : rond noir vide; L-M1 (p-value > 0.05) : rond rouge vide; N-M2 ( $\alpha_0 < 0$ ) : triangle noir plein pointant à gauche ; L-M2 ( $\alpha_0 < 0$ ) : triangle noir vide pointant à gauche ; N-M2 ( $\alpha_0 > 0$ ) : triangle noir plein pointant à droite ; L-M2 ( $\alpha_0 > 0$ ) : triangle noir vide pointant à droite ; N-M3 : carré noir plein ; L-M3 : carré noir vide.....93

Figure 8.8 - Modèles considérés pour représenter la dépendance des incertitudes relatives sur les débits estimés en fonction du niveau : M1 : incertitude relative constante (équation 8.3a); M2d : incertitude relative plus importante pour les petits niveaux ; M2a : incertitude relative plus importante pour les grands niveaux ; M3 : incertitude relative plus importante pour les petits et les grands niveaux. ....95

Figure 8.9 - Fonctions cumulatives du nombre de jaugeages des séquences associées aux modèles M1, M2d, M2a et M3.....97

Figure 8.10 - Fonctions cumulatives des ET des distributions des RR pour les 64 séquences où le modèle N-M1 a été retenu (en bleu) et les 127 séquences où le modèle L-M1 a été retenu (en rouge). ....99

Figure 8.11 - CT et intervalles 2.5-97.5% des stations : a) Du Lièvre (040624) couvrant la période du 9 mai 1979 au 10 juin 2020 (49 jaugeages) et représentée par une RH et le modèle d'incertitude N-M1 (écart-type de 3.1%) ; b) Mitchicamecus (040619) couvrant la période du 27 août 1977 au 19 septembre 2019 (45 jaugeages) et représentée par une RH et le modèle d'incertitude L-M1 (écart-type de 3.9%) ; c) Du Diable (040238) couvrant la période du 7 avril 2010 au 5 mai 2018 (24 jaugeages) et représentée par deux RH et le modèle d'incertitude N-M1 (écart-type de 4.4%). A noter les échelles logarithmiques en ordonnée et en abscisse. Le niveau est exprimé en fonction de la différence entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenue après ajustement de la CT..... 100

Figure 8.12 - Box plots des écarts-types des 43 séquences où le modèle N-M2d (en bleu) et des 48 séquences où le modèle L-M2d (en rose) ont été sélectionnés en fonction du niveau relatif normalisé  $h'$ . .... 101

Figure 8.13 - Box plots des écarts-types des 9 séquences où le modèle N-M2a a été retenu en fonction du niveau relatif normalisé  $h'$ . .... 101

Figure 8.14 - CT et intervalles 2.5-97.5% des stations : a) Noire (030920) couvrant la période du 27 septembre 2011 au 23 janvier 2020 (25 jaugeages) et représentée par une RH et le modèle d'incertitude N-M2d (écart-type de 22.5% pour le PPNJ et de 6.3% pour le PGNJ) ; b) Du Nord (040110) couvrant la période du 9 mai 1979 au 16 juin 2020 (44 jaugeages) et représentée par une RH et le modèle d'incertitude L-M2d (écart-type de 19.9% pour le PPNJ et de 3.1% pour le PGNJ) ; c) Des Anglais (030907) couvrant la période du 8 mars 1974 au 17 mai 1989 (36 jaugeages) et représentée par deux RH et le modèle d'incertitude N-M2d (écart-type de 28.5% pour le PPNJ et de 2.8% pour le PGNJ); d) Des Anglais (030907) couvrant la période du

26 mai 2009 au 1 juin 2020 (17 jaugeages) et représentée par une RH et le modèle d'incertitude N-M2a (écart-type de 4.7% pour le PPNJ et de 23.4% pour le PGNJ). A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l'écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.....	103
Figure 8.15 - Box plots des écarts-types des cinq séquences où le modèle N-M3 a été sélectionné (en bleu) et des deux séquences où le modèle L-M3 a été sélectionné (en rose) en fonction du niveau normalisé h'. .....	104
Figure 8.16 - CT et intervalles 5-95% pour les CT des stations : a) Belle Rivière (061307) couvrant la période du 19 septembre 2013 au 23 octobre 2019 (23 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d'incertitude N-M3 (écart-type de 33.4% pour le PPNJ et de 8.3% pour le PGNJ) ; b) Portneuf (050702) couvrant la période du 15 octobre 2008 au 20 juillet 2018 (19 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d'incertitude L-M3 (écart-type de 12.2% pour le PPNJ et de 20.3% pour le PGNJ). A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l'écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.....	106
Figure 8.17 - Série temporelle des RR de la station Yamaska (030351).....	107
Figure 8.18 - Parties en interpolation et en extrapolation de la CT. ....	108
Figure 8.19 - Inégalités possibles entre PPNJ, PGNJ et NC1 : 1) $NC1 < PPNJ$ ; 2) $PPNJ < NC1 < PGNJ$ ; 3) $PGNJ < NC1$ .....	111
Figure 8.20 – Profil de la station 060901 (du Moulin) où le premier niveau critique (NC1) est inférieur au plus petit niveau jaugé (PPNJ). ....	111
Figure 8.21 - Fonction cumulative des NCN1 pour les 189 séquences disponibles. La ligne en tiret rouge correspond à la médiane et la ligne en tiret noir à $NCN1 = 1$ . .....	112
Figure 8.22 - Nombre de jaugeages supérieurs au NC1 pour les 60 séquences avec $PPNJ < NC1 < PGNJ$ ( $0 < NCN1 < 1$ ). ....	113
Figure 8.23 - Six inégalités possibles lorsque le PGNJ, le NC1 et plus grand niveau mesuré (PGNM) sont comparés pour les séquences aux SH où l'on dispose du NC1. ....	114
Figure 8.24 - Fonction cumulative des PGNMR (équation 8.6) des 69 séquences où $PGNJ < PGNM < NC1$ (cas A).....	116
Figure 8.25 - CT de la station Petite Rivière Cascapédia (010902) couvrant la période 1981-2019 où $PGNJ < PGNM < NC1$ (cas A). Le modèle d'incertitude N-M2d a été retenu.....	116
Figure 8.26 - Fonction cumulative des PGNJR (équation 8.7) des 62 séquences où $NC1 < PGNJ < PGNM$ (cas E).....	117
Figure 8.27 - CT de la station Chaudière (023402) couvrant la période 1968-1983 où $NC1 < PGNJ < PGNM$ (cas E). Le modèle d'incertitude N-M1 a été retenu.....	117

Figure 8.28 - Fonction cumulative des NC1R (équation 8.8) des 55 séquences où PGNJ < NC1 < PGNM (cas B).....	119
Figure 8.29 - CT de la station Bonaventure (010802) couvrant la période 1981-1990 où PGNJ < NC1 < PGNM (cas B). Le modèle d'incertitude L-M1 a été retenu. ....	119
Figure 8.30 - Médianes et écarts interquartiles des distributions des écarts relatifs entre débits jaugés et débits estimés à partir de la RH (ER) en fonction du niveau relatif (h') pour le cas d'échantillon aléatoire de 20 jaugeages. Tous les jaugeages avec plus de 20 jaugeages et une RH, soit 166 séquences, ont été considérées.....	121
Figure 9.1 – Exemple de transects (lignes rouges) pour quatre stations hydrométriques géoréférencées (points bleus). ....	127
Figure 9.2 – Exemple d'identification des niveaux critiques (NC, lignes noires en tiret) à la section de contrôle pour les SHG : A) 030304 ; B) 011707. La ligne rouge indique le PGNM (postérieurs à 1997) et la ligne bleue en tiret indique le PGNJ. Les valeurs affichées correspondent aux périodes de retour estimées pour chacun de ces niveaux.....	128
Figure 9.3 – Profil de la section de contrôle de la SHG 011707 : A) principaux NC avec numérotation d'un à cinq (voir Figure 9.4) et périodes de retour associées; B) identification sur le profil PPNM, du PPNJ, du PGNJ et du PGNM et les périodes de retour associées. ....	130
Figure 9.4 – Localisation des NC pour la SHG 011707. La numérotation des changements de profils est la même que celle de la Figure 9.3 (A). ....	130
Figure 9.5 – Comparaison de l'étendu des bathymétries obtenues avec les LiDAR (lignes rouges) et les relevés bathymétriques de la DEH pour deux SHG.....	131
Figure 9.6 - Comparaison de la CT par relation hydraulique de l'INRS (CT INRS, ligne noire) et des débits simulés issus du MH (Débit MH, lignes mauve) pour A) la station Aux Sables (061029) et B) Etchemin (023303). Les cercles oranges indiquent les jaugeages à ces stations et les lignes rouges affichent les débits associés aux relevés hydrométriques utilisés pour la calibration du modèle hydraulique. ....	134
Figure 9.7 - Comparaison de la CT par relation hydraulique de l'INRS (CT INRS, ligne noire) et des points niveau/débit issus du MH (triangles rouges) pour A) la station Saint-François (030208), B) Saumon (030282) et C) Saint-François (030284). Les cercles oranges indiquent les jaugeages à ces stations et les lignes rouges affichent les débits associés aux relevés hydrométriques utilisés pour la calibration du modèle hydraulique.....	136
Figure G.1 – Courbes de tarage et intervalles 5-95% pour les CT de la station Bulstrode (030106) couvrant la période du 19/04/1982 au 05/03/2004 (38 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d'incertitude L-M3. A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l'écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.....	203

Figure G.2 – Courbes de tarage et intervalles 5-95% pour les CT de la station Yamaska Nord (030343) couvrant la période du 24/01/2006 au 24/10/2018 (49 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d’incertitude N-M3. A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l’écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.....	203
Figure G.3 – Courbes de tarage et intervalles 5-95% pour les CT de la station Yamaska (030351) couvrant la période du 14/10/2005 au 26/09/2013 (27 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d’incertitude L-M2d. A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l’écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.....	204
Figure G.4 – Courbes de tarage et intervalles 5-95% pour les CT de la station À l’Ours (030429) couvrant la période du 25/07/2006 au 25/06/2020 (34 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d’incertitude N-M3. A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l’écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.....	204
Figure G.5 – Courbes de tarage et intervalles 5-95% pour les CT de la station Magpie (073503) couvrant la période du 04/10/1978 au 13/08/2019 (34 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d’incertitude L-M2d. A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l’écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.....	205
Figure G.6 – Courbes de tarage et intervalles 5-95% pour les CT de la station Natashquan (074903) couvrant la période du 08/06/1980 au 18/08/2019 (27 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d’incertitude N-M2a. A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l’écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.....	205
Figure I.1 – A) Localisation de la station hydrométrique Aux Sables (061029) et du transect retenu pour le profil d’élévation et les profils de profondeur et B) profil des profondeurs associées à un débit de 650 m <sup>3</sup> /s. ....	216
Figure I.2 – A) Localisation de la station hydrométrique Etchemin (023303) et du transect retenu pour le profil d’élévation et les profils de profondeur et B) profil des profondeurs associées à un débit de 785 m <sup>3</sup> /s. ....	217
Figure I.3 - Association des données d’élévation et de profondeur aux points de contact des profils de référence avec les berges en rives droite et gauche le long du transect (A : Plan horizontal le long du transect considérant le profil de référence; B : Plan vertical considérant les points de contact avec les berges en rives droite et gauche des profils de référence le long du transect).....	219

Figure I.4 – Estimation de l'élévation corrigée aux points de contact des profils de référence avec les berges en rives droite et gauche le long du transect et association avec un jaugeage de débit similaire (A : Rivières Aux Sables – 061029; B : Rivière Etchemin – 23303). .....219

Figure I.5 – Transect à la station Aux Sables (061029), points de contact du profil de référence avec les berges en rives droite et gauche le long du transect et données retenues utilisées pour estimer les élévations corrigées associées à un débit donné. ....220

Figure I.6 – Transect à la station Etchemin (023303), points de contact du profil de référence avec les berges en rives droite et gauche le long du transect et données utilisées afin d'estimer les élévations corrigées associées à un débit donné. ....221

Figure I.7 – Courbes de tarage issues du modèle hydraulique pour les rives gauche et droite aux stations : A) Aux Sables-061029; B) Etchemin-023303. ....222



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Liste et description des documents reçus décrivant les différentes procédures actuellement utilisées par la DEH. ....	4
Tableau 5.1 - Nombre de stations avec tendance (test de Mann-Kendall) ou rupture (test de Pettitt) dans les séries des NMaxA et des NMinA (entre parenthèses). Le seuil de 5% est utilisé pour classer une tendance ou une rupture comme significative ou non. ....	44
Tableau 5.2 - Liste des stations avec tendance (test de Mann-Kendall) ou rupture (test de Pettitt) dans les séries des NMinA. Le seuil de 5% est utilisé pour classer une tendance ou une rupture comme significative ou non. Les valeurs des p-value des tests statistiques sont indiquées entre parenthèses et les valeurs inférieures à 0.05 sont indiquées en gras. ....	45
Tableau 5.3 - Liste des stations avec tendance (test de Mann-Kendall) et rupture (test de Pettitt) dans les séries des NMaxA. Le seuil de 5% est utilisé pour classer une tendance ou une rupture comme significative ou non. Les valeurs des p-value des tests statistiques sont indiquées entre parenthèses et les valeurs inférieures à 0.05 sont indiquées en gras. ....	45
Tableau 7.1 - Nombre de stations avec un nombre donné de séquences et répartition des séquences selon les catégories A1, A2 et A3 (nb A1 + nb A2 + nb A3 = nb station x nb séquences).....	65
Tableau 7.2 - Liste des 19 stations (en ordre croissant de numéro de station) avec trois séquences après application du test de Pettitt. Les séquences avec moins de 12 jaugeages sont indiquées en gras (colonne 'Nombre de jaugeages par séquence'). Les séquences avec un MARE plus grand que le MARE total sont indiquées en gras (colonne 'MARE (%) total et de chaque séquence').....	66
Tableau 7.3 - Liste des 24 stations (en ordre croissant de numéro de station) avec quatre séquences ou plus après application du test de Pettitt. Les séquences avec moins de 12 jaugeages sont indiquées en gras (colonne 'Nombre de jaugeages par séquence'). Les séquences avec un MARE plus grand que le MARE total sont indiquées en gras (colonne 'MARE (%) total et de chaque séquence').....	67
Tableau 7.4 - Nombre de séquences selon les diverses combinaisons des catégories (A1, A2, A3) et (B1, B2, B3, B4, B5). ....	77
Tableau 7.5 - Liste des 19 stations avec des séquences de 12 jaugeages ou plus, représentées par 2 RH – catégorie (A2, B4) (ces séquences apparaissent en gras dans la colonne 'Nombre de jaugeages par séquence'). A noter que la station Darmouth est la seule station qui compte deux séquences appartenant à la catégorie (A2, B4).....	77

Tableau 7.6 - Liste des stations avec des séquences appartenant aux combinaisons (A2, B3), (A2, B5) ou (A3, B2) (en gras dans la colonne 'Nombre de jaugeages par séquence').....	78
Tableau 7.7 - Liste des stations et des séquences dont les CT sont représentées par une RH avec $c > 3$ . Les niveaux sont exprimés en m et les débits en $m^3/sec$ .....	80
Tableau 7.8 - Liste des stations et des séquences dont les CT sont représentées par deux RH avec $c > 3$ pour l'une ou l'autre des RH. Les niveaux sont exprimés en m et les débits en $m^3/sec$ .....	81
Tableau 8.1 - Séquences et SH où l'hypothèse d'un biais nul des RR est rejetée au seuil de 5%.....	92
Tableau 8.2 - Nombre de séquences (pourcentages), nombres minimal, maximal et moyen de jaugeage par séquence selon le modèle d'incertitude sélectionné. ....	97
Tableau 8.3 - Séquences et SH où le test de K-S rejette l'hypothèse que la distribution empirique des RR correspond au modèle d'incertitude retenu au seuil de 5%. La distribution logistique a été retenue pour toutes ces séquences. ....	98
Tableau 8.4 - Stations et CT pour lesquelles le modèle d'incertitude est problématique. ....	105
Tableau 8.5 - Liste des SH et des séquences (en gras) qui ne sont pas considérées dans les analyses sur les niveaux critiques.....	109
Tableau 8.6 - Nombre de SH selon le nombre de NC et le nombre de séquences disponibles. ....	110
Tableau 8.7 - Liste et caractéristiques des SH et des séquences où $NC1 < PPNJ$ .....	112
Tableau 8.8 - Nombre de séquences selon les différentes inégalités entre le PGNJ, le PGNM et le NC1 (voir Figure 8.23).....	114
Tableau 8.9 - Nombre de séquences disponibles avec un nombre minimal de jaugeages et nombre moyen de jaugeages par séquence correspondant. Seules les 305 séquences représentées par 1 RH sont considérées.....	121
Tableau 9.1 - Information sur les SH ayant fait l'objet d'une modélisation hydraulique et retenues pour une comparative avec les CT. ....	132
Tableau A.1 – Caractéristiques géographiques des stations hydrométriques, types de données et de régime d'écoulement.....	149
Tableau A.2 - Caractéristiques sur les opérations des stations hydrométriques et les jaugeages disponibles.....	156
Tableau B.1 – Paramètres des distributions GEV et quantiles des niveaux maximums annuels (NMaxA) aux différentes stations avec des séries NMaxA stationnaires pour les périodes de retour 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans.....	163

Tableau C.1 – Plus petit niveau jaugé (PPNJ), plus grand niveau jaugé (PGNJ), plus petit niveau mesuré (PPNM) et plus grand niveaux mesurés (PGNM) aux stations. Pour PPNM et PGNM tout l'historique des niveaux enregistrés est considéré alors que tous les jaugeages ont été considérés pour PPNJ et PGNJ. Les divers niveaux sont exprimés sous forme d'écart normalisés par rapport au NMaxA moyen (équation 5.1).....	169
Tableau D.1 – Paramètres des CT aux stations hydrométriques où la CT est représentée par une RH. La catégorie définissant les inégalités entre le PGNJ, le PGNM et le NC1 auquel appartient chaque séquence est indiquée à la colonne 'Comparaison PGNJ, PGNM et NC1' (voir Figure 8.23). Ces catégories sont : A) A. $PGNJ < PGNM < NC1$ ; B) $PGNJ < NC1 < PGNM$ ; C) $PGNM < PGNJ < NC1$ ; D) $PGNM < NC1 < PGNJ$ ; E) $NC1 < PGNJ < PGNM$ ; F) $NC1 < PGNM < PGNJ$ . A noter qu'une cellule vide signifie que l'on ne disposait pas à ces stations du profil de la section de contrôle permettant d'estimer les NC. ....	173
Tableau D.2 – Paramètres des CT aux stations hydrométriques où la CT est représentée par deux RH. Le niveau de transition (NT) correspond au niveau de raccordement des deux RH. RH1 réfère à la RH s'appliquant aux niveaux inférieurs au NT alors que RH2 réfère à la RH valable pour les niveaux supérieurs au NT. La catégorie définissant les inégalités entre le PGNJ, le PGNM et le NC1 auquel appartient chaque séquence est indiquée à la colonne 'Comparaison PGNJ, PGNM et NC1' (voir Figure 8.23). Ces catégories sont : A) A. $PGNJ < PGNM < NC1$ ; B) $PGNJ < NC1 < PGNM$ ; C) $PGNM < PGNJ < NC1$ ; D) $PGNM < NC1 < PGNJ$ ; E) $NC1 < PGNJ < PGNM$ ; F) $NC1 < PGNM < PGNJ$ . A noter qu'une cellule vide signifie que l'on ne disposait pas à ces stations du profil de la section de contrôle permettant d'estimer les NC. ....	184
Tableau F.1 – Paramètres des modèles d'incertitudes des courbes de tarage (CT) où le modèle M1 a été sélectionné.....	189
Tableau F.2 – Paramètres des modèles d'incertitudes des courbes de tarage (CT) où le modèle M2 a été sélectionné.....	197
Tableau F.3 – Paramètres des modèles d'incertitudes des courbes de tarage (CT) où le modèle M3 a été sélectionné.....	201
Tableau H.1 – Facteur de correction des stations hydrométriques géoréférencées et niveaux après l'application du facteur du plus petit niveau jaugé (PPNJ), du plus grand niveau jaugé (PGNJ), du plus petit niveau mesuré (PPNM), du plus grand niveau mesuré (PGNM) ainsi que des niveaux critiques. ....	208
Tableau I.1 – Numéro des profils de profondeur avec les débits simulés correspondants pour la station Aux Sables (061029).....	214
Tableau I.2 – Numéro des profils de profondeur avec les débits simulés correspondants pour la station Etchemin (023303).....	214
Tableau I.3 - Niveaux et débits associés aux jaugeages de la station Aux Sables (061029) et dates des jaugeages. ....	214

Tableau I.4 - Niveaux et débits associés aux jaugeages de la station Etchemin (023303) et dates des jaugeages. ....	215
Tableau I. 5 – Débits pour différentes élévations provenant de l’application d’un MH par l’équipe de Mélanie Trudel de l’Université de Sherbrooke. Les cases en bleues indiquent les relevés hydrométriques utilisés pour la calibration du modèle. ....	223
Tableau I.6 – Estimation de l’écart entre l’élévation, par rapport au niveau de la mer, et le niveau arbitraire des stations hydrométriques pour des débits simulés et jaugés similaires. ....	223
Tableau I.7 - Niveaux et débits associés aux jaugeages de la station Saint-François (030208) et dates des jaugeages. ....	224
Tableau I.8 - Niveaux et débits associés aux jaugeages de la station Au Saumon (030282) et dates des jaugeages. ....	224
Tableau I.9 - Niveaux et débits associés aux jaugeages de la station Saint-François (030284) et dates des jaugeages. ....	225

## ABRÉVIATIONS

ADCP : <i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>	PGNJR : Plus grand niveau jaugé relatif
ADV : Vélocimètre acoustique ( <i>Acoustic Doppler velocimetry</i> )	PGNM : Plus grand niveau mesuré
AIC: <i>Akaike information criterion</i>	PGNMR : Plus grand niveau mesuré relatif
BDH : Banque de données hydriques	PPNJ : Plus petit niveau jaugé
BIC : <i>Bayesian information criterion</i>	PPNM : Plus petit niveau mesuré
CT : Courbe de tarage	RH : Régression hydraulique
CTM : Courbe de tarage moyenne	RR : Résidu relatif
DEH : Direction de l'expertise hydrique	RT : <i>Run test (Randomness test)</i>
GPS : <i>Global Positioning System</i>	SH : Station hydrométrique
h-Q : Relation niveau-débit	USGS : <i>United States Geological Survey</i>
K-S : Kolmogorov-Smirnov	
MARE: <i>Mean absolute relative error</i>	
MELCC : Ministère de l'environnement et de la lutte aux changements climatiques	
MRC : <i>Mean rating curve</i>	
MSRE: <i>Mean square relative error</i>	
NC : Niveau critique	
NC1R : Premier niveau critique relatif	
NMAxA : Niveaux maxima annuel	
NMinA : Niveaux minima annuel	
PDR : Période de retour	
PGNJ : Plus grand niveau jaugé	

## CHAPITRE 1. INTRODUCTION

Le présent rapport rend compte de l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre du projet *Évaluation des incertitudes sur les débits estimés aux stations hydrométriques du Québec méridional* financé par le gouvernement du Québec dans le cadre de l'initiative INFO-Crue.

Ce projet a pour principal objectif le développement d'une méthodologie permettant de quantifier les incertitudes sur les débits estimés à partir des courbes de tarage (CT) aux stations hydrométriques (SH) du Québec méridional opérées par la Direction de l'Expertise Hydrique (DEH). Ce travail a également permis de documenter les pratiques actuelles de la DEH et d'identifier de possibles pistes d'améliorations de ces pratiques.

Le rapport est structuré de la façon suivante. Le Chapitre 2 présente la liste des documents détaillant les procédures et pratiques actuelles de la DEH, la structure des données de jaugeages et des CT développées par celle-ci. Ce chapitre passe également en revue et complète la documentation des pratiques actuelles de la DEH pertinentes au présent projet (p. ex. mesures des débits, jaugeages et CT). Il s'appuie sur les documents transmis par la DEH, sur la littérature et les nombreuses rencontres avec les représentants de la DEH. Certaines analyses préliminaires des données de jaugeages sont également présentées. Plusieurs procédures de la DEH ont pu ainsi être mieux documentées (p. ex. au niveau de la mise à jour de ces CT).

Le Chapitre 3 présente dans un premier temps diverses considérations hydrauliques sur la relation niveau-débit ( $h$ - $Q$ ), les sections de contrôle et l'utilisation des CT pour l'estimation des débits. La question de la représentation mathématique de la relation  $h$ - $Q$  est ensuite abordée. Les deux principaux types de représentation mathématique rapportées dans la littérature sont décrits à savoir la loi de puissance, aussi appelée régression hydraulique (RH), qui s'inspire des équations souvent rencontrées en hydraulique et les approches basées sur l'interpolation.

Le Chapitre 4 s'attarde à décrire et documenter les pratiques actuelles de la DEH pour la construction de leurs CT. La représentation utilisée par la DEH (sous forme de splines cubiques) est d'abord abordée, documentée et commentée. Certains choix techniques très importants sont discutés notamment concernant les choix des points pivots utilisés pour l'ajustement des splines de même que sur la façon dont sont ajustés les paramètres des splines. Ce chapitre se termine par une discussion des avantages et inconvénients de l'une et l'autre des représentations et les implications du choix d'une représentation par interpolation. Les raisons du choix pour la suite des travaux d'une représentation des CT par des RH sont enfin détaillées.

L'analyse fréquentielle des niveaux mesurés est le sujet du Chapitre 5. Ces analyses ont été complétées afin de quantifier la gamme de niveaux jaugés aux diverses SH. Cette quantification est importante puisque les CT sont construites à partir de ces jaugeages et

qu'elles seront représentatives de la relation h-Q sur cette gamme de niveaux. Advenant par exemple que les niveaux jaugés ne couvrent pas des conditions de crue, l'utilisation de la CT en conditions de crue sera beaucoup plus incertaine. A terme, grâce à cette analyse, il a été possible de déterminer la période de retour des plus grands niveaux jaugés (PGNJ) utilisés pour la construction des différentes CT aux SH.

Le Chapitre 6 discute des sources d'incertitudes à considérer lors de l'élaboration et de l'utilisation des CT. Les concepts d'erreurs et d'incertitudes y sont d'abord définis et les différentes sources d'incertitudes et d'erreurs présentées et discutées (p. ex. incertitudes sur les mesures de niveaux et de débits). Des valeurs approximatives des incertitudes y sont également proposées sur la base de la littérature consultée.

Le Chapitre 7 décrit la procédure développée pour la construction des CT aux SH. La méthode utilisée pour l'ajustement des paramètres de la RH est d'abord présentée. Ensuite l'approche pour partitionner la période initiale où les jaugeages ont été réalisés en sous-périodes, chacune représentative de la relation h-Q prévalant durant ces périodes, est détaillée. Enfin les cas où deux RH sont nécessaires pour représenter la relation h-Q sur toute la gamme des niveaux jaugés sont discutés. Au terme de ces analyses, l'ensemble des CT et des paramètres des RH pour les SH en opération ont été calculés.

La question de l'estimation des incertitudes sur les différentes CT aux stations est abordée au Chapitre 8. L'évaluation des incertitudes est réalisée à travers l'analyse des écarts relatifs entre les débits estimés à partir des CT et les débits jaugés. Les distributions de ces écarts relatifs sont examinées et différents modèles d'incertitudes sont proposés. Un modèle d'incertitude est sélectionné pour chacune des CT. La question de l'estimation des incertitudes pour la partie extrapolée de la CT, c.-à-d. au-delà du PGNJ est finalement discutée.

Le Chapitre 9 aborde différentes considérations à caractère hydraulique pertinentes aux CT. La première partie du chapitre décrit la procédure visant à déterminer les niveaux critiques associés à certaines sections de contrôle où les profils sont disponibles. Ces niveaux critiques correspondent à des changements majeurs de ces profils susceptibles de modifier la relation h-Q et donc la CT. La position relative de ces niveaux critiques par rapport au PGNJ donne une information sur la fiabilité de la CT dans les parties extrapolées de la CT. La seconde partie du chapitre analyse les résultats de simulations hydrauliques et des relations h-Q simulées aux sections de certaines SH et les compare aux CT estimées à ces mêmes sections.

Enfin le Chapitre 10 présente un résumé des principaux résultats et conclusions de l'étude et propose certaines avenues de recherche pour des travaux ultérieurs.

## **CHAPITRE 2. COLLECTE, STRUCTURATION ET ANALYSE DES PROCÉDURES ACTUELLES ET DES DONNÉES DISPONIBLES**

Ce chapitre a pour objectif premier de faire un bilan des documents et données obtenus pour la réalisation de ce projet ainsi que des pratiques actuelles de la DEH. Les Sections 2.1 et 2.2 présentent les divers manuels et procédures de la DEH alors que les Sections 2.4 et 2.5 décrivent respectivement les données relatives aux jaugeages et aux courbes de tarage (CT) et les données de débits. Finalement, la Section 2.6 présente les stations hydrométriques (SH) retenues pour la réalisation des analyses de ce projet ainsi que certains résultats préliminaires sur les jaugeages et les débits aux stations.

### **2.1 Documentation des procédures actuelles**

Afin de documenter les approches actuelles d'estimation de débits de la DEH, plusieurs documents décrivant diverses procédures nous ont été transmis. Ces procédures ont permis de documenter les approches actuelles et seront comparées à d'autres documents et ouvrages de référence afin de voir si elles sont conformes aux pratiques recommandées dans la littérature et si certaines mises à jour, améliorations ou ajouts pourraient être envisagés.

Les procédures reçues font théoriquement parties du *Manuel des procédures : Processus de production de données hydrométriques* ou du *Manuel qualité de la division de l'hydrométrie*. Il est important de mentionner toutefois que les documents reçus se présentent sous la forme d'une série de fichiers distincts chacun décrivant l'une ou l'autre des procédures en question. Le Tableau 2.1 dresse la liste de ces fichiers et des procédures correspondantes.

L'un des principaux constats au sujet des manuels et des procédures de la DEH est que des efforts majeurs sont nécessaires afin d'en arriver à des versions finales et officielles, à une uniformisation des différents documents et à la production d'un seul document regroupant l'ensemble des procédures. Il n'est pas clair, par exemple, si les procédures se trouvent dans deux manuels distincts (*Manuel des procédures : Processus de production de données hydrométriques* ou *Manuel qualité de la division de l'hydrométrie*) ou si ces manuels sont les mêmes avec des titres différents. D'autres éléments sont également imprécis. Ainsi la procédure *Correction de l'effet d'un fond mobile* est associée à deux sections provenant, selon toute vraisemblance, de deux documents différents.

Tableau 2.1 - Liste et description des documents reçus décrivant les différentes procédures actuellement utilisées par la DEH.

Description de la procédure	Numéro
Prospection d'un site pour l'implantation d'une station hydrométrique	SGQ 7.2.1
Jaugeage avec un moulinet à godet	SGQ11.7.1
Jaugeage avec un vélocimètre acoustique (ADV) FlowTracker©	SGQ11.7.2
Jaugeage en mouvement continu à l'aide d'un ADCP de type StreamPro© ou RioGrande© ou RiverPro©	SGQ11.7.3
Jaugeage en mouvement continu à l'aide d'un ADCP de type M9©	SGQ11.7.4
Jaugeage en mode stationnaire à l'aide d'un ADCP de type RioGrande© ou StreamPro© ou RiverPro©	SGQ11.7.5
Jaugeage en mode stationnaire à l'aide d'un ADCP de type M9©	SGQ11.7.6
Jaugeage avec un vélocimètre acoustique (ADV) FlowTracker2©	SGQ 11.7.9
Identification de la cause d'une variation de zéro	SGQ12.4.1
Saisie et vérification des zéros	12.4.2
Vérification des jaugeages réalisés à l'aide d'un profileur de courant	12.5.2
Correction de l'effet d'un fond mobile	3.4 p. 18 ou 12.5.3
Sauvegarde des données brutes	12.6.1
Transfert des jaugeages dans BDH (remplacement d'un jaugeage)	12.6.3
Transfert et calcul des données dans BDH	SGQ12.8.1
Analyse, contrôle et validation d'une courbe de tarage	SGQ13.1.1
Manuel de gestion de la qualité du réseau hydrométrique	Version 6.0

Les titres des sections et sous-sections sont parfois spécifiés sur la page titre des procédures alors que pour d'autres, cette information n'est pas indiquée bien qu'on la devine sur la base du numéro de la section et de la sous-section. Certaines procédures ont un numéro précédé des lettres SGQ alors que d'autres procédures n'ont pas ces lettres bien qu'elles semblent liées, comme dans le cas des SGQ12.4.1 et 12.4.2 (Tableau 2.1). Finalement, il convient de noter que toutes les procédures sont en mode corrections et commentaires ce qui en rend la lecture plus difficile et peut être parfois source de confusion.

## 2.2 Documentation et description des approches actuelles de jaugeage

Cette section a comme objectif de décrire les procédures générales de la DEH. Les documents suivants ont été consultés à cet effet (voir Tableau 2.1) :

- SGQ11.7.1 SGQ11.7.2 et SGQ 11.7.9 qui concernent les estimations de débits à partir de courantomètres (moulinet à godet et vélocimètre acoustique, Section 2.2.3);
- SGQ11.7.3, SGQ11.7.4 qui portent sur l'estimation des débits avec des appareils de type « Acoustic doppler current profiler » (ADCP, Section 2.2.4),

Ces procédures sont décrites et comparées aux pratiques recommandées dans les ouvrages suivants : Kenney (2010), Sauer et Turnipseed (2010), Turnipseed et Saur (2010), WMO (2010a), WMO (2010b), Le Coz *et al.* (2011), Puechberty *et al.* (2017) et Horner *et al.* (2018).

Il est important d'ajouter qu'une visite de terrain a été réalisée le 2 octobre 2020 à Québec et avait comme objectif d'assister aux jaugeages sur la rivière Beauport (054001) et sur la rivière Montmorency (051001). Cette visite a été planifiée par Claudine Fortier de la DEH. A. Mailhot, S. Bolduc et C. Ratté-Fortin accompagnaient pour l'occasion une équipe de technicien de la DEH. Les prochaines sections décrivent les principales étapes du processus de jaugeage.

Le jaugeage d'un cours d'eau procède généralement selon les étapes suivantes (Saur et Turnipseed, 2010) :

1. Vérification de l'heure et de la batterie de l'enregistreur de données;
2. Lecture du niveau d'eau affiché sur l'enregistreur de données et du niveau d'eau à partir des repères de nivellement;
3. Téléchargement et enregistrements des données mesurées;
4. Inspection de la station de jaugeage;
5. Vérification des niveaux minimal et maximal enregistrés et validation de ces niveaux par une recherche d'indices;
6. Réalisation du jaugeage;
7. Vérification finale des instruments.

Il convient de spécifier que cette section n'entend pas décrire chacune de ces étapes mais seulement les étapes 2 et 6 pour lesquelles les incertitudes associées seront discutées au Chapitre 6.

### **2.2.1 Niveau de référence**

Préalablement à la mesure du niveau de référence, il est important de mentionner que lors de l'installation d'une SH, les niveaux  $N_0$  (zéro effectif),  $N_1$  (niveau de l'eau), et  $N_2$  (niveau associé à un repère de référence appelé niveau de nivellement) sont estimés de façon précise de telle sorte que la distance entre  $N_0$  et  $N_2$  ( $\Delta_T = \Delta_N^1 + \Delta_N^2$ ) soit connue (Figure 2.1). Cette distance devrait rester la même dans le temps sauf si le capteur ou la sonde s'est déplacé verticalement ou si un repère de nivellement a bougé.

À noter qu'un seul repère de nivellement est présent sur la Figure 2.1 mais que trois repères de nivellement permanents sont minimalement nécessaires lors de l'implantation d'une SH et qu'une validation des niveaux des repères doit être réalisée chaque année (Sauer et Turnipseed 2010). De plus, ces repères ne doivent pas se trouver sur la structure de la SH. Kenney (2010) mentionne que l'utilisation de plus de trois repères est préférable, si les conditions le permettent, afin d'en conserver un minimum de trois si l'un

d'eux est détruit. Ce même auteur ajoute que pour des repères affectés par des gels au sol, une validation annuelle est nécessaire. Pour des repères fixés à même le substrat rocheux et ayant démontrés une certaine stabilité, une validation à tous les 5 ans est suffisante. Kenney (2010) propose d'ailleurs un arbre de décision concernant la fréquence de validation des repères de nivellement. À noter que cet arbre de décision inclus également la nécessité ou non de procéder à un jaugeage.

Kenney (2010) peut être consulté pour toutes informations concernant l'estimation du zéro effectif (*gage datum*) lors de la mise en place d'une SH. Le lecteur peut consulter Kennedy (1990) et Kenney (2010) pour toutes autres informations concernant la mise en place, l'entretien des repères de nivellement, la lecture des différents niveaux et les calibrations ponctuelles. Les incertitudes associées à la mesure du niveau d'eau sont discutées à la Section 6.1.

Au début du processus de jaugeage, le niveau d'eau de référence est déterminé en mesurant la distance verticale séparant l'un des repères de nivellement de la surface de l'eau ( $\Delta_N^2$  sur la Figure 2.1). Généralement, cette distance est estimée à partir d'un repère non submergé et d'un niveau d'arpentage. Cette distance additionnée à celle affichée sur l'enregistreur de données ( $\Delta_N^1$ ) devrait être égale à  $\Delta_T$  (Figure 2.1) estimé lors de la mise à place de la station. Cette étape permet : 1) de valider le niveau affiché sur l'enregistreur de données; 2) d'identifier un possible déplacement vertical du capteur/sonde; 3) d'identifier un déplacement d'un repère de nivellement en comparant aux valeurs obtenues aux autres repères de nivellement.

Les déplacements des repères de nivellement sont peu fréquents. Toutefois, si le technicien en charge de la station en vient à la conclusion que le capteur/sonde a subi un déplacement vertical, une calibration ponctuelle pourra être réalisée afin de revoir le zéro effectif ( $N_0$ ) et de corriger la valeur affichée sur l'enregistreur de données. Les niveaux enregistrés depuis le dernier jaugeage devront également être corrigés.

Il convient de dire que la méthode utilisée par la DEH pour obtenir le niveau de référence ne correspond pas à celle généralement détaillée dans les ouvrages de référence. En effet, dans ces ouvrages, le niveau de référence provient souvent d'une jauge de référence. Cette jauge peut être, par exemple, une règle limnométrique fixe mise en place lors de l'installation de la station hydrométrique et liée au zéro effectif de la station hydrométrique. Cette jauge de référence permet donc de valider la mesure de niveau d'eau sur l'enregistreur de données. La principale raison justifiant la méthode retenue par la DEH est que pour la majorité des SH, aucune n'est disponible pour l'installation d'une règle limnométrique. De plus, on peut supposer que l'incertitude associée à la lecture du niveau de référence est similaire pour les deux méthodes.

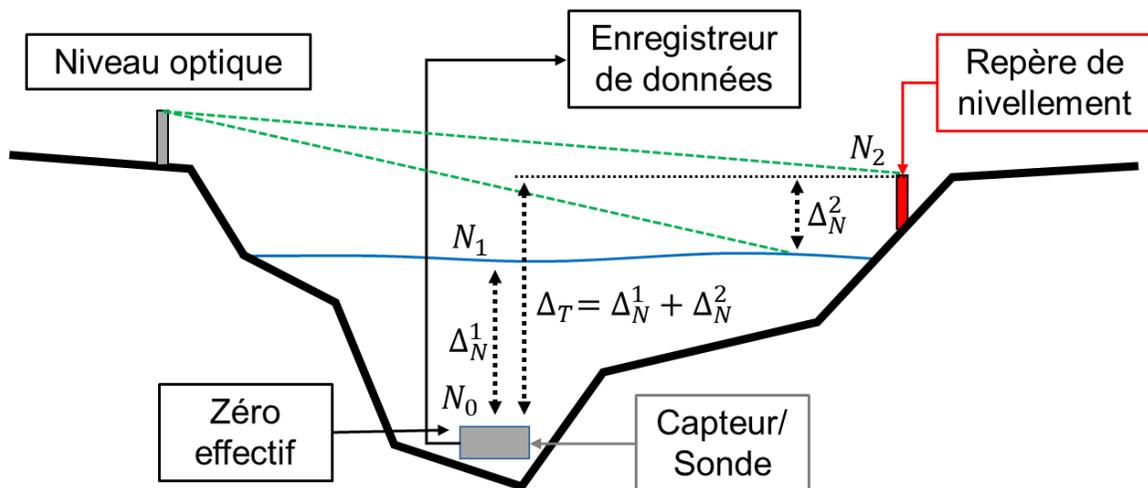


Figure 2.1 – Schéma d'une section de contrôle d'une station de jaugeage.  $N_0$  : niveau de l'orifice du capteur/sonde et correspond au zéro effectif;  $N_1$  : niveau d'eau estimé par le capteur/sonde et transmis à l'enregistreur de données;  $N_2$  : niveau d'un repère de nivellement;  $\Delta_T$  : distance entre le zéro effectif et le repère de nivellement;  $\Delta_N^1$  : distance entre le zéro effectif et le niveau d'eau;  $\Delta_N^2$  : distance entre le niveau d'eau et le repère de nivellement.

## 2.2.2 Mesure de la variation du niveau d'eau durant le jaugeage

Lors d'un jaugeage, il est possible que le niveau d'eau change et il est dès lors important de mesurer le niveau au début et à la fin du jaugeage. Les pratiques actuelles de la DEH consistent à mettre en place un repère temporaire, par exemple une plaque de métal placée en eau peu profonde, et de mesurer la hauteur d'eau au début et à la fin de la mesure de débit. La mesure du niveau se fait par une lecture directe en utilisant une règle limnimétrique (Figure 2.2). Ainsi, lorsqu'une variation du niveau d'eau est observée entre le début et la fin du jaugeage, la valeur moyenne entre les niveaux au début et à la fin du jaugeage est utilisée pour corriger le niveau d'eau de référence mesuré à l'étape 1. De plus, selon l'ampleur de la variation, une incertitude est associée au jaugeage. Ces informations ont été obtenues lors de la visite de terrain. Aucune information à ce sujet n'a toutefois été trouvée dans les documents décrivant les procédures actuelles de la DEH.

Il convient de préciser que cette procédure est conforme à celle de Turnipseed et Sauer (2010) qui mentionnent que lorsque la variation du niveau est inférieure à 3 cm, un niveau moyen peut être estimé à partir du niveau mesuré à la fin et au début du tarage. Toutefois, ceux-ci indiquent que le niveau devrait être mesuré régulièrement pendant le jaugeage lorsque les variations du niveau d'eau sont plus importantes. Il est question ici d'une mesure de niveau selon les trois verticales lors des mesures de vitesses pendant le processus de jaugeage (voir Section 2.2.3.2).



Figure 2.2 – Lecture directe du niveau de l'eau à partir d'un repère temporaire en vue d'estimer la variation du niveau aux cours d'un jaugeage (Photo : Claudie Ratté-Fortin).

Selon Puechberty *et al.* (2017), il est préférable que le niveau ne varie pas de manière importante pendant la mesure du débit. Ainsi ils mentionnent que le jaugeage devrait être suffisamment rapide de sorte que la variation de débit entre le début et la fin du jaugeage soit de moins de 10%. De plus, ces auteurs spécifient que dans une situation où les niveaux changent rapidement des mesures intermédiaires devraient être prises et l'équation suivante doit être utilisée pour corriger le niveau de référence :

$$N_R = \sum_i \frac{n_i q_i}{Q} \quad (2.1)$$

où  $N_R$  est le niveau de référence,  $n_i$  est le niveau partiel associé à un débit partiel pour une sous-section ( $q_i$ ) calculé selon une section verticale du transect de largeur donnée et  $Q$  est le débit total estimé. Cette équation réfère à la procédure dite de *discharge-weighting* qui, selon Turnipseed et Sauer (2010), favoriserait une surestimation du niveau moyen. Ces derniers suggèrent donc d'utiliser en parallèle la procédure dite de *time weighting* qui aurait tendance à sous-estimer le niveau moyen et de faire une moyenne des résultats obtenus. La procédure *time weighting* est définie par l'équation :

$$N_R = \sum_i \frac{n_i t_i}{Q} \quad (2.2)$$

où  $N_R$  est le niveau de référence,  $n_i$  est le niveau partiel associé à une durée ( $t_i$ ) et  $Q$  est le débit total estimé.

### 2.2.3 Mesure des débits par exploration du champ des vitesses

La mesure des débits par extrapolation du champ de vitesses (*velocity-area method*)<sup>1</sup> utilisée par la DEH (voir les procédures SGQ-11.7.1, SGQ-11.7.2 et SGQ-11.7.9) est décrite par Turnipseed et Sauer (2010) et utilisée notamment par le USGS (*United States Geological Survey*). Cette approche est basée sur l'estimation des vitesses d'écoulement et fait intervenir la méthode des sections centrales (*midsection method*)<sup>2</sup>.

Les jaugeages par exploration du champ de vitesses sont généralement réalisés à gué à l'aide d'un moulinet à godet ou d'un vélocimètre acoustique (ADV). Le terme courantomètre sera utilisé de manière plus générale dans ce qui suit pour désigner à la fois les moulinets à godet et les ADV. Cette technique consiste à diviser une section d'un cours d'eau (section de jaugeage) en un nombre de sous-sections perpendiculaires à l'écoulement. Les profondeurs des colonnes d'eau et les surfaces de chacune de ces sous-sections sont ensuite mesurées. La vitesse moyenne d'écoulement à travers chacune des sous-sections est estimée en effectuant une ou plusieurs mesures de vitesse à différentes profondeurs le long de la verticale de chaque sous-section. La largeur et l'aire des sous-sections sont fonction du nombre de sous-sections et de la largeur de la section de jaugeage (Figure 2.3).

Le débit total est estimé à partir de l'équation suivante :

$$N_R = \sum_{i=1}^n a_i v_i \quad (2.3)$$

où  $Q$  est le débit total estimé ( $m^3/s$ ),  $a_i$  est l'aire d'une des sous-sections ( $m^2$ ) et  $v_i$  la vitesse moyenne ( $m/s$ ) sur cette sous-section.

Considérant la méthode des sections centrales, le débit associé à une sous-section est estimé de la manière suivante :

---

<sup>1</sup> Grand dictionnaire terminologique : Organisation météorologique mondiale, 2012

<sup>2</sup> Grand dictionnaire terminologique : Organisation météorologique mondiale, 2012

$$q_i = v_i \left( \frac{b_i}{2} \right) d_i \quad (2.4)$$

où, pour une sous-section donnée,  $q_i$  est le débit partiel,  $v_i$  est la vitesse d'écoulement mesurée,  $b_i$  est la distance séparant la verticale qui précède et suit la verticale associée aux sous-sections et  $d_i$  est la profondeur à la sous-section (Figure 2.3). Pour plus de détails sur l'application de la méthode des sections centrales, le lecteur est prié de se référer à Turnipseed et Sauer (2010).

La méthode des sections centrales est utilisée par le USGS depuis 1950 suite aux travaux de Young (1950) qui concluent qu'elle est plus précise que la méthode des sections moyennes (*mean-section method*)<sup>3</sup> qui consiste à estimer le débit de chacune des sous-sections délimitées par deux verticales à partir de la vitesse d'écoulement et la profondeur moyenne des deux verticales.

### **2.2.3.1 Sélection de la section de jaugeage**

La section de cours d'eau où sera réalisée la mesure de débit par exploration des champs de vitesse doit satisfaire aux critères suivants (Rantz et al. (1982) :

1. La section est rectiligne et perpendiculaire au sens d'écoulement;
2. Les vitesses d'écoulement doivent être supérieures à 0.15 m/s et les profondeurs plus grandes que 0.15 m;
3. Le lit au niveau de la section doit être relativement régulier et uniforme et ne pas comporter de roche ou de plantes aquatiques denses;
4. L'écoulement doit être relativement uniforme et ne pas présenter de tourbillons ou de turbulences importantes;
5. La mesure de niveau et la station hydrométrique doivent être relativement près de la section de contrôle afin d'éviter les apports de tributaires entre les deux.

---

<sup>3</sup> Grand dictionnaire terminologique : Organisation météorologique mondiale, 2012

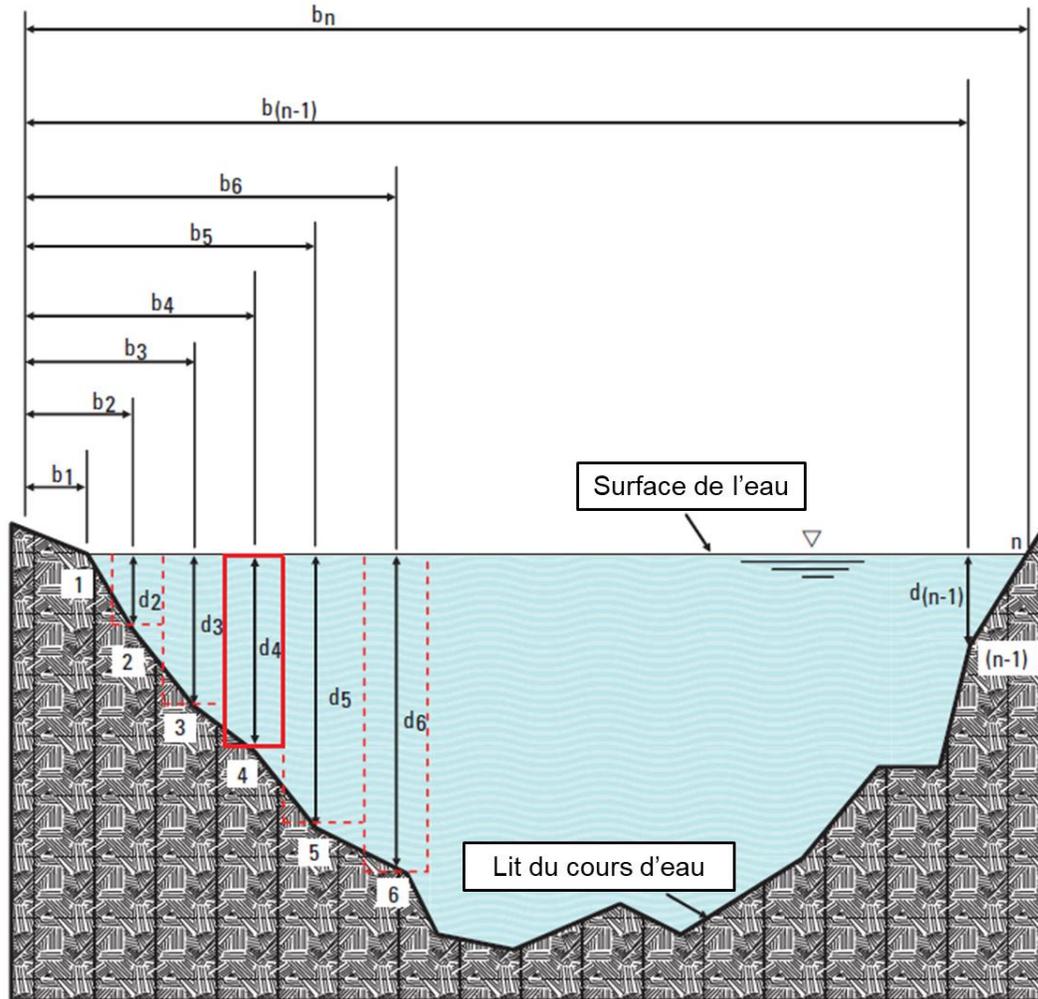


Figure 2.3 – Illustration de l'application de la méthode des sections centrales (image adaptée de Turnipseed et Sauer, 2010).

### 2.2.3.2 Division de la section

La section du cours d'eau où le débit est mesuré est divisée en un minimum de 21 sous-sections (20 verticales) afin d'éviter qu'une sous-section totalise plus de 10 % du débit total mesuré. Un plus grand nombre de sous-sections peut être envisagé en cas de changements importants dans le profil de la section ou de variations transversales importantes des vitesses d'écoulement. De plus, les sous-sections seront généralement plus larges près des berges et plus nombreuses et plus étroites dans le centre de la section là où les vitesses d'écoulement sont plus élevées. Actuellement, les appareils *SonTeck Flow Tracker* (appareil fréquemment utilisé par la DEH pour les mesures de débits à gué) sont réglés de manière à aviser l'utilisateur lorsqu'une sous-section totalise plus de 10 % du débit total. L'utilisateur peut alors revenir à cette sous-section pour en ajouter une nouvelle.

Turnipseed et Sauer (2010) suggèrent quant à eux de diviser la section en 25 à 30 verticales mais spécifient que pour une section avec un profil lisse et des vitesses d'écoulement relativement uniforme, le nombre de sous-sections pourra être revu à la baisse. En ce qui concerne la largeur des sous-sections, ils suggèrent que le débit transitant par chaque sous-section ne représente pas plus de 5 % du débit total de la section. Turnipseed et Sauer (2010) indiquent qu'il faut éviter de diviser la section en sous-sections de surfaces égales excepté pour des sections où les débits sont uniformément distribués et d'augmenter le nombre de sous-sections lorsque les vitesses d'écoulement sont plus grandes.

Lors de variations rapides du niveau d'eau, Turnipseed et Sauer (2010) suggèrent de réduire le nombre de verticales entre 15 et 18 afin d'accélérer la prise mesure de débit et de minimiser les variations de niveau d'eau entre le début et la fin et au début du jaugeage. Ces derniers justifient ce choix par le fait que les incertitudes associées à une mesure plus rapide sont moins élevées que les erreurs pouvant résulter de variations importantes des niveaux.

### **2.2.3.3 Mesure de vitesse**

La mesure de vitesse se fait à partir d'une lecture en un ou plusieurs points sur chaque verticale divisant la section du cours d'eau. Actuellement, la DEH utilise la méthode *0.6-depth method*, c'est-à-dire que la mesure est réalisée à un seul point correspondant à 60 % de la profondeur estimée à partir du fond de l'eau. Selon Turnipseed et Sauer (2010), cette méthode est appropriée lorsque : 1) les profondeurs varient entre environ 10 cm et 45 cm pour un ADV et un moulinet à godet de type *Price Pygmy* et pouvant aller jusqu'à 75 cm avec un moulinet à godet de type *Price AA*; 2) le niveau d'eau change rapidement; 3) les conditions (débris ou glace fondante) rendent difficiles la mesure des vitesses.

Ces auteurs suggèrent toutefois d'utiliser la méthode où des mesures de vitesse sont réalisées en deux points situés à 20% et 80% de la profondeur à chaque verticale et où la moyenne de ces deux lectures est retenue au lieu d'un seul point situé à 60 % de la profondeur. Cette méthode serait plus précise et plus fiable et devrait être retenue dès que les niveaux d'eau excèdent 45 cm lors de l'utilisation d'un ADV, soit l'instrument le plus fréquemment utilisé par la DEH pour le jaugeage à gué. Actuellement, la procédure SGQ11.7.1 de la DEH indique que les vitesses sont mesurées en ces deux points seulement lorsque les profondeurs sont supérieures à un mètre. En pratique toutefois, d'autres techniques de mesure de débit sont utilisées dans de telles situations (voir section suivante) puisque selon cette même procédure, les jaugeages à gué sont proscrits lorsque les profondeurs dépassent 1.20 m pour des raisons techniques et de sécurité.

À chaque verticale, la lecture des vitesses est réalisée pendant 40 secondes. Cet intervalle de temps est celui par défaut des appareils SonTeck FlowTracker et SonTeck FlowTracker-2 (SonTeck/Xylem Inc., 2019). Il est mentionné dans SonTeck/Xylem Inc. (2019) que la durée de la lecture devrait être comprise en 40 et 60 secondes. Turnipseed

et Sauer (2010) suggèrent quant à eux des lectures de 40 à 70 secondes lors de l'utilisation d'un moulinet à godet. Cette durée de 40 secondes est recommandée depuis longtemps (voir p. ex. Pelletier 1988) et des durées plus longues permettraient de réduire de manière notable les incertitudes sur la mesure de vitesse.

Il est important de mentionner que selon Turnipseed et Sauer (2010), lors de variations importantes du niveau d'eau lors de la mesure du débit, des lectures plus courtes (20 à 30 secondes) sont envisageables afin d'accélérer la mesure de débit et de minimiser les variations de niveaux entre le début et la fin du jaugeage.

#### **2.2.3.4 Nombre de mesure de débit**

Les intervenants de la DEH procèdent à un jaugeage lorsque les mesures de débits sont réalisées à gué. Un second jaugeage peut être réalisé si les intervenants le jugent nécessaire. Le Coz *et al.* (2011) mentionnent que pour des raisons pratiques un seul jaugeage devrait être réalisé afin de réduire le temps consacré au jaugeage. Il est important de spécifier que le protocole de jaugeage auquel ces auteurs font référence comprend trois mesures de vitesse pour chaque verticale plutôt qu'un seul comme le fait actuellement la DEH (voir Section 2.2.3.3).

#### **2.2.4 Estimation des débits en mouvement continu**

Les jaugeages en mouvement continu peuvent être réalisés à partir de divers instruments : ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) de type StreamPro®, RioGrande® ou RiverPro® ou ADCP de type M9. Différentes méthodes sont possibles pour réaliser ces mesures :

- Câble de profil : deux personnes se trouvent de part et d'autre de la rivière et l'appareil est déplacé le long d'un câble transversal préalablement fixé.
- Embarcation : une personne dirige l'embarcation de manière à maintenir la section préalablement identifiée alors qu'une seconde personne procède à la mesure des vitesses d'écoulement le long de cette même section.
- Câble de profil en embarcation : consiste à diriger l'embarcation à l'aide d'un câble de profil; cette approche est particulièrement utile lorsque les débits sont faibles et qu'il est difficile de garder une vitesse constante dans une direction donnée sur toute la section.
- D'un pont : l'appareil de mesure est déplacé par un intervenant se déplaçant sur un pont.
- À gué : l'appareil de mesure est déplacé par un intervenant se déplaçant directement dans le cours d'eau.

Le choix de la méthode revient à l'intervenant de la DEH sur le terrain et est notamment fonction des conditions d'écoulement qui prévalent le jour du jaugeage. Les critères de sélections des méthodes ne sont pas décrits et discutés dans le cadre de ce rapport. À

cet effet, le lecteur peut consulter Mueller *et al.* (2013). Les prochaines sections décrivent plutôt les procédures à suivre sur le terrain afin d'assurer une mesure de débit de qualité lorsque la méthode de mesure est du type mouvement continu.

#### **2.2.4.1 Sélection de la section de jaugeage**

Les procédures SGQ-11.7.3 et SGQ-11.7.4 précisent les points suivants :

1. Écoulement respectant les vitesses minimales et maximales selon l'instrument choisi et la méthode retenue. Selon Oberg *et al.* (2005), si les vitesses moyennes d'écoulement sont inférieures à 0.01 m/s (0.3 pi/s), une autre section doit être envisagée. Simpson (2002) spécifie qu'il est possible de réaliser des mesures de débits en conditions de faibles vitesses d'écoulement mais que ces mesures sont plus difficiles.
2. Écoulement relativement uniforme et unidirectionnel et écoulement sans zone de cisaillement importante;
3. Écoulement sans turbulence ou vagues pouvant occasionner un tangage et un roulis important;
4. Écoulement non influencé par la présence d'obstacle comme des piliers de ponts ou des quais;

Les considérations du point 2 indiquent que l'écoulement doit être homogène ce qui constitue une condition essentielle pour l'obtention de mesures de débit fiables lors de l'utilisation de l'ADCP (Mueller *et al.* 2013).

En ce qui concerne la géométrie de la section, les procédures SGQ-11.7.3 et SGQ-11.7.4 indiquent qu'il faut :

1. Éviter les sections de bathymétries irrégulières et variant abruptement. Mueller *et al.* (2013) affirment que des sections uniformes, trapézoïdales, rectangulaires ou encore paraboliques, sont à privilégier. Ces derniers soulignent également qu'il est préférable que la section soit exempte de débris et de végétations qui pourront avoir un impact sur la rugosité de la section.
2. Respecter les profondeurs minimales et maximales selon l'instrument choisi et la méthode retenue. Mueller *et al.* (2013) spécifie que les profondeurs doivent permettre de mesurer des vitesses pour au moins deux sous-sections en rive droite et gauche de la section et que le débit associé aux deux extrémités doit correspondre à moins de 5 % du débit total. Ainsi, il est préférable d'avoir des sections étroites avec des berges escarpées où les profondeurs sont suffisamment grandes pour réaliser des mesures.

En ce qui concerne les rives, les procédures en question indiquent que les rives doivent être dégagées de tout obstacle ou végétation pouvant nuire à la localisation de la section. À cet effet, Mueller *et al.* (2013) mentionnent que lorsqu'un GPS (*Global Positioning*

*System*) est utilisé, les sections avec une végétation importante en rives sont à éviter puisqu'elles peuvent nuire à la réception du signal par le GPS. À noter que l'interférence peut également provenir de structures ou de bâtiments près de la section.

Il est important de noter également que les critères de sélections présentés à la Section 2.2.3 pour les jaugeages par extrapolation des champs de vitesses sont également valables (Mueller *et al.* 2013). Un autre facteur doit être considéré dans le choix de la section à savoir qu'il faut éviter les zones avec un champ magnétique local important (p. ex. pylône pour le transport d'électricité). La section devrait également être éloignée de toute structure en acier, tels des ponts. Le document de Le Coz *et al.* (2011) peut également être consulté pour une description de différents facteurs à considérer qui peuvent affecter les mesures de débits à partir d'appareil de type ADCP.

Les procédures SGQ-11.7.3 et SGQ-11.7.4 incluent tous les principaux points concernant la sélection de la section de jaugeage mentionnés par Mueller et Wagner (2009), Turnipseed et Saur (2010) et Mueller *et al.* (2013).

#### **2.2.4.2 Étapes préalables à la prise de mesure**

Dans Mueller *et al.* (2013), les étapes préalables à la mesure de débits et nécessaires pour assurer une mesure fiable sont :

1. Vérification de l'heure de l'appareil;
2. Diagnostic de l'appareil (vérification automatique du bon fonctionnement de l'appareil);
3. Vérification de la variation de la vitesse du son avec la profondeur;
4. Calibration du compas;
5. Configuration de l'instrument;
6. Test de fond mobile.

Ces étapes soient décrites dans les procédures SGQ-11.7.3 et SGQ-11.7.4 bien qu'elles ne soient pas nécessairement divisées ou ordonnées de la même manière. Une mise à jour de ces procédures sur la base de Mueller *et al.* (2013) seraient sans doute à envisager considérant que les procédures transmises semblent pour la plupart incomplètes ou en révision.

#### **2.2.4.3 Mesures de débit**

Il est important de noter d'entrée de jeu qu'un appareil de type ADCP ne peut mesurer les débits dans toutes les zones d'une section. Ainsi, les débits près de la surface, du fond et des berges ne proviennent pas d'une lecture directe des vitesses mais sont plutôt estimés à partir du champ de vitesse mesuré. Le Chapitre 10 du guide d'utilisation du logiciel WinRiver II, logiciel utilisé par la DEH, donne tous les détails quant aux méthodes d'extrapolation utilisées.

Dans de bonnes conditions avec un fond stationnaire, deux traversées de la section sont minimalement requises (Oberg et Muller, 2007; Mueller *et al.* 2013). Le Coz *et al.* (2011) suggèrent quant à lui quatre ou six traversées. Ce nombre pourrait même être plus élevé dans le cas de disparités importantes entre les débits estimés lors de chacune de ces traversées. Le nombre de traversées dans les deux sens doit toutefois être égal afin d'éviter un possible biais directionnel (Mueller *et al.* 2013). De plus, ces traversées doivent en tout temps être réalisées à une vitesse raisonnable et uniforme et la vitesse doit être constante pour chaque traversée. Dans les procédures de la DEH, il est suggéré que la vitesse de l'ADCP soit inférieure aux vitesses d'écoulement estimées par l'appareil. Oberg et Muller (2007) spécifient que la durée totale de toutes les traversées doit être supérieure à 720 secondes.

Bien que les informations concernant le nombre de traversées ne soient pas spécifiées dans les procédures SGQ-11.7.3 et SGQ-11.7.4, la visite de terrain du 2 octobre 2020 et les discussions avec les techniciens ont permis de comprendre que quatre traversées sont généralement effectuées pour les jaugeages avec les appareils de type ADCP lorsque les conditions d'écoulement sont bonnes. Ces observations concordent avec les informations reçues lors de la rencontre de démarrage :

- Minimum de quatre traversées (deux aller-retour);
- Écarts réduits entre les débits estimés à chaque traversée et la moyenne ou la médiane (de l'ordre de  $\pm 5\%$ );
- Possibilité de réaliser d'autres traversées si certaines d'entre elles ne satisfont pas au critère précédent jusqu'à concurrence de 8 à 10 traversées;
- Le nombre de traversées est toujours pair ce qui implique un nombre égal de traversée de la rive gauche à la rive droite et de la rive droite à la rive gauche;
- La valeur de débit finale retenue est la médiane des débits associés aux traversées qui répondent aux critères précédents.

Pour l'estimation des débits dans des conditions plus difficiles (débits très faibles, débits de crues, fortes turbulences, berges très escarpées, vents forts, etc.) le lecteur peut consulter Mueller *et al.* (2013). En ce qui concerne les pratiques de la DEH, lors de conditions défavorables à la réalisation d'un jaugeage de qualité, les intervenants ont trois options : 1) se déplacer afin de trouver une autre section, 2) changer d'instrument de mesure ou 3) ne pas réaliser de jaugeage.

### **2.3 Informations relatives aux données de jaugeages et aux CT**

Les informations sur les courbes de tarage (CT) et les jaugeages apparaissent dans trois fichiers Excel. Le premier (Courbe\_Tarage\_Histo\_20201103) comprend les historiques des CT et comprend les informations suivantes :

- Numéro de la station hydrométrique;
- Numéro de la CT;

- Date à partir de laquelle la CT est appliquée;
- Caractère actif ou inactif de la CT;
- Nombre de jaugeages inclus dans la CT;
- Date du premier jaugeage inclus dans la CT;
- Date du dernier jaugeage inclus dans la CT;
- Plus petit débit jaugé inclus dans la CT;
- Plus grand débit jaugé inclus dans la CT;
- Date de la première donnée de débit associée à cette station hydrométrique;
- Date de la dernière donnée de débit associée à cette station hydrométrique;
- Information qualitative supplémentaire et commentaire.

Certains éléments de ce fichier méritent d'être relevés et commentés. Pour certaines SH, par exemple La Grande Rivière (010101), la date de la première donnée de débit (1er octobre 1972) est largement antérieure à la date de la première CT (1er octobre 1990). Un élément majeur ici est que seuls les jaugeages utilisés par les intervenants de la DEH pour la construction des CT ont été fournis et apparaissent dans ce fichier. Dès lors, les plus vieux jaugeages et les plus vieilles CT ne sont pas disponibles, bien qu'ils existent, pour les analyses qui seront présentées dans les chapitres ultérieurs. Ainsi, pour certaines CT, des périodes parfois longues sans jaugeage sont présentes alors que la numérotation des jaugeages laisse penser que d'autres jaugeages ont été réalisés durant ces périodes. À ce sujet, les intervenants de la DEH spécifient que des efforts notables ont été apportés à la numérisation ou l'informatisation des données hydrométriques plus anciennes qui étaient enregistrées en formats papier ou sous forme manuscrite. Toutefois, ce processus, parfois laborieux, n'a pas permis d'intégrer toutes les informations disponibles au système BDH (Banque de données hydriques) actuellement utilisé par la DEH.

Le second fichier (Courbes\_Tarage\_Jaugeages\_20201103) regroupe les informations et données suivantes sur les jaugeages :

- Numéro de la station hydrométrique;
- Nom de la station hydrométrique;
- Numéro de la CT effective comprenant les jaugeages;
- Numéro des jaugeages inclus dans la CT active;
- Date à partir de laquelle la CT est active;
- Méthode de jaugeage (embarcation, à gué et sur la glace);
- Instrument utilisé pour réaliser le jaugeage (moulinet, ADV et ADCP);
- Condition (eau libre, effet de glace et avec obstruction)
- Niveau d'eau mesuré lors du jaugeage;
- Débit mesuré lors du jaugeage;
- Variation dans la mesure de débit lors du processus de jaugeage (à noter qu'aucune unité n'est ajoutée à cette information);
- Vitesse maximale enregistrée dans la section de jaugeage (m/s);
- Vitesse moyenne enregistrée le long de la section de jaugeage (m/s);

- Aire de la section de jaugeage (m<sup>2</sup>);
- Profondeur moyenne de la section de jaugeage (m);
- Largeur en surface de la section de jaugeage (d'une berge à l'autre, m).

Certains éléments de ce fichier méritent également une attention particulière. D'abord, seules les CT actives se trouvent dans ce classeur. Ainsi, il n'est pas possible de savoir quels jaugeages étaient considérés dans les CT éliminées ou inactives. Cela peut causer problème notamment dans le cas suivant. Pour la station Bonaventure (010802), pour les CT historiques, on remarque que la CT 032 (inactive) incluait 36 jaugeages alors que la CT 033 (active), résultant d'une modification de la CT 032, incluait 28 jaugeages. Dès lors, il n'est pas possible dans ce cas de connaître les raisons ayant menées au retrait de huit jaugeages pour en arriver à la CT 033. D'un point de vue plus global, cela veut dire que lors d'une modification d'une CT (voir Section 4.4.4 pour tous les détails concernant la différence entre une modification et une amélioration d'une CT), les décisions quant à l'ajout ou au retrait de jaugeage ne sont pas précisées. En somme, il existe plusieurs CT actives couvrant différentes périodes pour une même SH. Pour les CT actives, seuls les jaugeages sont connus et accessibles alors que les jaugeages des CT inactives ne sont pas accessibles.

Dans certains cas une note est ajoutée qui peut, à l'occasion, expliquer les raisons de la modification de la CT. Pour la CT 033 toutefois, la note apparaissant dans le fichier ne permet pas d'en savoir plus :

WL [2011-07-08] : Voir documentation papier "Réévaluation globale des courbes" pour plus de détails sur cette courbe.

Dans la majorité des cas, les notes ne permettent pas d'expliquer clairement les modifications apportées à une CT. Un autre exemple est celui de la CT 084 de la SH Petite rivière Cascapédia (010902) où il est noté :

WL [2017-07-24] : Changement 081 constaté avec le jaugeage 147. Le changement est fort probablement survenu à la crue historique de 2017. Je considère le lendemain de la pointe, soit le 9 mai 2017 comme date du changement. J'ai enlevé beaucoup de jaugeage.

Cette note ne permet pas d'identifier les jaugeages éliminés lors du passage de la CT 083 à la CT 084 de même que les raisons justifiant l'élimination de ces jaugeages (voir la Section 4.4.4 pour les détails concernant la procédure utilisée par la DEH pour modifier une CT).

Les données relatives aux points pivots des CT pour toutes les CT actives sont inclus dans le troisième fichier (Courbe\_Tarage\_Point\_Pivot\_20201029, voir le Chapitre 4 sur la notion de point pivot et la procédure utilisée par la DEH pour représenter la CT) :

- Numéro de la station hydrométrique;
- Numéro de la CT active;

- Date à partir de laquelle la CT est effective;
- Numéro séquentiel des points pivots;
- Niveau des points pivots (m);
- Débits des points pivots (m<sup>3</sup>/s);
- Valeur des paramètres des splines cubiques pour représenter la CT.

La Section 4.3 du Chapitre 4 donne une description de la procédure utilisée par la DEH pour la construction des CT et explique comment les points pivots sont définis et utilisés à l'aide des splines cubiques. La Section 4.4 de ce même chapitre explique la procédure utilisée pour la mise à jour des CT en fonction des nouveaux jaugeages réalisés.

## **2.4 Données de débits estimés aux stations hydrométriques**

Dans la suite de ce document les débits estimés feront référence aux débits estimés à partir des CT actives sur la base des niveaux mesurés alors que les débits jaugés feront référence aux débits mesurés lors des jaugeages.

Deux jeux de données de débits ont été fournis. Le premier concerne les débits journaliers aux 764 SH des 13 régions hydrographiques<sup>4</sup> du Québec. Les débits à chaque station sont inclus dans un même fichier comprenant le numéro de la SH, la date et le débit estimé (m<sup>3</sup>/s) correspondant et un commentaire sur le débit (p. ex. S: La donnée est saisie manuellement). Il est important de noter que la mesure brute des enregistreurs de données, soit le niveau d'eau, ne se trouve pas dans les fichiers de débits. En principe toutefois, il est possible d'estimer le niveau à partir du débit estimé et des CT actives à la date où ce débit a été estimé.

Le second jeu de données contient les données 'instantanées' de débit soient les données enregistrées par l'appareil généralement à un pas de temps de 15 minutes. Un fichier par année d'opération est disponible pour chaque station. Ces fichiers comprennent le numéro de la SH, la date et l'heure de la mesure, le débit ou le niveau mesuré (jamais les deux) et un commentaire sur le débit (p. ex. A: Aucune donnée instantanée, ce qui veut dire que la donnée est manquante).

## **2.5 Stations hydrométriques et jaugeages retenus**

Les 175 SH actuellement en opération ont été considérées dans cette étude (voir Tableau A.2 de l'Annexe A). Ainsi, les niveaux d'eau sont mesurés et des jaugeages encore réalisés à ces SH. A noter que les procédures développées dans la cadre de cette étude

---

<sup>4</sup> Régions hydrographiques : [https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/limites\\_region\\_hydro.htm](https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/limites_region_hydro.htm)

pourraient être aisément appliquées aux SH qui ont été à un moment ou à un autre en opération.

Le Tableau A.1 de l'Annexe A présente les caractéristiques suivantes aux 175 SH retenues :

- Numéro de la station;
- Nom de la station;
- Superficie du bassin versant amont (km<sup>2</sup>);
- Coordonnées géographiques (degrés décimaux)
- Type de données (débit ou niveau)
- Régime d'écoulement (naturel ou influencé)

Le Tableau A.2 de l'Annexe A présente les caractéristiques suivantes pour les 175 SH :

- Numéro de la station
- État (ouvert ou fermé)
- Disponibilité des données
- Nombre d'années disponibles
- Date du premier et dernier jaugeage disponible
- Période couverte par les jaugeages
- Nombre de jaugeages (total et en eau libre)

Seuls les jaugeages avec mention 'En eau libre' ont été conservés pour les analyses. Ainsi, tous les jaugeages n'ayant aucune mention ou encore les mentions 'Avec obstruction', 'Effet de glace et Effet d'herbes' ont été éliminés. De plus, certains jaugeages ayant une mention 'En eau libre' ont également été éliminés. L'élimination de ces jaugeages se justifie en grande partie par le fait que pour certaines périodes, les niveaux de certains jaugeages, pour une SH donnée, se trouvent complètement à l'écart des autres jaugeages. Plusieurs raisons pourraient expliquer cette situation, la plus vraisemblable étant un changement du niveau de référence. Ces cas n'ont pas été corrigés, mais plutôt éliminés. Un fichier Excel donnant la liste exhaustive de ces jaugeages, au nombre de 497, a été transmis à la DEH.

## **2.6 Analyses préliminaires des débits estimés et des jaugeages**

La Figure 2.4 présente la distribution des fractions mensuelles des débits estimés aux 175 SH retenues. Elle montre clairement que plusieurs mois de l'année sont mal couverts par les mesures actuelles et que certaines de ces périodes, par exemple les mois de mars et avril, peuvent correspondre à des périodes de crue importante. Cet aspect est à tenir en compte notamment lorsque les plus grands niveaux mesurés seront comparés aux niveaux associés à des modifications importantes du profil de la section de contrôle (niveau critique, voir Chapitre 8 et 9). Ainsi on peut penser que les débits maximums annuels estimés pour certaines années sous-estiment le débit maximum annuel réel si ce

dernier survient pendant une période où les données sont manquantes (p. ex. lors des crues de mars ou avril).

La Figure 2.5 montre la distribution mensuelle des dates des jaugeages réalisés aux 175 SH sous étude. Cette figure concorde avec les informations obtenues à savoir que les principales campagnes de mesure se déroulent au printemps ou en période de crue, en juin et à l'automne (voir Section 4.4.4.1). Ainsi, les équipes sont plus actives au mois de mai et juin ainsi qu'à la fin de l'été et à l'automne (août, septembre et octobre). Très peu de jaugeages sont réalisés en décembre, janvier, février et mars où les conditions d'écoulement rendent ce travail très difficile voire périlleux.

Tel que mentionné précédemment, seuls les jaugeages en eau libre ont été retenus aux 175 stations à l'étude. La Figure 2.6-A montre que le nombre de jaugeages en eau libre varie grandement d'une station à l'autre (6 à 184 jaugeages). Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces différences du nombre de jaugeages entre stations. Ainsi le nombre d'années d'opération de la SH (Figure 2.3-B); la position géographique de la station (les SH plus éloignées sont généralement moins souvent jaugeées) et la stabilité de la section de contrôle de la SH (les sections de contrôle plus instables nécessitent des jaugeages plus fréquents) peuvent être évoqués.

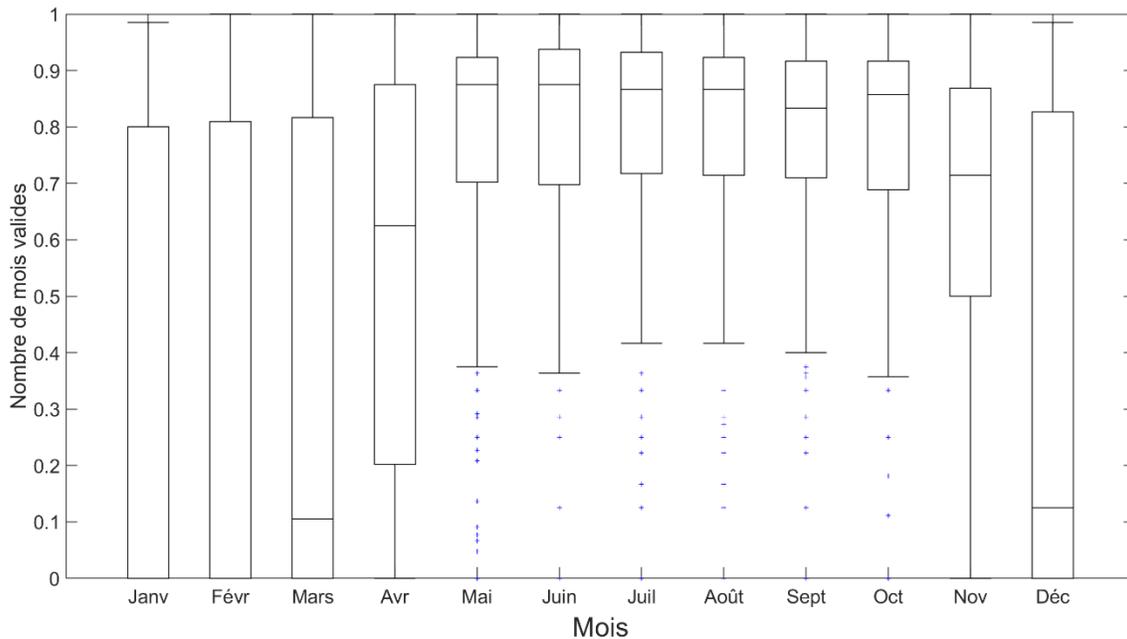


Figure 2.4 – Distributions (box plots) des fractions mensuelles moyennes de débits estimés disponibles aux 175 SH retenues.

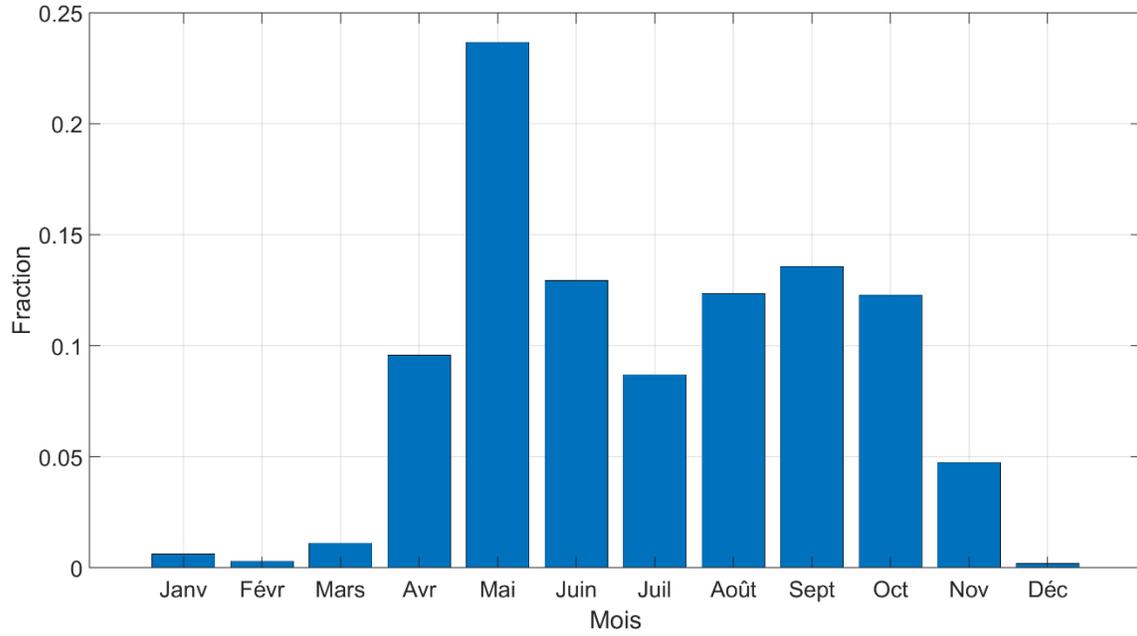


Figure 2.5 - Distribution mensuelle des dates de jaugeages aux 175 SH retenues.

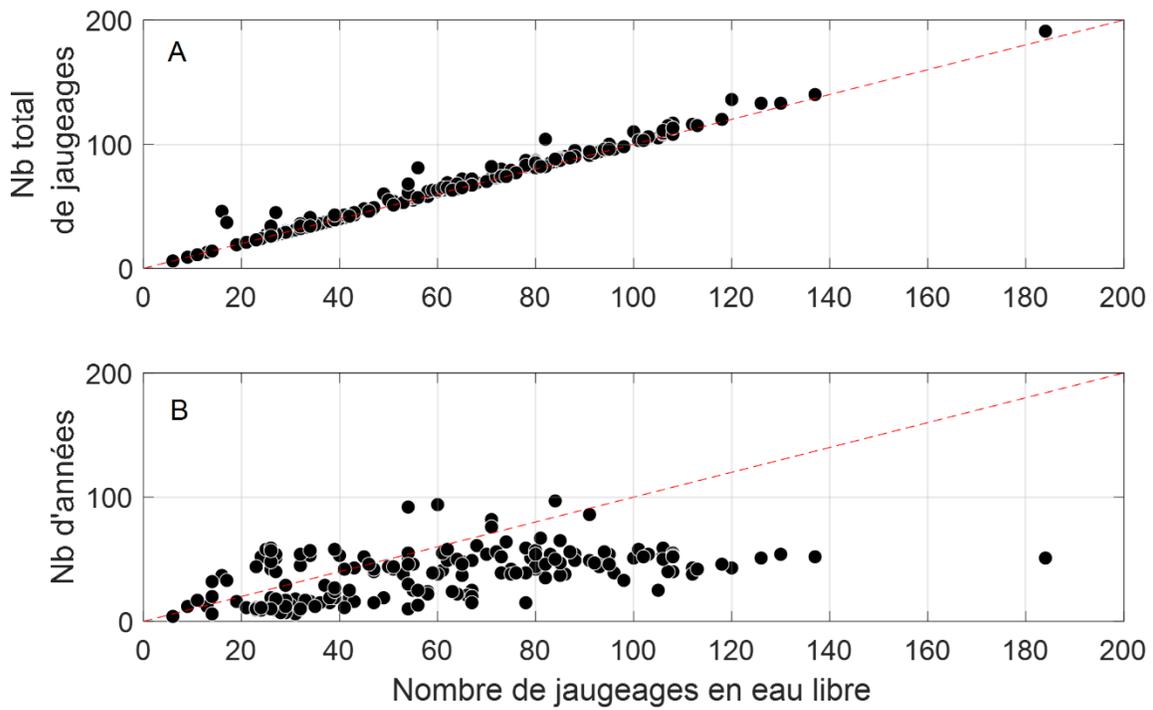


Figure 2.6 – Comparaison entre le nombre de jaugeage en eau libre et A) le nombre de jaugeage total; B) le nombre d'années disponibles à chaque station.

La Figure 2.6-A montre également que des jaugeages ont été éliminés pour plusieurs SH. Bien que moins de cinq jaugeages aient été éliminés pour 151 des 175 SH (86 %), d'autres SH sont plus durement affectées. C'est le cas, p. ex. de la SH 075705 qui comprend 46 jaugeages au total dont cinq jaugeages avec une mention 'Effet de glace' et 25 jaugeages sans mention (jaugeages antérieurs à 1993). Ainsi, pour cette SH, 16 jaugeages sont retenus pour les analyses. Un autre exemple est la SH 050916 où sur les 81 jaugeages, 25 d'entre eux ont une mention 'Effet de glace', les autres (56 jaugeages) ayant une mention 'En eau libre'.

La Figure 2.7 montre le nombre de jaugeages en eau libre disponibles pour les 175 DH à l'étude. On constate avec cette figure que plusieurs SH ont de 20 et 40 jaugeages ainsi qu'entre 60 - 70 et 80 - 90 jaugeages. La Figure 2.8 montre quant à elle la période couverte (année) par les jaugeages. Cette figure permet d'observer une division des SH en deux groupes. Un premier où la période couverte est inférieure à 25 ans et un second plus important où la période couverte se situe essentiellement entre 35 et 60 ans.

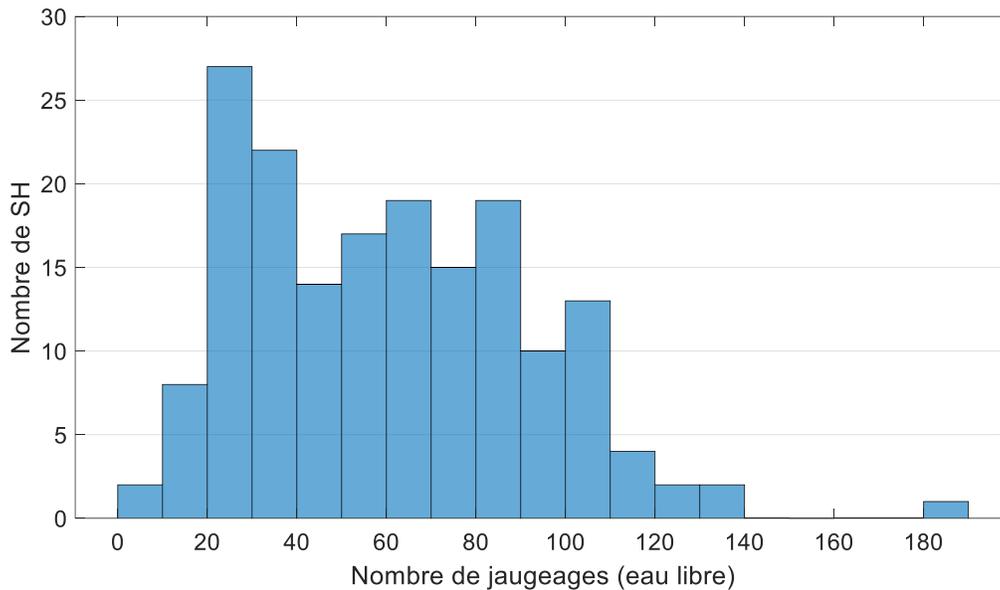


Figure 2.7 - Nombre de jaugeages en eau libre disponibles aux 175 stations hydrométriques (SH) à l'étude.

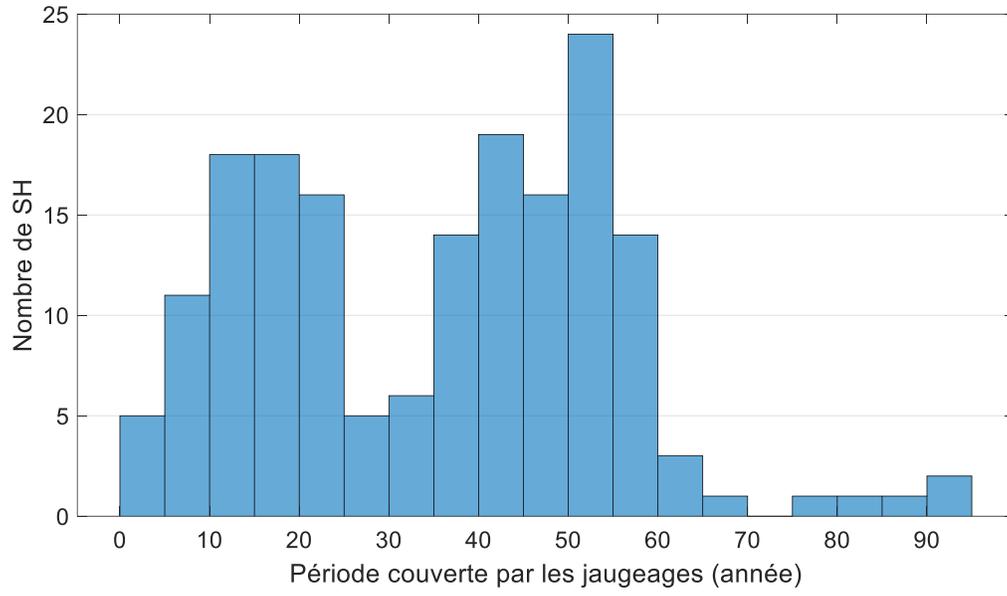


Figure 2.8 - Période couverte par les jaugeages en années pour les 175 stations hydrométriques (SH) à l'étude.

## **CHAPITRE 3. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES COURBES DE TARAGE**

Le présent chapitre présente diverses considérations relativement aux courbes de tarage (CT). Il est divisé en trois sections. La première (Section 3.1) aborde diverses considérations hydrauliques pertinentes relativement à la relation niveau-débit ( $h$ - $Q$ ) utilisée pour la construction des CT.

La deuxième section (Section 3.2) décrit les approches généralement utilisées pour représenter mathématiquement cette relation qui peuvent être regroupées en deux grandes classes à savoir les approches basées sur une fonction de loi de puissance souvent rencontrée en hydraulique (Section 3.2.1) et une autre basée sur l'utilisation des fonctions d'interpolation (Section 3.2.2). Cette dernière représentation est celle utilisée par la DEH pour la construction de ces CT. Le Chapitre 4 décrit cette approche dans le détail et complète les informations présentées à la Section 3.2 sur les pratiques actuelles de la DEH quant à l'élaboration et la mise à jour des CT. Les modalités spécifiques d'application de cette approche par le Ministère de l'environnement et de la lutte aux changements climatiques (MELCC) sont également précisées.

### **3.1 Considérations hydrauliques**

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

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

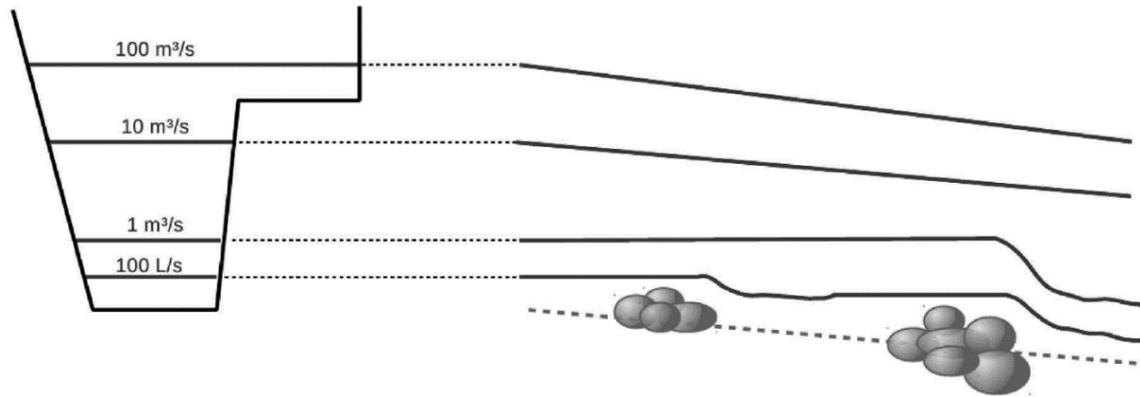


Figure 3.1 - Exemple de contrôles hydrauliques à une section critique selon différents niveaux. Le schéma de droite montre les profils en long du fond et des lignes d'eau pour différents niveaux et débits illustrés dans le schéma de gauche de la section critique (schéma tiré de Le Coz *et al.* 2014).

La Figure 3.1 montre par un schéma simplifié un exemple de section où se succèdent plusieurs contrôles hydrauliques. Dans le cas de faible niveau, correspondant à la situation où le débit est de 100 L/s, le débit est contrôlé par un petit seuil en amont qui est ensuite submergé lorsque le niveau augmente. Un deuxième point de contrôle apparaît alors (débit de 1 m<sup>3</sup>/sec) plus en aval. Lorsque le niveau augmente (transit de 1 m<sup>3</sup>/s à 10 m<sup>3</sup>/s), le contrôle hydraulique transite du seuil au chenal du lit mineur. Enfin le passage du lit mineur au lit majeur (plaine inondable) se traduit par un changement de contrôle hydraulique et un possible changement de la relation h-Q. Ce schéma simple montre toute l'importance d'intégrer les considérations hydrauliques dans l'établissement des CT.

Le schéma de la Figure 3.1 montre également que le contrôle hydraulique peut être de deux types : le contrôle peut se faire à une section (p. ex. seuil naturel ; cas de 1 m<sup>3</sup>/s à 10 m<sup>3</sup>/s de la Figure 3.1) ou sur un tronçon (p. ex. écoulement uniforme permanent; cas des écoulements en lit mineur et majeur de la Figure 3.1). Le contrôle par une section signifie que l'écoulement est critique à la section en question et se manifeste par un abaissement brusque de la ligne d'eau et une ligne d'eau quasi-horizontale en amont. Dans ce cas, la géométrie de la section détermine la relation h-Q. Le contrôle par un tronçon signifie que l'écoulement est uniforme sur le tronçon en question et qu'il est déterminée par la géométrie et la résistance à l'écoulement sur l'ensemble de ce tronçon.

### 3.2 Représentation mathématique de la relation niveau-débit

La représentation mathématique de la relation h-Q de la CT se fait généralement selon deux grands types d'approche. La première consiste à représenter cette relation par une loi de puissance s'inspirant de la forme générale des équations rencontrées en hydraulique. On parlera alors de régression hydraulique (RH) qui est l'objet de la Section 3.2.1. L'autre approche consiste à utiliser diverses fonctions souvent utilisées pour l'interpolation telles les splines cubiques ou des fonctions polynomiales quelconque pour représenter la relation h-Q (Fenton 2018). La forme et la complexité (p. ex. nombre de paramètres à ajuster) de ces

fonctions sont donc déterminées de manière à ce que ladite fonction représente au mieux la relation h-Q par interpolation. Cette approche est discutée à la Section 3.2.2.

### 3.2.1 Régression hydraulique

Suivant cette approche, la relation h-Q est représentée par la loi de puissance suivante :

$$Q = a (h - b)^c \quad (3.1)$$

où Q est le débit (m<sup>3</sup>/s), h le niveau (m) et a, b et c trois paramètres à ajuster. La forme de cette équation s'inspire des équations souvent rencontrées pour décrire la relation h-Q de déversoirs et de seuils de formes diverses ou encore l'équation d'un écoulement en régime uniforme permanent (p. ex. l'équation de Manning; Le Coz *et al.* 2014). Le Tableau 1 de Le Coz *et al.* (2014) présente les valeurs des paramètres a, b et c pour des sections régulières simples. Plusieurs équations de ce type peuvent être utilisées pour représenter le passage entre les différents contrôles illustrés à la Figure 3.1. Des conditions de continuité doivent être alors appliquées pour assurer la continuité entre les différents segments de la CT.

La régression de type hydraulique réfèrera dans la suite de ce document à une régression non linéaire du type présentée à l'équation 3.1. L'ajustement de cette équation exige de fixer les trois paramètres a, b, et c lorsque l'ensemble des jaugeages peut être représenté par une seule équation de ce type ou par plusieurs équations lorsqu'il y a changement de contrôle hydraulique.

L'utilisation de cette approche repose donc sur l'hypothèse qu'à la section ou au tronçon de contrôle les conditions critiques d'écoulement s'apparentent à celles d'ouvrages hydrauliques connus dont la relation h-Q s'exprime sous la forme de l'équation 3.1. Cette hypothèse est contestée (et contestable) dans la mesure où les sections, tronçons d'écoulement et types de contrôle peuvent être très divers et peuvent varier en fonction de la profondeur d'écoulement. A ce propos, Fenton écrit (Fenton 2018): « *There is no reason for a real rating curve to follow such a function closely.* » Et Fenton d'ajouter dans ce même article : « *It is an oversimplification of the real hydraulics at many gauging stations.* » Bien que cette affirmation puisse paraître radicale, elle contient certains éléments de vérité. En effet, considérant la complexité des sections, des bathymétries, des types de contrôle hydraulique, il peut paraître étonnant qu'une expression aussi simple que l'équation 3.1 puisse représenter la relation h-Q d'une majorité de sections de contrôle. De plus, on peut penser, et ce point est également mentionné par Fenton (2018), que la mise en place d'une approche de type RH à grande échelle peut présenter certains problèmes et poser certains défis.

Malgré ces critiques, il n'en demeure pas moins que l'approche par RH est la plus communément examinée dans la littérature (p. ex. Le Coz *et al.* 2014). Elle présente l'avantage, malgré les critiques de Fenton (2018), de reposer sur des considérations hydrauliques et physiques qui peuvent donner une certaine confiance dans l'extrapolation de la courbe au-delà et en deçà des parties de la CT couvertes par les jaugeages. Cet aspect est abordé avec plus de détails au Chapitre 7. En fait, outre le fait qu'elle soit très souvent mentionnée dans la littérature, la présente étude montre qu'en général, la RH offre un très bon ajustement des relations h-Q sur l'ensemble des SH sous étude.

Le principal défi, et qui serait un désavantage toujours selon Fenton (2018), concerne l'ajustement de la RH qui exigent de pouvoir évaluer si la RH ajustée est adéquate et satisfaisante ou si elle devrait être améliorée, p. ex. en segmentant la CT en plusieurs parties chacune représentée par une RH différente.

La Figure 3.2 présente un exemple de CT obtenue après ajustement de la RH aux données de jaugeage de la station Sainte-Anne (050408). Les valeurs des paramètres  $a$ ,  $b$ , et  $c$  ont été calculées en minimisant la somme des valeurs absolues des écarts entre les valeurs de la RH et les jaugeages (tous les détails de l'approche sont présentés au Chapitre 7). La représentation de la CT par des splines cubiques telle que proposée par la DEH est également présentée et sera discutée au Chapitre 4. Globalement on observe un bon ajustement de la RH aux niveaux-débits jaugés.

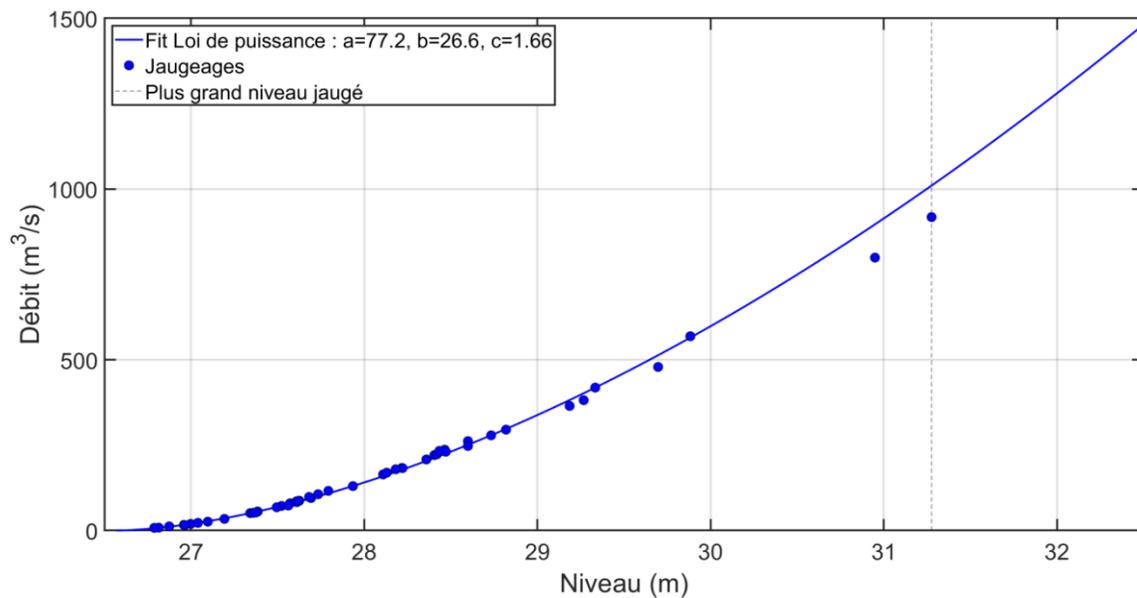


Figure 3.2 - Exemple de CT (courbe 022) à la station Sainte-Anne (050408) couvrant la période de 1965 à 2020. Les niveaux-débits jaugés sont indiqués par les points bleus et les points pivots par les points orange. La courbe orange est obtenue après interpolation des jaugeages par des splines cubiques (voir Chapitre 4) et la courbe bleue est obtenue après ajustement d'une RH (équation 3.1). Les valeurs des paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont indiquées dans l'encadré.

### 3.2.2 Approche de type interpolation

La CT est construite dans ce cas en interpolant une fonction afin qu'elle s'ajuste au mieux aux jaugeages. Cette approche a été adoptée par Coxon *et al.* (2015) qui utilisent la méthode LOWESS pour l'interpolation et par McMahon et Peel (2019) qui utilisent des polynômes de Chebyshev (travaux inspirés par ceux de Fenton, 2018). La DEH utilise une approche de ce type pour la construction de ces CT où l'interpolation est réalisée à l'aide de splines cubiques (les détails sont donnés au Chapitre 4).

Cette approche présente les avantages suivants :

- Elle n'exige pas de préciser une forme 'spécifique' pour la fonction d'interpolation et sur le modèle d'incertitude. Une fonction suffisamment 'souple' est suffisante.
- Elle est relativement simple à mettre en place à grande échelle.

Ses principaux désavantages sont :

- L'extrapolation de la courbe au-delà du plus haut niveau jaugé et en deçà du plus petit niveau jaugé reste très incertaine et arbitraire dans certains cas (p. ex. pour les CT développées par la DEH ; voir Chapitre 4).
- L'évaluation des incertitudes pour les débits au-delà du plus haut niveau jaugé et en deçà du plus petit niveau jaugé est très difficile. Aucun 'modèle' ne permet de justifier sur des bases physiques ou hydrauliques l'extrapolation au-delà des parties jaugées de la CT.

Le Chapitre 4 s'attardera à décrire dans le détail la méthode utilisée par la DEH pour la construction des CT basée sur l'interpolation de la relation  $h$ - $Q$  à partir des splines cubiques.



## CHAPITRE 4. APPROCHE ACTUELLE DU MELCC POUR LA CONSTRUCTION DES COURBES DE TARAGE

Tel qu'évoqué au chapitre précédent, l'approche utilisée par le MELCC pour la construction des courbes de tarage (CT) est du type interpolation. Elle consiste à ajuster une fonction 'interpolatrice', à savoir les splines cubiques, pour construire une fonction mathématique qui s'ajuste le mieux aux jaugeages disponibles. Le présent chapitre passe en revue les différents aspects de l'approche utilisée par le MELCC. Les Sections 4.1, 4.2 et 4.3 décrivent l'approche par spline cubique utilisée pour représenter la relation niveau-débit. La Section 4.4 explique comment les CT sont construites et mises à jour. Finalement, la Section 4.5 comprend une analyse critique de l'approche de la DEH. Le lecteur peut également consulter le document de Théoret (1968) qui décrit et justifie l'approche actuelle du MELCC pour la construction des CT.

### 4.1 Splines cubiques

La présente section s'intéresse spécifiquement à la formulation mathématique utilisée par la DEH pour représenter les CT. Le lecteur est invité à consulter la Section 4.4 pour une description des procédures de mises à jour des CT utilisées par la DEH.

La DEH utilise le module courbe de tarage de BDH (Banque de données hydriques) pour la gestion et la mise à jour de ces CT. Ce logiciel permet de combiner les différents jaugeages et de construire une CT qui peut par la suite être utilisée pour estimer les débits associés aux niveaux mesurés, qu'ils soient inclus dans l'intervalle des jaugeages réalisés (interpolation) ou non (extrapolation).

Une méthode d'interpolation par spline cubique est utilisée pour ce faire (plusieurs références sont disponibles sur ce sujet; le lecteur est invité à consulter le site <http://fourier.eng.hmc.edu/e176/lectures/ch7/node6.html> qui donne une description claire et relativement succincte des splines cubiques). Les paragraphes suivants présentent succinctement cette méthode et les hypothèses utilisées par BDH.

Supposons  $(n+1)$  paires de points  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots (x_n, y_n)$  correspondant aux  $(n+1)$  jaugeages effectués sur un cours d'eau (couples de niveaux et de débits jaugés). Les splines cubiques représentent la fonction passant par ces  $(n+1)$  points par une succession de  $n$  polynômes du troisième ordre  $s_j(x)$  de la forme suivante :

$$s_j(x) = a_j + b_j (x - x_{j-1}) + c_j (x - x_{j-1})^2 + d_j (x - x_{j-1})^3 \quad \text{avec } x_{j-1} \leq x < x_j \quad (4.1)$$

La Figure 4.1 présente un exemple lorsque trois couples  $(x_j, y_j)$  sont disponibles. Les paramètres  $a_j, b_j, c_j, d_j$  sont estimés en imposant des conditions de continuité aux points de raccordements entre les splines (p. ex. le point  $(x_1, y_1)$  de la Figure 4.1). Ainsi on impose pour chaque point de raccordement  $j$  : 1) que les valeurs des deux splines soient égales à la valeur  $y_j$  ( $s_j(x_j) = s_{j+1}(x_j) = y_j$ ) (2 contraintes) ; 2), que les dérivées premières des deux splines soient égales au point de raccordement ( $(s'_j(x_j) = s'_{j+1}(x_j))$  ; 1 contrainte); et 3) que les

dérivées secondes des deux splines soient égales au point de raccordement ( $(s_j''(x_j) = s_{j+1}''(x_j) ; 1 \text{ contrainte})$ ). Les valeurs primées une et deux fois correspondent respectivement aux dérivées premières et secondes de  $s$  par rapport à  $x$ . Ainsi quatre contraintes sont imposées à chaque point de raccordement. Ces contraintes assurent la continuité de la fonction et de ses dérivées premières et secondes.

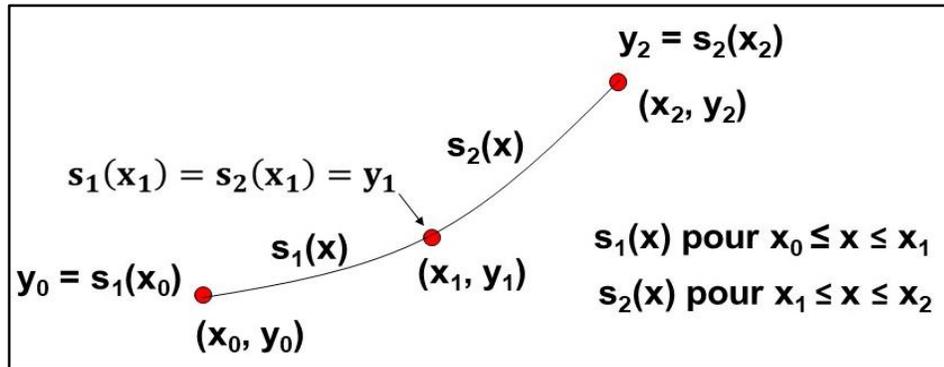


Figure 4.1 - Représentation de la fonction passant par les points  $(x_0, y_0)$ ,  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  par les splines cubiques  $s_1(x)$  et  $s_2(x)$ .

La Figure 4.2 présente le cas plus général où l'interpolation doit se faire à travers  $n + 1$  paires de points  $(x_j, y_j)$ . Dans ce cas,  $n$  splines  $s_j(x)$ , une pour chaque intervalle  $[x_{j-1}, x_j]$ , sont considérées pour un total de  $4n$  paramètres  $a_j, b_j, c_j, d_j$  à estimer (éq. 4.1). Les quatre contraintes décrites au paragraphe précédent sont imposées à chaque point de raccordement, au nombre de  $n - 1$ , pour un total de  $4(n - 1)$  contraintes. À ces contraintes s'ajoutent les deux conditions  $s_1(x_0) = y_0$  et  $s_n(x_n) = y_n$  pour un grand total de  $[4(n - 1) + 2] = (4n - 2)$  contraintes. Afin de pouvoir déterminer de façon unique les  $4n$  paramètres, deux conditions supplémentaires doivent donc être imposées.

Plusieurs options sont possibles pour fixer ces deux conditions supplémentaires qui permettront de résoudre le système d'équations et de déterminer les valeurs des coefficients des  $n$  splines cubiques (pour les détails sur la résolution de ce système d'équations, le lecteur est invité à consulter le site <http://fourier.eng.hmc.edu/e176/lectures/ch7/node6.html>). L'option adoptée par la DEH consiste à imposer l'égalité des dérivées secondes de la première spline  $s_1(x)$  aux points  $x_0, s_1''(x_0)$ , et  $x_1, s_1''(x_1)$ , de même que l'égalité des dérivées secondes de la dernière spline  $s_n(x)$  aux points  $x_{n-1}, s_n''(x_{n-1})$ , et  $x_n, s_n''(x_n)$  ce qui s'écrit (voir la Figure 4.2) :

$$s_1''(x_0) = s_1''(x_1) \quad s_n''(x_{n-1}) = s_n''(x_n) \quad (4.2)$$

Ce choix est important puisqu'il dicte la forme des CT pour les niveaux au-delà du dernier point de jaugeage et en deçà du premier point de jaugeage.

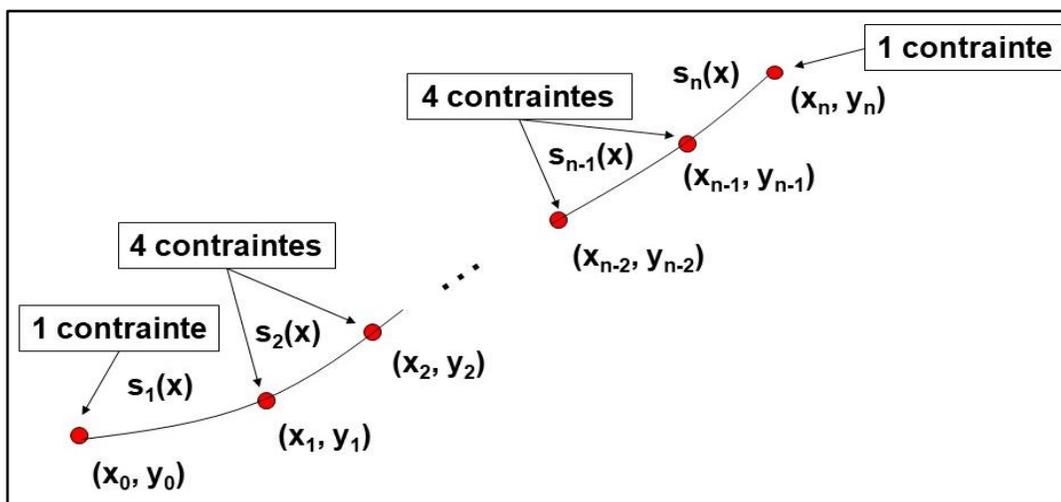


Figure 4.2 – Contraintes imposées aux points de raccordements  $(x_i, y_i)$  des splines cubiques  $s_j(x)$ .

## 4.2 Points pivots

Une autre particularité de la procédure de la DEH pour la construction de ses CT est que les niveaux de jaugeage ne sont pas directement utilisés pour la construction des courbes. La Figure 4.3 illustre l'exemple de la station Sainte-Anne (050408) déjà présentée à la Figure 3.2. En effet, les points considérés pour l'ajustement des splines cubiques sont appelés 'points pivots' et sont distincts des points de jaugeage eux-mêmes (points orange de la Figure 4.3). Ces points sont 'ajustés' par l'hydrologue du ministère en fonction de la position des points de jaugeages. La position et le nombre de points pivots restent arbitraires et on comprend que l'hydrologue place les points pivot aux endroits où il estime que la CT devrait passer. Ainsi par exemple dans le cas de l'avant dernier point pivot de la Figure 4.3, l'hydrologue a placé ce point à mi-chemin entre les deux points de jaugeage les plus proches.

Une autre particularité encore plus déterminante sur le tracé de la CT est que des points pivots doivent être ajoutés au-delà du niveau de jaugeage le plus élevé et en deçà du niveau de jaugeage le plus petit. La Figure 4.3 montre que pour le cas de la station Sainte-Anne, ces points se trouvent près des plus grands et des plus petits niveaux jaugés mais il n'en est pas toujours ainsi. On note toutefois que dans ce cas l'ajustement par la RH diffère sensiblement de celui obtenu par les splines cubiques pour la région des grands débits. La Figure 4.4 montre le cas de la rivière Batiscan où le point pivot supérieur est positionné à un niveau et un débit nettement supérieur au plus haut jaugeage effectué.

Le choix (subjectif) de la position de ce point est crucial puisqu'il impose que la CT passe par ce point et qu'il détermine l'allure de la courbe pour des niveaux supérieurs au plus haut niveau jaugé. Ce point sera de nouveau discuté à la Section 4.4.

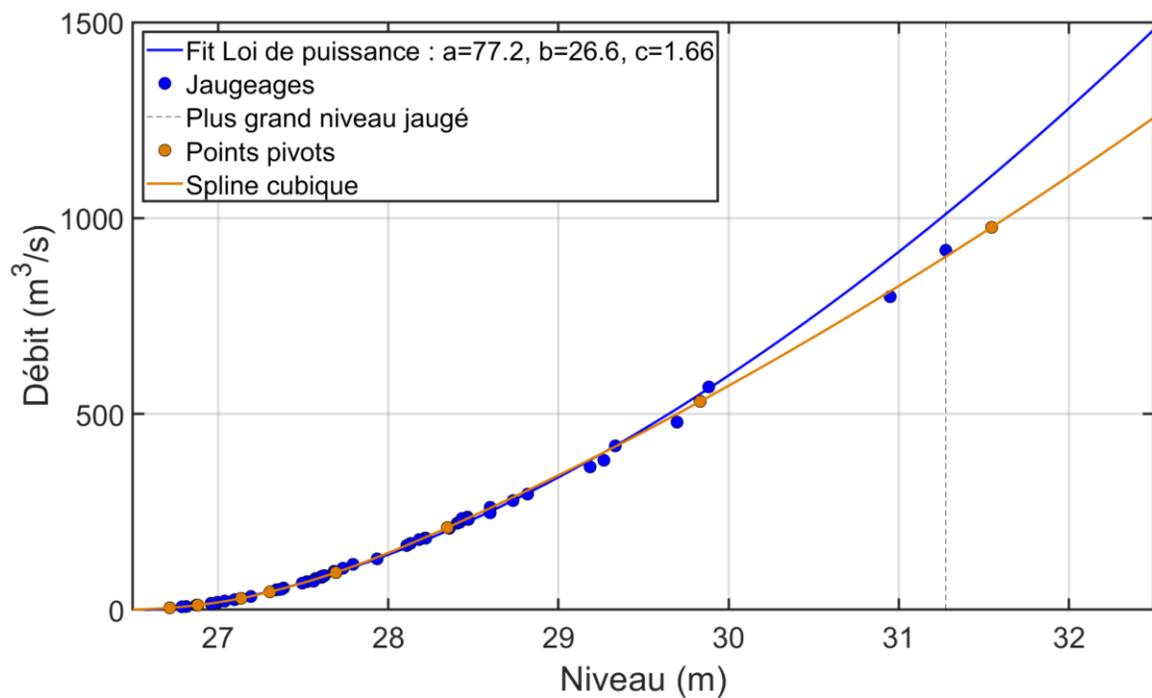


Figure 4.3 - Exemple de CT (courbe 022) à la station Sainte-Anne (050408) couvrant la période de 1965 à 2020. Les niveaux-débits jaugés sont indiqués par les points bleus et les points pivots par les points orange. La courbe orange est obtenue après interpolation des jaugeages par des splines cubiques et la courbe bleue après ajustement d'une RH (équation 3.1). Les valeurs des paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont indiquées dans l'encadré.

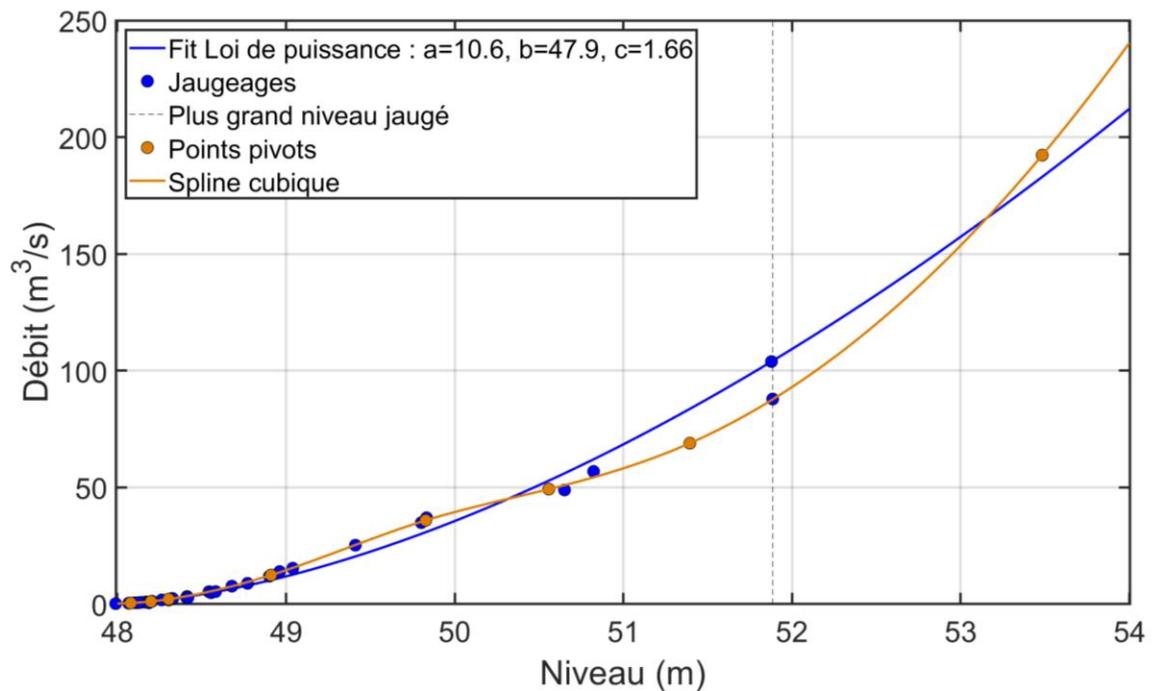


Figure 4.4 – Niveaux et débits jaugés (en bleu), points pivots (points orange) et CT 024 à la station du Chêne (046709) couvrant la période de 2010 à 2020. La courbe orange est estimée à partir des splines cubiques et la courbe bleue après ajustement d'une RH. Les valeurs des paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont indiquées dans l'encadré.

### 4.3 Estimation des paramètres des splines cubiques

Les splines cubiques (équations 4.1) sont donc ajustées en considérant les points pivots définis par l'hydrologue (voir Section 4.2). La continuité des splines cubiques en chaque point pivot de même que des dérivées premières et secondes en chacun de ces points est imposée. Deux contraintes supplémentaires sont aussi imposées à savoir imposer l'égalité des dérivées secondes de la première spline  $s_1(x)$  aux points  $x_0$ ,  $s_1''(x_0)$ , et  $x_1$ ,  $s_1''(x_1)$ , de même que l'égalité des dérivées secondes de la dernière spline  $s_n(x)$  aux points  $x_{n-1}$ ,  $s_n''(x_{n-1})$ , et  $x_n$ ,  $s_n''(x_n)$  (équation 4.2). L'ensemble de ces contraintes permet de déterminer les paramètres  $a_j, b_j, c_j, d_j$  des  $n$  splines cubiques joignant les  $n+1$  points pivots. Il est important de comprendre que les splines cubiques ainsi définies transitent nécessairement par les  $n+1$  points pivots. De plus, afin de couvrir toute la gamme des niveaux jaugés il est essentiel de définir un point pivot au-delà du plus grand niveau jaugé et en deçà du plus petit niveau jaugé (voir les Figures 4.3 et 4.4).

### 4.4 Construction et règles de mises à jour des courbes de tarage

Les sections suivantes décrivent les étapes menant à l'élaboration d'une CT tel que décrite dans le document SGQ-13.1.1 (Analyse, contrôle et validation d'une courbe de tarage).

#### 4.4.1 Documentation relative aux courbes de tarage

Selon le document SGQ-13.1.1, les éléments d'information relatifs à une CT sont :

- Informations géomorphologiques permettant d'interpréter la forme ou l'évolution de la CT;
- Méthode utilisée pour extrapoler la CT;
- Informations pertinentes sur la qualité des jaugeages ou des nivellements nous permettant d'interpréter les écarts entre mesures;
- Jaugeages qui ne sont pas retenus sur une courbe et la justification.

#### 4.4.2 Jaugeages retenus

Puisque la géomorphologie d'une section de contrôle peut changer dans le temps, il est parfois nécessaire d'avoir recours à plusieurs CT, chacune représentative de la relation niveau-débit pendant une période donnée. Ces différentes versions de la CT peuvent être différentes pour certaines parties de la CT mais similaires pour d'autres parties (p. ex. pour les petits niveaux). Concernant les jaugeages retenus pour une CT, le document SGC-13.1.1 stipule que :

- Tous les jaugeages de bonne qualité qui sont réalisés durant la période effective de la courbe devraient être retenus, même s'ils se retrouvent à plus de 5% d'écart;

- Les jaugeages en dehors de la période effective de la courbe mais qui sont situés dans une zone qui n'a pas été modifiée, doivent aussi être conservés sur la courbe active;
- Lorsqu'un jaugeage est écarté, les raisons de cette décision doivent être documentées dans les *Commentaires généraux* de la CT.

Le deuxième point plus haut mérite d'être commenté. Il indique que des jaugeages, le plus souvent antérieur à la période d'application de la CT, désignée ici par la période effective, peuvent être considérés lors de la construction de la CT. Ce choix d'intégrer ces jaugeages repose sur l'avis et le choix de l'hydrologue.

#### **4.4.3 Jaugeages en refoulement**

Sous certaines conditions, la relation niveau-débit pourra ne plus être valide si les débits à la section de contrôle sont influencés par les conditions en aval, p. ex. en raison d'une accumulation de glace ou de débris. On parlera alors de refoulement et les jaugeages dans de telles conditions seront appelés jaugeages en refoulement.

Lors de l'analyse d'une CT, les jaugeages en refoulement devraient être considérés, surtout dans le cas des jaugeages hivernaux pour les stations ayant peu d'effet de glace. L'affichage de ces jaugeages lors de l'ajustement de la courbe peut influencer son allure. Ces jaugeages n'ont toutefois pas été considérés dans le cadre de la présente étude.

#### **4.4.4 Mise à jour des courbes de tarage**

Cette section est le résultat d'une rencontre avec les intervenants de la DEH visant à bien décrire la procédure de mise en place des CT, mais également les étapes visant l'amélioration et la modification des CT. Les principaux points abordés au cours de cette rencontre étaient les suivants :

- Fréquence des nouveaux jaugeages et de mises à jour des CT actives (Section 4.4.4.1);
- Procédure en place pour la mise à jour et l'intégration des nouveaux jaugeages dans les CT et critères utilisés pour conclure qu'une 'nouvelle' CT doit être construite (Section 4.4.4.2);

Avant toutes choses, il est nécessaire de préciser la terminologie utilisée par la DEH. Ainsi, suivant cette dernière, chaque courbe d'une station donnée est identifiée par un nombre à trois chiffres. Les deux premiers chiffres identifient les différentes courbes 'modifiées' alors que le dernier chiffre identifie les versions 'améliorées' de cette courbe. Ainsi pour une station donnée, les courbes 013, 014 et 015 correspondent à des versions 'améliorées' de la courbe 01 alors que la courbe 021 sera une nouvelle version 'modifiée' de la courbe à cette station.

Une courbe est dite ‘améliorée’ lorsque de nouvelles informations sont disponibles et ajoutées aux anciens jaugeages de la CT active et actuelle et parfois aussi aux CT actives couvrant des périodes antérieures. Une courbe ‘améliorée’ signifie que la CT est toujours valide mais que l’ajout des jaugeages récents en améliore la qualité et la représentativité. La courbe demeure active et représentative de la relation niveau-débit actuelle et sa période active reste inchangée. Ce cas est représenté à la Figure 4.5 par les courbes 013 et 014.

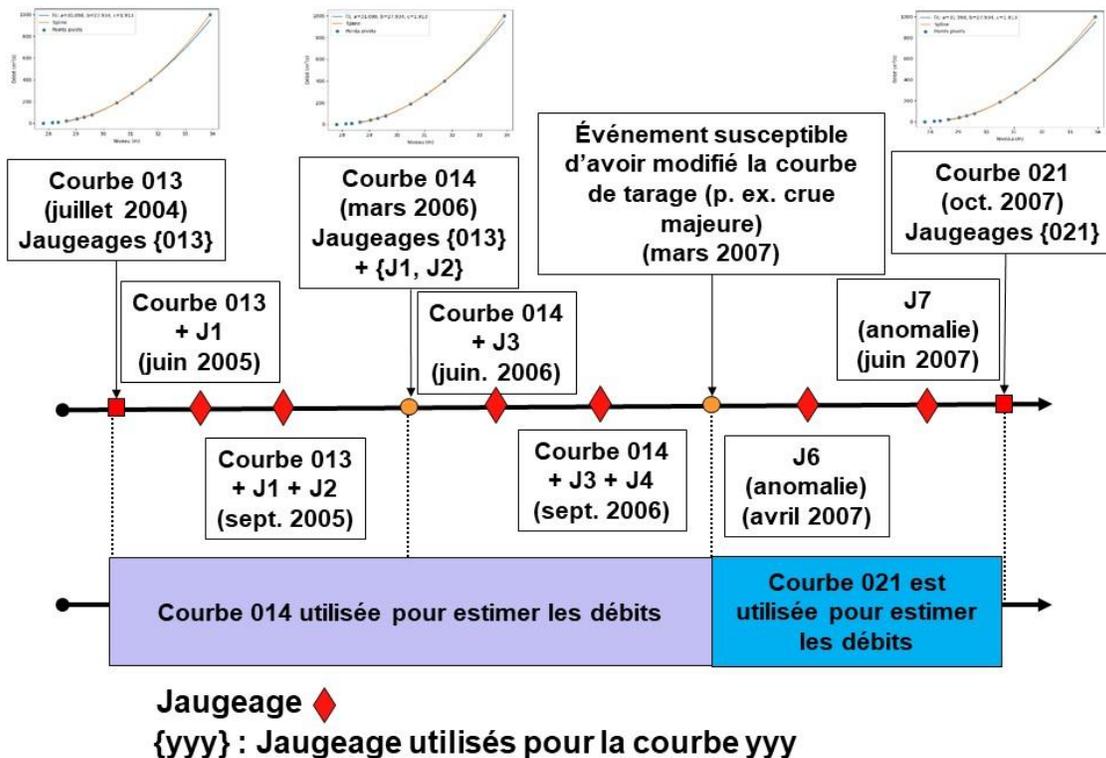


Figure 4.5 – Schéma illustrant la procédure de mise à jour des CT utilisée par la DEH.

Il est à noter que des jaugeages postérieurs à la fin de la période active d’une CT peuvent être intégrés à cette courbe afin de l’améliorer. Ainsi, si un débit majeur est mesuré, ce jaugeage pourra être ajouté à plusieurs courbes distinctes et antérieures si cette partie de la courbe n’a pas subi de modification au cours du temps. Elle rendra ‘inactive’ les versions améliorées antérieures et sera utilisée pour réévaluer les débits estimés à partir des niveaux pour l’ensemble de la période depuis la date d’activation de cette courbe. Dans l’exemple de la Figure 4.5, un tel cas pourrait se produire si par exemple le jaugeage J7 était associé à une partie de la CT non modifiée par l’événement de mars 2007. Dans ce cas, ce jaugeage pourrait être intégré à la CT 014 et utilisé pour créer une CT améliorée qui serait utilisée pour estimer les débits sur la période antérieure à l’événement de mars 2007.

La version améliorée la plus récente d'une CT modifiée est utilisée pour estimer tous les débits associés aux niveaux enregistrés depuis la date d'activation de cette courbe. A titre d'exemple, à la Figure 4.5, la courbe 013 correspond à la troisième version de la courbe 01, a été activée en juillet 2004 alors que la courbe 021, qui correspond à la première version de la courbe 02, est activée en octobre 2007. La version améliorée 014 a été créée en mars 2006. Au fil du temps les versions améliorées sont utilisées depuis la date d'activation de la courbe 01 et ultimement la version 014 sera appliquée à tous les niveaux enregistrés depuis la date d'activation de la courbe 01 jusqu'à sa désactivation (période de mars 2004 à octobre 2007 à la Figure 4.5).

Une courbe sera 'modifiée' si les anciens jaugeages pour une partie de la CT ne sont plus jugés valides et représentatifs de la relation niveau-débit actuelle. Seuls les jaugeages postérieurs au début de la période active de la courbe modifiée pour cette partie de la courbe sont retenus. Le début de cette période active correspond à la date d'occurrence d'un événement qui est la cause présumée du changement dans la section de contrôle (p. ex. la crue majeure de mars 2007 dans l'exemple de la Figure 4.5). Une courbe 'modifiée' n'est appliquée qu'aux mesures de niveaux enregistrées depuis sa date d'activation jusqu'à la courbe 'modifiée' qui lui succède. Une telle courbe pourra être améliorée suite à l'ajout de nouveaux jaugeages.

#### ***4.4.4.1 Fréquence des mises à jour des courbes de tarage***

Il y a essentiellement trois campagnes annuelles de mesure. La première, au printemps, a pour objectif de mesurer les forts débits des crues printanières et de s'assurer que les équipements sont fonctionnels après l'hiver. La seconde, en juin, vise essentiellement à vérifier l'état des équipements après les crues printanières. Des jaugeages seront effectués si utiles. Finalement, une troisième campagne a lieu à l'automne et un jaugeage sera réalisé si les techniciens le jugent pertinent. Grosso modo, chaque station est jaugée en moyenne deux fois par année mais le nombre effectif de jaugeages pourra varier selon les stations. En effet, des équipes peuvent être déployées à tout moment pour jauger en condition de crues ou d'étiage selon les prévisions hydrologiques ou si les conditions d'écoulement (p. ex. crue) permettraient de corriger une anomalie précédemment observée de la CT (voir Section 4.4.4.2).

Il y a mise à jour des CT à la suite de chaque jaugeage, donc au cours de l'été suite aux jaugeages printaniers, à la fin de l'été suite aux jaugeages estivaux et enfin au cours de l'hiver suite aux jaugeages automnaux. Ces mises à jour pourront se traduire par une amélioration ou une modification des CT. Cet élément est discuté plus loin.

Une station ne sera pas nécessairement l'objet de jaugeages à chaque visite. En ce sens, il n'y a pas de jaugeage systématique. Quatre critères sont considérés afin de déterminer si un jaugeage est effectué lors d'une visite :

1. Chaque CT est divisée en sept parties (selon une échelle logarithmique) délimitant ainsi sept intervalles de niveaux et de débits. L'objectif est de réaliser un jaugeage à tous les 2 à 5 ans de chaque partie de la courbe de tarage. Ainsi si le niveau au moment de la visite correspond à une partie de la CT qui n'a pas été jaugée au cours des dernières années, un jaugeage est réalisé. Si la partie de la courbe a été récemment jaugée et que rien n'indique que la section ait subi de changements géomorphologiques ou hydrauliques susceptibles de modifier la CT alors le technicien peut décider de ne pas réaliser de jaugeage.
2. Si le débit au moment de la visite est supérieur d'environ 15% au plus haut débit ou inférieur d'environ 15% au plus bas débit jaugé, alors un jaugeage est réalisé.
3. Si la CT présente une 'anomalie' alors elle sera jaugée. Une anomalie correspond à une situation où les jaugeages antérieurs suggèrent qu'une partie de la CT active n'est plus valide et représentative de la situation actuelle, par exemple suite à des changements géomorphologiques ou hydrauliques de la section de contrôle. Dans ces cas, il est primordial de procéder à de nouveaux jaugeages afin de valider la nature et l'étendue des modifications à la CT.
4. Certaines rivières sont jaugées systématiquement, notamment pour les stations dont la section de contrôle est en constante évolution (p. ex. les stations Dauphine et Nouvelle).

#### **4.4.4.2 Critères et procédure de mises à jour des courbes de tarage**

Lorsque de nouveaux jaugeages sont disponibles, quatre situations sont possibles :

##### **1. Nouveau jaugeage à moins de 5% d'écart de la CT active**

Si le couple (niveau, débit) du nouveau jaugeage est à moins de 5% de la CT active alors ce jaugeage est ajouté à la courbe par le technicien mais la courbe n'est pas modifiée et n'est pas soumise pour révision à l'hydrologue. Ce nouveau jaugeage est intégré à la liste des jaugeages utilisés pour construire la courbe mais les points pivots ne sont pas modifiés. On juge donc que la CT active demeure valable et représentative de la situation actuelle.

##### **2. Nouveau jaugeage à moins de 5% d'écart de la CT active dans une portion non-jaugée de la courbe (niveau plus élevé que le niveau maximal jaugé ou plus petit que le niveau minimal jaugé précédemment)**

Dans ce cas, le technicien se charge d'ajouter ce jaugeage à la liste des jaugeages utilisés pour construire la courbe et celle-ci n'est pas modifiée. Il peut arriver cependant que la courbe soit soumise pour révision à l'hydrologue si le nouveau jaugeage est nettement plus élevé ou plus petit que les niveaux jaugés antérieurement. L'hydrologue pourra alors décider de modifier ou non la courbe.

##### **3. Nouveau jaugeage à plus de 5% d'écart de la CT active dans une partie déjà jaugée de la courbe**

Dans cette situation, le jaugeage est soumis à l'hydrologue qui prendra l'une des trois décisions suivantes :

1. Le jaugeage est jugé non valide et n'est pas considéré. Plusieurs raisons peuvent amener l'hydrologue à conclure que le jaugeage est non valide : conditions de jaugeage non propices, mesures incohérentes, etc.
2. Si le jaugeage est déclaré valide alors cet écart soulève un questionnement sur la représentativité de la CT active. Une 'anomalie' est donc associée à cette courbe et une partie de la CT, correspondant au niveau du jaugeage qui s'écarte de la courbe, est à réviser. Des jaugeages complémentaires pour cette partie de la courbe seront privilégiés lors des visites de terrain futures afin de valider ou non ce changement de forme de la courbe et de procéder à une modification et une révision de la courbe le cas échéant. Le statut d'anomalie persistera tant que l'hydrologue estimera que les nouveaux jaugeages ne sont pas suffisants pour créer une version modifiée de la courbe ou encore que la courbe n'a pas à être modifiée (p. ex. pour cause de jaugeages incorrects).
3. Pour une courbe comportant déjà une 'anomalie' et pour lesquels les jaugeages subséquents confirment la nécessité de modifier la courbe, une nouvelle courbe est créée. L'hydrologue doit préciser dans ce cas quelles parties de la courbe antérieure demeurent inchangées et donc la liste des jaugeages antérieures qui restent pertinents et enfin la liste complète des jaugeages à considérer pour la version modifiée de la courbe. Le début de la période effective de prise en compte de cette nouvelle courbe correspond à la date de l'événement qui serait à l'origine des changements de la courbe, par exemple une crue majeure. L'anomalie est 'fermée', si l'on juge qu'il y a suffisamment de nouveaux jaugeages dans la partie de la courbe à revoir et la version modifiée de la courbe est alors activée.
- 4. Nouveau jaugeage à plus de 5% d'écart avec la courbe de tarage active dans une portion non-jaugée de la courbe (niveau plus élevé que le niveau maximal ou plus petit que le niveau minimal jaugé précédemment).**

Dans la plupart des cas, une version 'améliorée' de la courbe est produite puisque ce nouveau jaugeage apporte de l'information sur une partie non jaugée de la courbe. Cependant dans certains cas, une anomalie pourra être associée à la courbe, par exemple, si la forme de la courbe ou des conditions particulières de mesures font douter de la validité du jaugeage.

Il est à noter que pour des raisons pratiques, les courbes antérieures à 1997 ne peuvent être modifiées ou améliorées sauf en de rares exceptions (p. ex. jaugeages lors des récentes crues historiques sur la Rivière-des-Prairies).

#### **4.5 Analyse critique de l'approche de type interpolation utilisée par la DEH**

La représentation mathématique des CT est cruciale et a un impact majeur sur l'estimation des débits à partir de cette courbe, ce particulièrement lorsque les niveaux mesurés sont

supérieurs au plus haut niveau jaugé ou inférieurs au plus petit niveau jaugé. Dans ces cas les débits sont estimés dans des parties de la CT pour lesquelles aucun jaugeage n'est disponible. L'extrapolation des CT dans ces zones repose sur l'hypothèse que la CT, et l'expression mathématique qui la représente, demeure valide et exploitable dans ces zones. De même, le choix de l'une ou l'autre des représentations (splines cubiques ou RH) conditionne les incertitudes sur les débits estimés à partir des CT.

Ainsi, l'ajustement en utilisant une approche de type interpolation telle qu'adoptée par la DEH implique que :

- Le choix arbitraire des points pivots par l'hydrologue implique un processus subjectif d'arbitrage entre les différents jaugeages. Toutes considérations relatives aux incertitudes sur les mesures de débits ou de niveaux sont dès lors exclues. Le choix des points pivots, et le fait que la CT passe nécessairement par ces points, revient à confier totalement à l'hydrologue le soin de définir la courbe. La principale source d'incertitude dans ce cas provient du 'bon jugement' de l'hydrologue.
- La procédure par point pivot et spline cubique rend les résultats non reproductibles puisque soumis à l'arbitraire des choix de l'hydrologue.
- Toutes considérations hydrauliques ou physiques sont exclues de cette approche; il s'agit uniquement d'un exercice d'ajustement de courbe (*curve fitting*).
- Le positionnement de point pivot au-delà du plus haut niveau jaugé ou en deçà du plus petit niveau jaugé ajoute à l'arbitraire de la procédure et renforce les considérations mentionnées aux points précédents. En effet, le positionnement de ces points pivot est déterminant pour l'estimation des débits lors de crues ou d'étiages extrêmes associés à des niveaux jamais jaugés. Évaluer l'incertitude d'estimation sur ces valeurs revient à évaluer l'aptitude de l'hydrologue à extrapoler la courbe, un exercice impossible à réaliser puisque basé totalement sur des considérations subjectives.
- Les deux contraintes supplémentaires pour l'ajustement des premiers et derniers splines (voir Section 4.2), bien qu'apparemment logiques, ne semblent s'appuyer sur aucune considération théorique ou pratique. Ainsi après discussion avec les représentants du MELCC, apparemment aucune raison précise n'a été évoquée pour ce choix. Dès lors, d'autres choix seraient possibles qui résulteraient en d'autres formes de la courbe en-deçà du plus petit niveau jaugé et au-delà du plus haut niveau jaugé.

L'approche de type RH a été retenue dans ce qui suit. Les principales raisons motivant ce choix sont :

- Un examen préliminaire montre que la RH permet dans une majorité de cas de bien reproduire la relation niveau-débit par les jaugeages.
- Le fait que cette approche repose (dans une certaine mesure) sur des bases physiques et hydrauliques permet de juger de la vraisemblance des valeurs possibles des paramètres de la RH notamment de l'exposant  $c$ .

- Une telle approche offre de meilleure assise pour l'évaluation des incertitudes sur les débits estimés à partir de la CT pour la partie interpolée de la CT mais également pour les niveaux au-delà et en-deçà des jaugeages utilisés pour la construire.

## CHAPITRE 5. ANALYSE FRÉQUENTIELLE DES NIVEAUX MESURÉS

Une analyse fréquentielle des niveaux mesurés aux différentes stations hydrométriques (SH) a été réalisée. Cette analyse vise essentiellement à déterminer les périodes de retour (PDR) des niveaux mesurés et jaugés et ainsi apprécier le caractère plus ou moins extrêmes de ces niveaux et la probabilité que ces niveaux soient atteints durant une période donnée.

Pour ce faire les niveaux maxima annuel (NMaxA) et minima annuel (NMinA) ainsi que les dates où sont enregistrés ces niveaux, ont été extraits des séries aux stations (Tableau C.1 de l'Annexe C). Il est important de noter que, puisque les niveaux mesurés n'ont pas été archivés, ils ont été calculés à partir des débits estimés en utilisant les courbes de tarage (CT) actives à ce moment. Suivant la procédure utilisée par le MELCC (voir Chapitre 4), les niveaux ainsi calculés sont exactement ceux mesurés et enregistrés par le MELCC. Les débits aux 15 minutes étant archivés aux stations, les niveaux NMaxA et NMinA correspondent donc aux niveaux maximums et minimums à une résolution de 15 minutes. Deux stations font exception à savoir les stations 030348 et 030429 où seules les séries de débits quotidiens sont disponibles.

Les règles suivantes ont été appliquées pour l'extraction des NMaxA et NMinA :

- La période de l'année considérée est de mars à novembre. Ainsi les NMaxA et NMinA d'une année donnée correspondent aux niveaux maximums et minimums enregistrés pendant la période de mars à novembre. Ce critère a été retenu puisque la relation hauteur-débit n'est valide qu'en conditions d'écoulement à surface libre, c'est-à-dire en absence de glace.
- Pour qu'une valeur de NMinA ou NMaxA d'une année donnée soit retenue, moins de 20% des données aux 15 minutes doivent être manquantes pendant la période de mai à octobre de l'année en question. Cette contrainte est imposée afin de s'assurer que les NMaxA ou le NMinA sont vraisemblables et de réduire les probabilités que les 'vraies' NMaxA ou le NMinA ne surviennent pendant la période où les données sont manquantes. Une année respectant ce critère est identifiée comme une année valide.
- Seules les stations avec 10 années valides ou plus sont retenues pour la suite des analyses. Les stations satisfaisant ce critère sont désignées par stations valides.

Un total de 117 stations valides satisfaisant donc aux critères précédents a été considéré pour la suite des analyses. Les périodes couvertes aux différentes stations varient toutefois sensiblement d'une station à l'autre et vont de 10 ans à 24 ans pour une moyenne de 16.6 ans. Il est à noter que les NMinA et les NMaxA ainsi extraits couvrent toute la période où les données de niveaux sont disponibles et non seulement la période associée à la CT la plus récente ou encore la période récente où les conditions géomorphologiques sont supposées stables et propices à l'estimation de la CT (voir Section 7.2.1).

Il est important de noter finalement que cette analyse a permis d'identifier une valeur aberrante à la station Massawipi (030220). En effet un débit de 1 545 m<sup>3</sup>/sec est rapporté le 9 mars 2000 à 11h15, une valeur nettement supérieure aux valeurs des pas de temps précédents et suivants. Cette valeur a été éliminée et la valeur maximale suivante a été retenue pour estimer le NMaxA.

## 5.1 Test de tendances et de rupture

Des tests de tendance (test de Mann-Kendall) et de rupture (test de Pettitt) ont été appliqués aux séries des NMaxA et NMinA aux stations. Une tendance ou une rupture a été jugée significative au seuil de 5%. Le Tableau 5.1 présente un sommaire des résultats obtenus. Ainsi 98 SH (84%) ne présentent aucune tendance ou rupture dans les séries des NMinA alors que 110 SH (94%) ne présentent pas de tendance ou de rupture pour les NMaxA et sont donc stationnaires. Dans le cas de NMinA, une majorité des SH présente des ruptures et tendances à la hausse significatives.

La Figure 5.1 présente l'histogramme du nombre de stations selon le nombre d'années valides disponibles et la présence ou non de tendances ou ruptures significatives. Elle suggère que les longueurs des séries ont peu d'impact sur la détection de tendances ou de ruptures dans les séries des MMaxA (Figure 5.1a) ou des NMinA (Figure 5.1b). On constate qu'une majorité de SH compte entre 10 et 12 années disponibles. Un nombre appréciable de SH compte entre 18 et 22 années de données et seulement trois stations ont entre 22 et 24 années disponibles. Enfin, les tendances et ruptures observées semblent indistinctement présentes dans les plus longues et les plus courtes séries. Les Tableaux 5.2 et 5.3 présentent les listes des stations avec des tendances ou des ruptures.

La présence de tendances ou de ruptures peut être attribuable à plusieurs facteurs liés au processus de mesures comme tel (p. ex. changements d'instrument de mesures ou de procédures) ou encore à des changements progressifs ou soudains des caractéristiques hydrauliques ou géomorphologiques de la section ou du tronçon de contrôle. Les analyses qui suivent ne considèrent que les NMaxA aux 110 SH avec des séries stationnaires. Des analyses complémentaires seraient nécessaires pour les séries NMaxA et NMinA non stationnaires répertoriées aux Tableaux 5.2 et 5.3.

Tableau 5.1 - Nombre de stations avec tendance (test de Mann-Kendall) ou rupture (test de Pettitt) dans les séries des NMaxA et des NMinA (entre parenthèses). Le seuil de 5% est utilisé pour classer une tendance ou une rupture comme significative ou non.

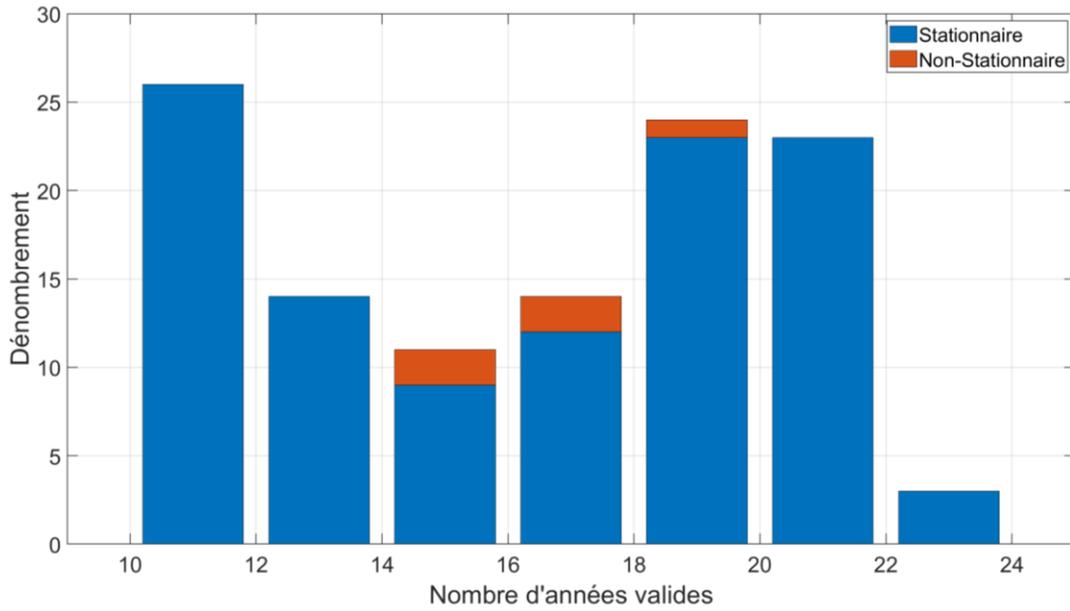
Tendance	Rupture		Total
	Absence	Présence	
Aucune	110 (98)	1 (1)	<b>111 (99)</b>
Hausse	4 (3)	1 (7)	<b>5 (10)</b>
Baisse	1 (6)	0 (2)	<b>1 (8)</b>
<b>Total</b>	<b>115 (107)</b>	<b>2 (10)</b>	<b>117</b>

Tableau 5.2 - Liste des stations avec tendance (test de Mann-Kendall) ou rupture (test de Pettitt) dans les séries des NMinA. Le seuil de 5% est utilisé pour classer une tendance ou une rupture comme significative ou non. Les valeurs des p-value des tests statistiques sont indiquées entre parenthèses et les valeurs inférieures à 0.05 sont indiquées en gras.

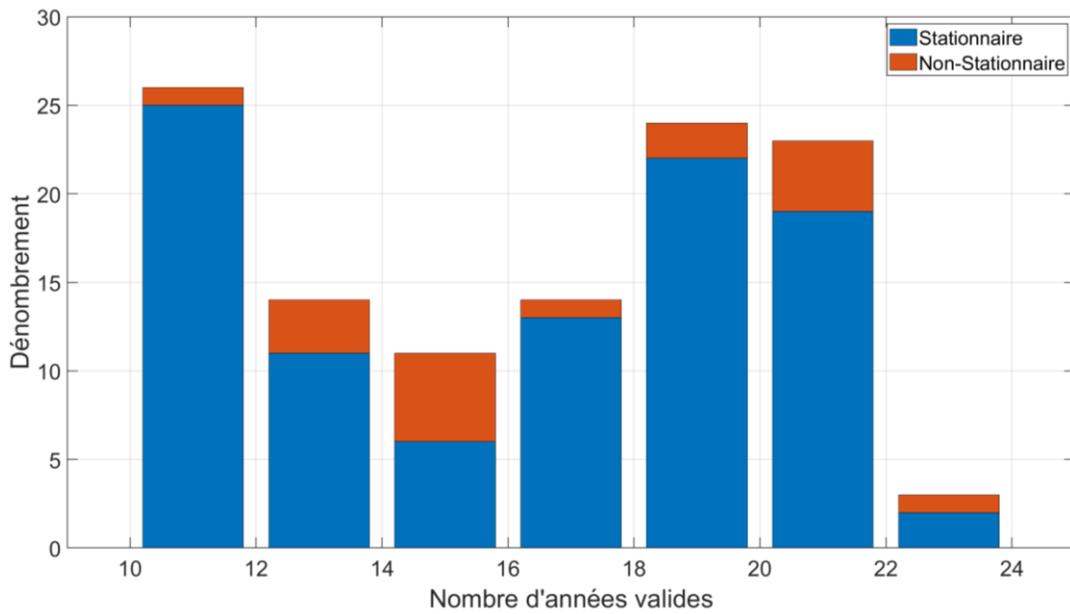
Numéro	Nom	Nombre d'années valides	Rupture (p-value)	Tendance (p-value)
010802	Bonaventure	16	<b>0.014</b>	0.071
011204	Nouvelle	10	0.086	<b>0.032</b>
011707	Madawaska	15	0.231	<b>0.018</b>
022505	Fourchue	21	0.376	<b>0.046</b>
023106	Du Sud	18	<b>0.017</b>	<b>0.049</b>
023427	Chaudière	24	<b>0.003</b>	<b>&lt; 0.001</b>
030278	Saint-François	22	0.069	<b>0.045</b>
030304	Noire	22	0.191	<b>0.048</b>
030345	Yamaska	16	0.273	<b>0.027</b>
030423	Morpions	12	0.424	<b>0.047</b>
030919	Châteauguay	15	<b>0.043</b>	<b>0.029</b>
030920	Noire	13	<b>0.023</b>	<b>0.033</b>
040619	Mitchinamecus	16	<b>0.019</b>	<b>0.001</b>
040624	Du Lièvre	19	<b>0.027</b>	<b>0.014</b>
050812	Aux Pommes	14	<b>0.046</b>	<b>0.001</b>
050916	Des Hurons	10	0.086	<b>0.012</b>
051001	Montmorency	20	<b>0.032</b>	<b>0.015</b>
052235	Saint-Pierre	14	<b>0.027</b>	<b>0.029</b>
061004	Chicoutimi	22	0.069	<b>0.009</b>

Tableau 5.3 - Liste des stations avec tendance (test de Mann-Kendall) et rupture (test de Pettitt) dans les séries des NMaxA. Le seuil de 5% est utilisé pour classer une tendance ou une rupture comme significative ou non. Les valeurs des p-value des tests statistiques sont indiquées entre parenthèses et les valeurs inférieures à 0.05 sont indiquées en gras.

Numéro	Nom	Nombre d'années valides	Rupture (p-value)	Tendance (p-value)
011204	Nouvelle	10	0.143	<b>0.032</b>
040619	Mitchinamecus	16	<b>0.023</b>	0.079
043003	Des Outaouais	16	<b>0.042</b>	<b>0.002</b>
043012	Kinojévis	19	0.100	<b>0.036</b>
050144	Vermillon	17	0.088	<b>0.036</b>
050916	Des Hurons	10	0.143	<b>0.049</b>
052601	Maskinongé	18	0.212	<b>0.049</b>

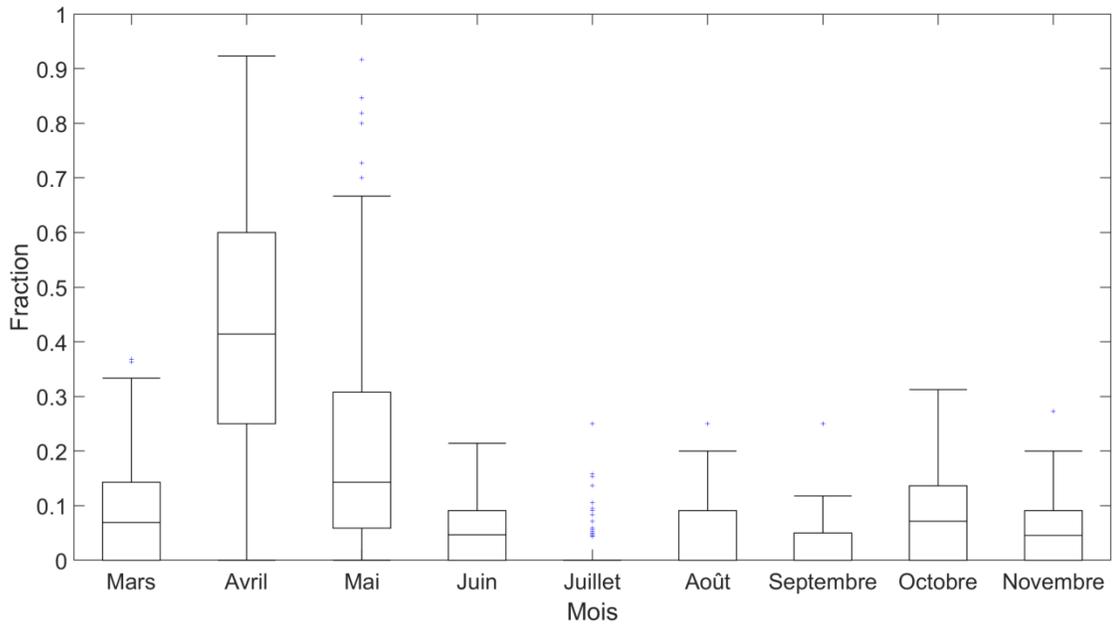


a)

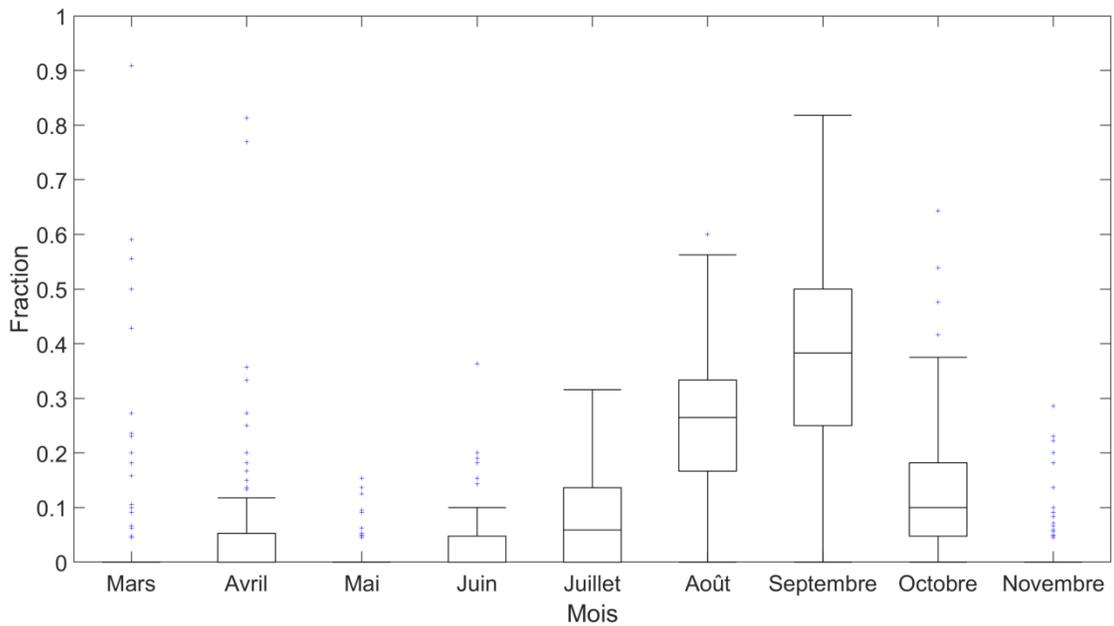


b)

Figure 5.1 - Histogrammes du nombre de stations valides selon le nombre d'années de données valides disponibles pour les séries : a) NMaxA et b) NMinA. La partie en bleu correspond au nombre de stations stationnaires sans tendance ou rupture et la partie en rouge au nombre de stations avec des séries non stationnaires, c'est-à-dire avec une rupture ou une tendance significative.



a)



b)

Figure 5.2 - Distributions (box plots) des probabilités mensuelles d'occurrence aux stations des : a) NMaxA et des b) NMinA aux stations valides sans rupture ou tendance significative.

## 5.2 Probabilité mensuelle d'occurrence des NMaxA et des NMinA

Une première analyse a été réalisée afin de déterminer le moment de l'année où surviennent les NMaxA et NMinA. Seules les 110 (98 pour les NMinA) SH valides sans tendance ou rupture significative sont considérées. La Figure 5.2 présente les distributions des probabilités mensuelles d'occurrence des NMaxA (Figure 5.2a) et des NMinA (Figure 5.2b) à ces stations. Ces résultats confirment que les niveaux les plus élevés sont enregistrés majoritairement au printemps (mars, avril ou mai) et, dans une moindre mesure, à l'automne (octobre et novembre). Quant aux niveaux les plus faibles, ils sont majoritairement observés de juillet à octobre.

## 5.3 Distributions des séries des NMaxA et des NMinA

Les NMaxA et NMinA normalisés,  $\hat{x}_{jk}$ , sont définis par :

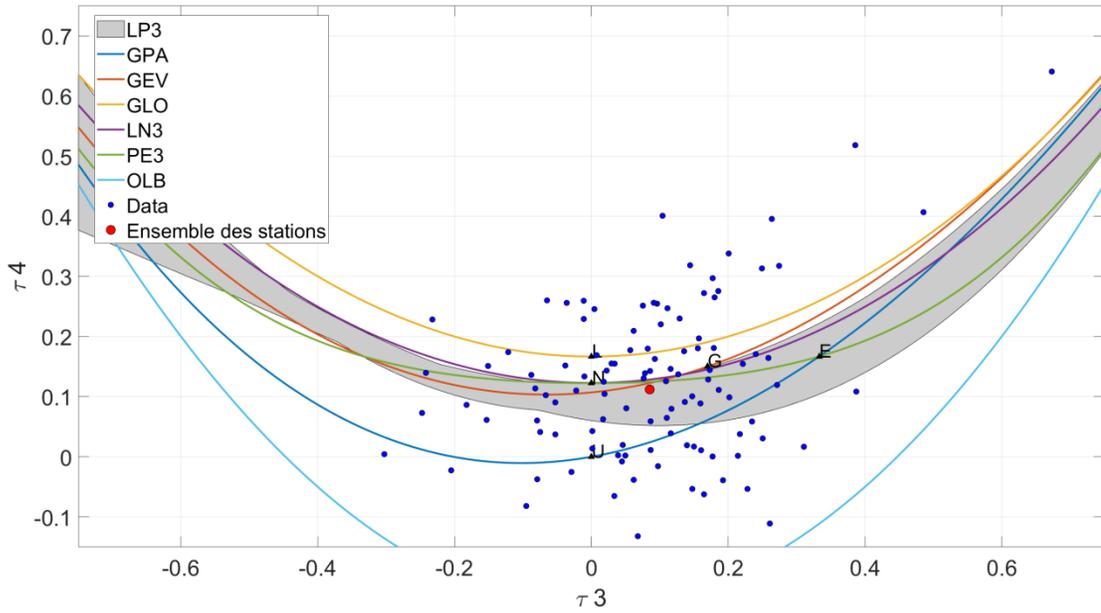
$$\hat{x}_{jk} = \frac{(x_{jk} - \bar{x}_k)}{\sigma_k} \quad (5.1)$$

avec  $x_{jk}$  le NMaxA ou le NMinA de l'année  $j$  à la station  $k$ ,  $\bar{x}_k$  la valeur moyenne des NMaxA ou des NMinA à la station  $k$  et  $\sigma_k$  l'écart-type des NMaxA ou des NMinA à la station  $k$ . Ces valeurs normalisées ont été définies puisque les niveaux mesurés aux différentes SH sont arbitraires et ne réfèrent pas à un niveau de référence commun. Les valeurs normalisées correspondent donc aux écarts par rapport à la valeur moyenne et sont normalisées par l'écart-type, une mesure de la dispersion de ces valeurs autour de la moyenne.

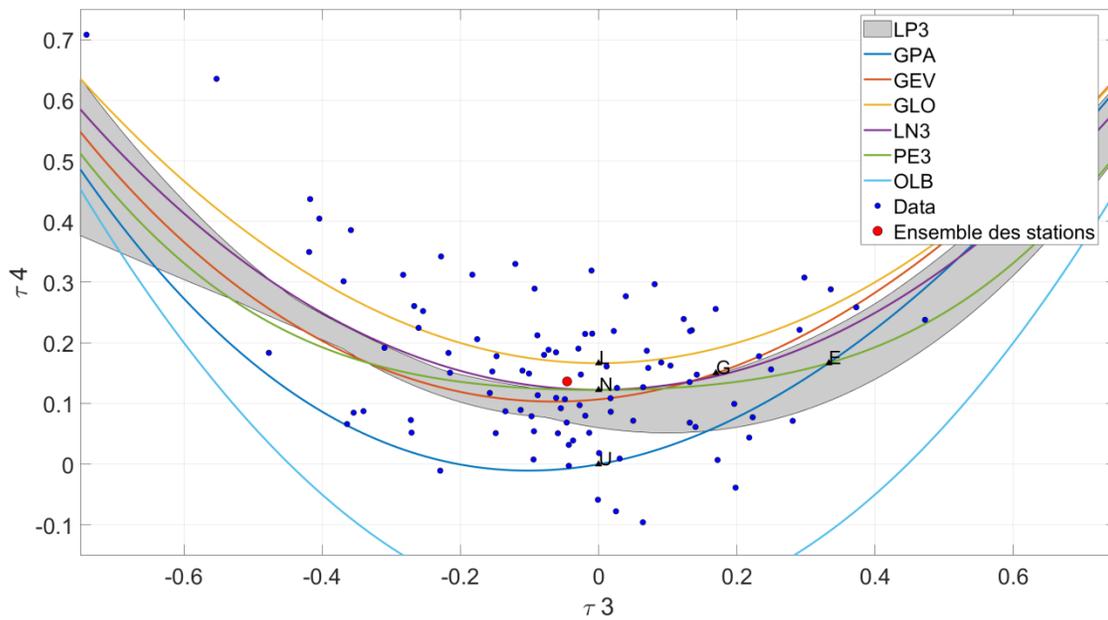
Afin de guider la sélection de la distribution la mieux à même de reproduire les séries NMaxA et NMinA, les valeurs des L-moments  $\tau_4$  et  $\tau_3$  ont été estimées à partir des séries NMaxA et NMinA normalisés à chaque station et les diagrammes correspondants ont été construits pour ces deux variables (Figure 5.3).

La Figure 5.3a montre que le diagramme des L-moments  $\tau_4$ - $\tau_3$  ne permet pas d'identifier sans équivoque une distribution unique pour représenter les séries NMaxA ou NMinA. Ce résultat n'est pas surprenant considérant que les séries disponibles sont relativement courtes (voir Figure 5.1). Dans le cas des séries des NMaxA, la distribution devrait être asymétrique avec une queue à droite ( $\tau_3 > 0$  dans une grande majorité de cas) alors que pour NMinA, la distribution serait plus symétrique ou avec une légère queue à gauche ( $\tau_3$  près de 0 avec plusieurs cas avec  $\tau_3 < 0$ ).

Les NMaxA et NMinA normalisés aux stations ont ensuite été regroupés et les L-moments  $\tau_4$  et  $\tau_3$  estimés et ajoutés à la Figure 5.3 (points rouges). L'idée de regrouper les séries aux stations permet de voir si une version régionale de la distribution des NMaxA normalisés pourrait être utilisée pour représenter les variations de niveaux à tous ces sites selon l'approche décrite dans Hoskins et Wallis (1995). La Figure 5.4 présente les fonctions de répartition de toutes les valeurs de NMaxA et NMinA aux stations. Le développement d'une version régionalisée de la distribution n'a cependant pas été exploré plus avant dans ce qui suit. Une telle analyse pourrait s'avérer utile pour l'estimation des quantiles de PDR très élevées.

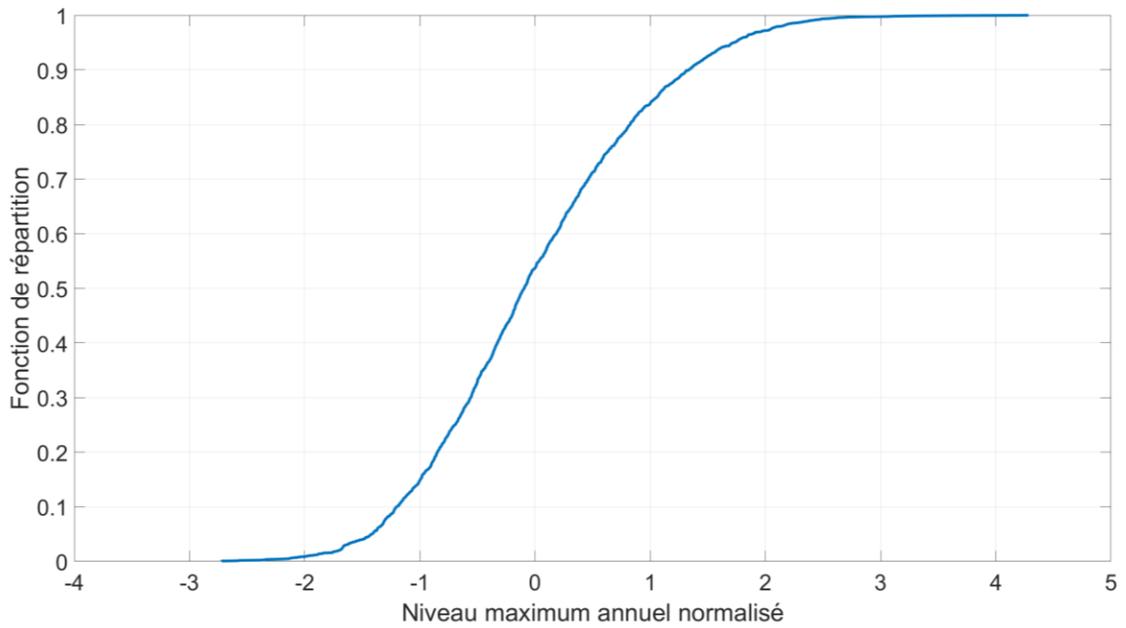


a)

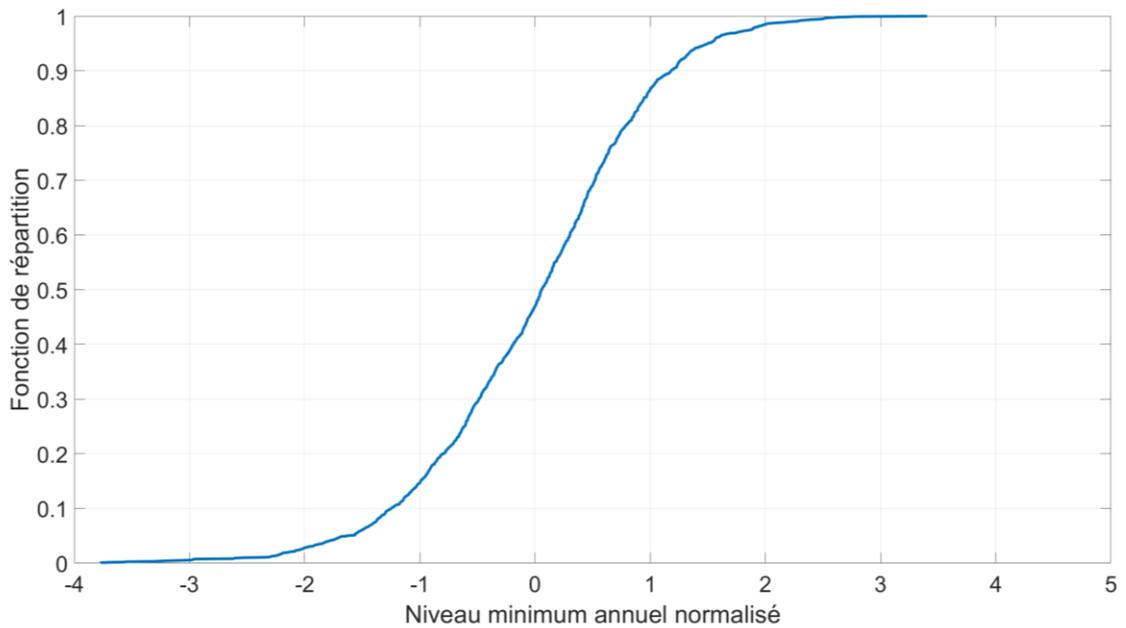


b)

Figure 5.3 - Diagrammes des L-moment  $\tau_4 - \tau_3$  pour : a) NMaxA et b) NMinA aux stations valides sans rupture ou tendance significative. Les points rouges correspondent aux valeurs des L-moments  $\tau_4 - \tau_3$  pour les séries des NMaxA et NMinA normalisés regroupant toutes les stations. Seules les stations avec des séries stationnaires sont été considérées. Les courbes  $\tau_4 - \tau_3$  des distributions suivantes à trois paramètres sont également présentées : logistique généralisée (*Generalized Logistic* – GLO), des valeurs extrêmes généralisée (*Generalized Extreme Value* – GEV), Pareto généralisée (*Generalized Pareto* – GPA), log normale (LN3), Pearson de type III (PE3). Les points correspondent aux distributions suivantes à deux paramètres : exponentielle (E), Gumbel (G), normale (N), logistique (L), uniforme (U).



a)



b)

Figure 5.4 - Fonction de répartition : a) des NMaxA normalisés et b) des NMinA normalisés. Seules les stations avec des séries stationnaires sont été considérées.

## 5.4 Estimation des quantiles des NMaxA

Considérant les résultats du diagramme des L-moment  $\tau_4 - \tau_3$  (Figure 5.3a) pour NMaxA, la distribution GEV a été retenue pour représenter les séries des NMaxA normalisés aux stations avec des séries stationnaires. Bien que, tel que le suggère le diagramme de la Figure 5.3a, plusieurs distributions aient pu adéquatement reproduire les distributions empiriques des NMaxA, la distribution GEV a été retenue sur la base de considérations liées à la théorie des valeurs extrêmes (voir Coles 2001). La méthode des L-moment a été utilisée pour estimer les paramètres de la GEV (Hoskins et Wallis 1995). Le Tableau B.1 de l'Annexe B regroupe l'ensemble des résultats (paramètres de la GEV et quantiles pour PDR 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans) aux différentes stations.

La Figure 5.5 présente l'histogramme des valeurs du paramètre de forme pour les NMaxA normalisés aux stations avec des séries stationnaires. Ainsi une majorité de SH (80 stations sur 108, 73.4%) présente une GEV bornée (paramètres de forme négatifs). Le paramètre de forme moyen est de -0.155 avec un écart-type de 0.240. Rappelons que le paramètre de forme de la GEV détermine la forme de la queue de la distribution et donc les quantiles les plus extrêmes. Une GEV bornée signifie, selon l'analyse fréquentielle, qu'il existe une borne supérieure de la valeur du NMaxA normalisé qu'il est 'statistiquement impossible' de dépasser (d'un point de vue pratique 'statistiquement impossible' devrait être interprété comme 'impossible sur la base des informations disponibles' et non 'impossible' dans un sens absolu).

La Figure 5.6 montre les distributions sous forme de box-plots des quantiles des NMaxA normalisés en fonction de la PDR. On constate que la valeur moyenne des NMaxA normalisés est supérieure à la valeur médiane pour une majorité de stations. On note également que la dispersion des NMaxA normalisés augmente avec la PDR. Ainsi la valeur médiane est de 2.8, et les valeurs des 1<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> quartiles 2.2 et 3.3 respectivement pour la PDR 100 ans.

Pour la variable NMinA la distribution Log-Normale pourrait s'avérer une candidate intéressante. A noter toutefois que l'analyse fréquentielle des NMinA ne sera pas poursuivie dans le cadre de la présente étude.

## 5.5 Comparaison des niveaux mesurés et jaugés

Les analyses de la section précédente ont été utilisées pour comparer les niveaux mesurés et les niveaux jaugés. L'objectif ici est de voir dans quelle mesure la gamme des niveaux jaugés aux stations couvrent la gamme possible des niveaux observés. Pour ce faire, les niveaux suivants à une station donnée ont été définis :

- PGNM : plus grand niveau mesuré (qui correspond au maximum des NMaxA)
- PPNM : plus petit niveau mesuré (qui correspond au minimum des NMinA)
- PGNJ : plus grand niveau jaugé
- PPNJ : plus petit niveau jaugé

Dans le cas du PGNM, la valeur maximale des NMaxA à une station a été retenue alors que pour le PPNM la plus petite valeur de la série des NMinA a été retenue. Quant aux PGNJ et au PPNJ, ils sont estimés en considérant l'ensemble des jaugeages disponibles à la station.

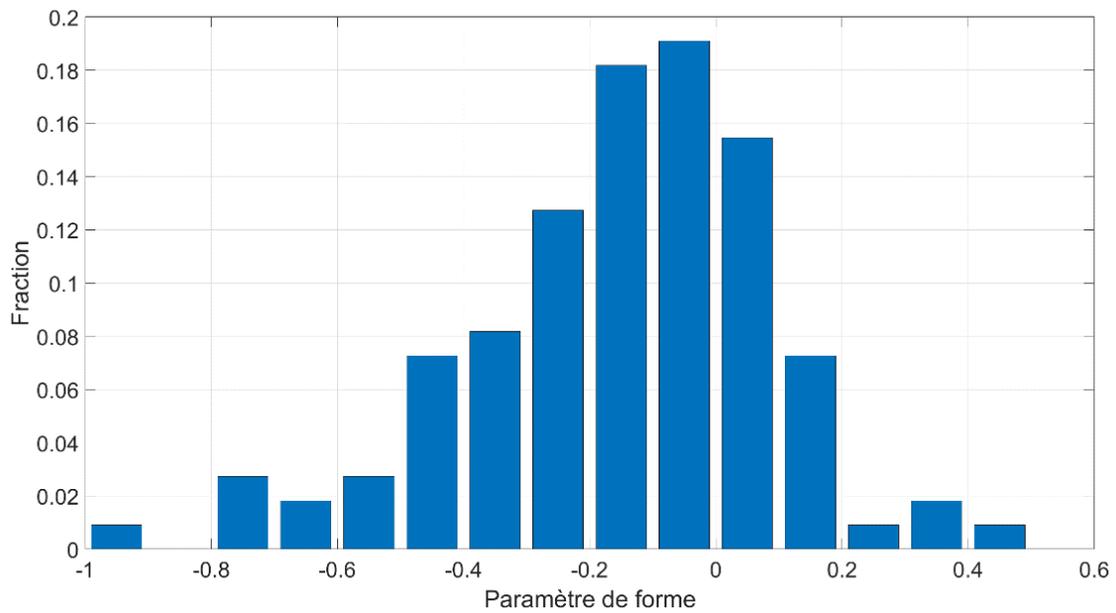


Figure 5.5 - Histogramme du paramètre de forme des NMaxA normalisés aux différentes stations. Une valeur positive correspond à une distribution GEV à queue lourde (*heavy-tailed*).

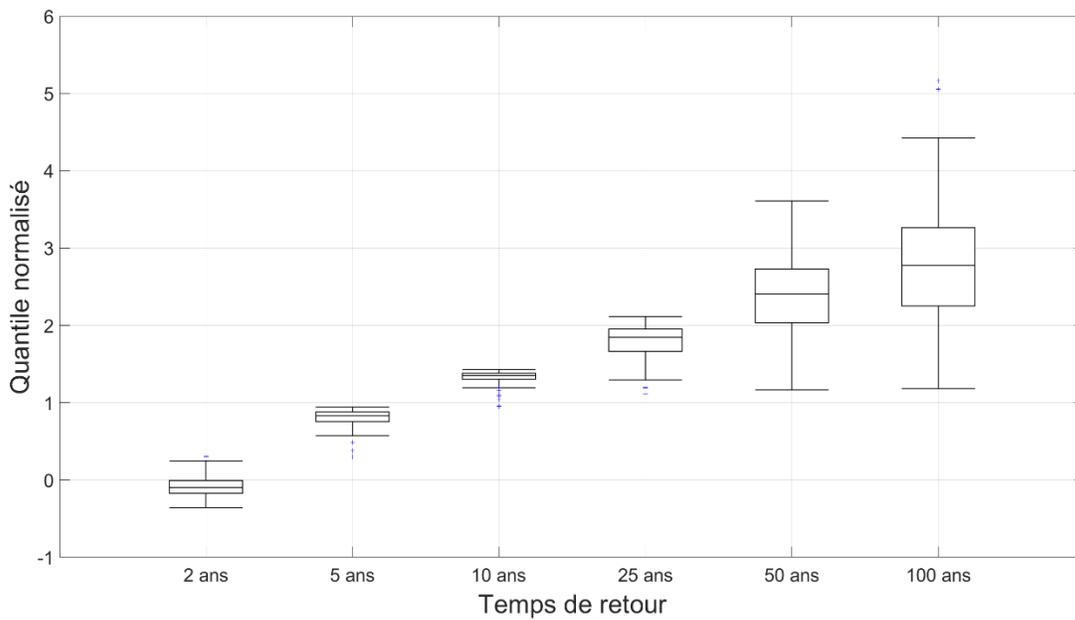


Figure 5.6 - Box-plots des quantiles des NMaxA normalisés en fonction de la période retour.

Ces valeurs sont exprimées sous forme d'écart relatif par rapport à la moyenne des NMaxA selon une équation similaire à l'équation 5.1. Ainsi pour le PGNJ, on aura :

$$\widehat{\text{PGNJ}}_k = \frac{(\text{PGNJ}_k - \overline{\text{NmaxA}}_k)}{\sigma_k} \quad (5.2)$$

où k réfère à l'indice de la station,  $\overline{\text{NmaxA}}_k$  est la valeur moyenne des NMaxA à cette station et  $\sigma_k$  l'écart-type des valeurs de NMaxA. Ainsi  $0 < \widehat{\text{PGNJ}}_k < 1$  signifie que  $\overline{\text{NmaxA}}_k < \text{PGNJ}_k < \overline{\text{NmaxA}}_k + \sigma_k$  alors que  $\widehat{\text{PGNJ}}_k > 1$  correspond à  $\text{PGNJ}_k > \overline{\text{NmaxA}}_k + \sigma_k$ . Ces niveaux ont été estimés et sont présentés au Tableau C.1 de l'Annexe C. Ce tableau contient également la valeur de la probabilité de non-dépassement du niveau PGNJ et la PDR correspondante basée sur l'analyse fréquentielle décrite à la section précédente et sur les distributions GEV définies au Tableau B.1.

Un examen du Tableau C.1 révèle que pour 17 stations (15,5%) ont a  $\text{PGNJ} > \text{PGNM}$  alors que  $\text{PPNJ} < \text{PPNM}$  pour 24 stations (21,8%). Ce résultat, à première vue surprenant, s'explique par le fait que les périodes où les mesures de niveaux sont disponibles, sont différentes des périodes couvertes par les jaugeages. Dans plusieurs cas en effet les niveaux jaugés disponibles couvrent des périodes plus anciennes que celles des niveaux mesurés. A noter que les débits aux 15 minutes postérieurs à 1997 ont été utilisés à toutes les stations. Toutefois, les données historiques quotidiennes à ces mêmes stations sont dans certains cas plus anciennes, de même que les jaugeages.

La Figure 5.7 présente l'histogramme des PDR des valeurs de PGNJ aux 110 SH avec des séries NMaxA stationnaires. Elle montre qu'environ 53% des stations, présente des PGNJ associés à des NMaxA de PDR de moins de 5 ans et environ 29% de moins de 2 ans. A l'opposé 9% des SH ont des niveaux jaugés qui correspondent à des NMaxA de PDR de 50 ans ou plus. Conséquemment pour plusieurs stations, les débits de crue sont estimés à partir de la partie 'extrapolée' de la CT, c'est-à-dire en utilisant la partie de la courbe au-delà du PGNJ, et ce même pour des crues modestes de PDR 2 ans dans plusieurs cas. L'utilisation de la CT en extrapolation repose sur l'hypothèse que la relation h-Q représentée par la RH demeure valide au-delà du PGNJ où aucun jaugeage n'est disponible.

Ce résultat est important puisqu'on peut penser que les débits estimés en extrapolation de la CT sont plus incertains et ce d'autant plus que l'on s'éloigne du PGNJ. Or plusieurs débits de crues sont estimés à partir de cette partie de la courbe. Une analyse fréquentielle se basant sur les débits maxima annuels devraient donc intégrer d'une façon ou d'une autre ces incertitudes.

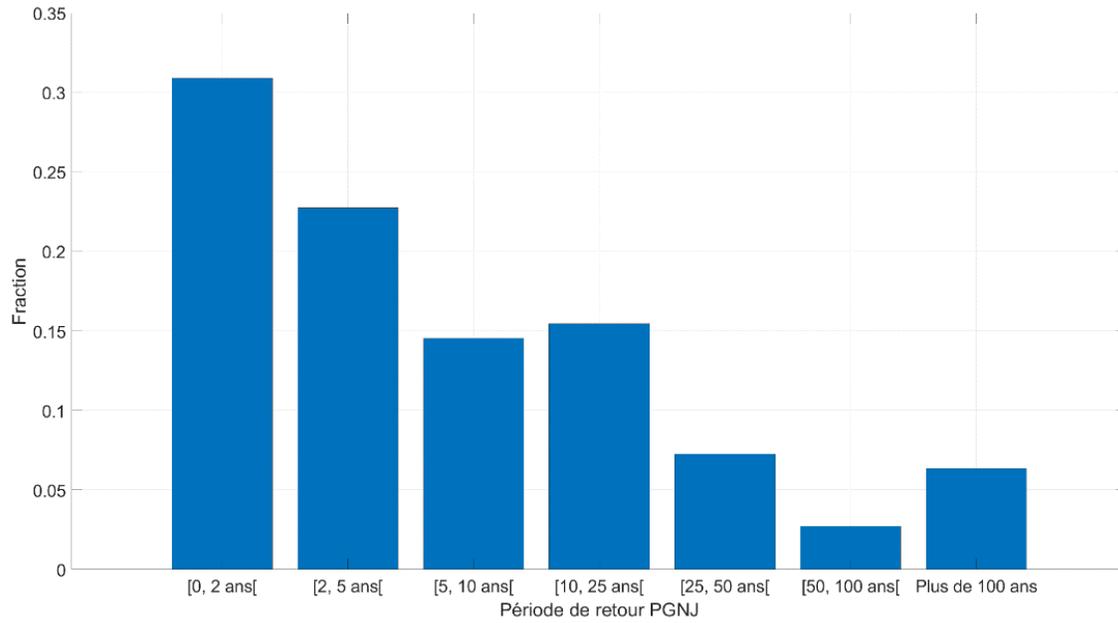


Figure 5.7 - Histogramme des périodes de retour associées aux PGNJ aux 110 stations hydrométriques avec des séries NMaxA stationnaires.

## CHAPITRE 6. SOURCES D'ERREURS ET D'INCERTITUDES

Plusieurs sources d'incertitude sont à considérer lors de la construction des courbes de tarage (CT) et de l'évaluation des débits à partir de cette courbe. Ces sources d'incertitudes proviennent en premier lieu des mesures du niveau d'eau lors d'un jaugeage et de la mesure du débit correspondant. La Section 6.1 aborde cette question et reprend des éléments du Chapitre 5 du rapport d'étape (Mailhot *et al.*, 2021) où une revue de littérature exhaustive sur les incertitudes associées à la mesure du niveau d'eau et aux débits mesurés est présentée. Pour tous renseignements supplémentaires, le lecteur est invité de consulter ce chapitre.

Ces incertitudes peuvent également provenir de la procédure utilisée pour la construction des CT (choix des jaugeages, nombre de jaugeages, etc., Section 6.2) Des modifications géomorphologiques de la section de contrôle de la station hydrométrique peuvent aussi entraîner des changements dans la CT et être une source d'incertitude importante (Section 6.3). Finalement, les changements temporaires ou saisonniers du régime hydrique d'une station en raison par exemple de la croissance des végétaux peuvent affecter la CT (Section 6.4).

Afin de clarifier la terminologie, il convient de distinguer dans un premier temps les termes erreurs et incertitudes. L'erreur peut être définie comme la différence entre la valeur mesurée et la 'vraie' valeur de la grandeur que l'on cherche à déterminer (Le Coz *et al.* 2011). Puisque la 'vraie' valeur n'est jamais connue, l'erreur est également inconnue.

L'incertitude est la représentation statistique de l'erreur commise. Ainsi si on ne connaît pas l'erreur commise lors d'une mesure donnée, on peut estimer la distribution des erreurs, donc l'incertitude, en reproduisant un grand nombre de fois la mesure en question. On représente généralement l'incertitude en précisant l'intervalle autour de la valeur moyenne dans lequel on estime que la valeur a une probabilité donnée de se trouver. L'intervalle 95% est souvent utilisé et correspond à l'intervalle où l'on estime que l'on a une probabilité de 95% de trouver la 'vraie' valeur (Le Coz *et al.* 2011).

On distingue deux types d'erreurs : 1) les erreurs systématiques (par exemple une erreur provenant d'une calibration erronée de l'appareil d'enregistrement des niveaux d'eau) et 2) les erreurs aléatoires (par exemple, résolution de la lecture, fluctuations naturelles de la grandeur à mesurer). La différence majeure entre ces deux catégories est que pour le premier type d'erreurs, un plus grand nombre de mesures ne permettra pas de réduire l'incertitudes alors que le second type d'erreurs peut être estimé et réduit en prenant plusieurs mesures (Herschy, 2002; Le Coz *et al.*, 2011).

### 6.1 Incertitudes sur les jaugeages

Lors du processus de jaugeage, la mesure du niveau d'eau et l'estimation des débits sont ponctués d'erreurs qui seront nécessairement transposées à la CT. En ce qui concerne l'estimation du niveau d'eau, une incertitude de  $\pm 50$  mm est réaliste (Lang *et al.* 2010), mais

des valeurs situées entre  $\pm 1$  mm à  $\pm 100$  mm selon le type d'instruments de mesure utilisé et les conditions d'écoulement sont également possibles (McMahon et Peel, 2019)

En ce qui concerne plus spécifiquement la mesure de débit, le Tableau IIb de McMillan *et al.* (2012) rapporte une liste de valeurs proposées dans la littérature. Ces valeurs couvrent tout un éventail de techniques de mesure des débits (p. ex. moulinet à godet ou dilution), de méthodes d'estimation des incertitudes (p. ex. incertitude globale basée sur plusieurs incertitudes associées aux différentes étapes d'un jaugeage ou basée sur l'avis d'expert) ou encore dans des conditions variées d'écoulement (faibles vitesse ou conditions de jaugeages défavorables). Ce tableau montre que ces incertitudes sont très variables allant de 2 % jusqu'à 40 % pour des jaugeages réalisés lors de faibles vitesses d'écoulement. Toutefois, dans l'ensemble ces valeurs se situent entre 4 et 17%. Ces valeurs concordent notamment avec les valeurs de Le Coz *et al.* (2011) de l'ordre de 7-15% et de Le Coz *et al.* (2014) de 5% avec ADCP et 7% avec courantomètre de type moulinet à godet.

## 6.2 Incertitudes sur les courbes de tarage

La Section 6.1 discute des incertitudes associées aux jaugeages. Ces incertitudes affectent nécessairement les CT, toutefois d'autres facteurs peuvent venir augmenter les incertitudes associées aux CT, p. ex. les jaugeages retenus, le nombre de jaugeage ou encore l'adéquation de la régression hydraulique à représenter la relation h-Q. Ce dernier élément fait notamment référence aux conditions hydrauliques prévalant lors des jaugeages qui doivent répondre aux conditions d'application de ce type d'équation. À ce titre, McMillan *et al.* (2012) dresse un bilan des incertitudes totales sur les CT. Globalement, les valeurs suggérées sont plus élevées pour les faibles débits et surtout très variables (20 à 90%). Pour les débits moyens, les incertitudes sont de l'ordre de 10 à 20% et de 15 à 20% pour les plus forts débits. Dans la zone d'extrapolation des CT, ces incertitudes peuvent être encore plus élevées (Le Coz *et al.*, 2014). Très peu d'étude se sont toutefois attardées aux incertitudes pour l'estimation des débits en-deçà du plus petit niveau jaugé ou au-delà du plus grand niveau jaugé (voir Lang *et al.*, 2010, Mansanarez *et al.* 2019b, McMahon et Pell, 2019).

Encore aujourd'hui, les incertitudes ne sont généralement pas prises en compte dans les séries de débits historiques disponibles aux stations hydrométriques (Hersch, 2002; Hamilton et Moore, 2012) et c'est le cas notamment au Québec. Toutefois, au cours des dernières années, plusieurs études et projets visant à quantifier les incertitudes et à les appliquer sur les CT ont été réalisés (par exemple : Le Coz *et al.* 2014; Coxon *et al.* 2015; Kiang *et al.* 2018; McMahon et Peel, 2019). L'estimation des incertitudes sur les CT et leur intégration dans les différents processus décisionnels, par exemple pour la cartographie des zones inondables, permettraient de mieux évaluer le risque et mènerait à des décisions vraisemblablement plus éclairées (McMillan *et al.* 2017).

Le Chapitre 8 de ce rapport et plus précisément les Sections 8.1 à 8.3 portent sur l'estimation des incertitudes dans la zone d'interpolation des CT des SH à l'étude. La Section 8.4 du Chapitre 8 présente une analyse qualitative des incertitudes pour les parties extrapolées des

CT et enfin des travaux exploratoires visant une estimation quantitative des incertitudes ou de la diminution du niveau de confiance en la CT dans la zone d'extrapolation associée aux plus forts débits.

### **6.3 Changement géomorphologique**

Des modifications géomorphologiques de la section de contrôle d'une SH, p. ex. après une crue, peuvent entraîner des changements importants et définitifs dans la CT (Le Coz *et al.*, 2014). Toutefois, l'estimation des incertitudes associées à ces modifications n'a été que très peu abordée dans la littérature (Mansanarez *et al.*, 2019a, voir à ce sujet McMillan et Westerberg, 2015). Des méthodes visant à déterminer si les conditions d'écoulement lors des différents jaugeages respectent les conditions d'écoulement permettant l'utilisation d'une relation h-Q unique et stable dans le temps sont davantage utilisées. Ainsi, plusieurs méthodes identifiant l'occurrence de telles modifications et les périodes stables quant à la relation h-Q et permettant d'ajuster les CT en conséquent ont été analysées (McMillan *et al.*, 2010; Morlot *et al.*, 2014, Mansanarez et al. 2019a).

Dans le cadre de ce projet, aucune analyse n'a été réalisée visant à estimer les incertitudes reliées à des changements géomorphologiques. Une approche de segmentation temporelle des séries de jaugeages et d'ajustement de CT pour les périodes stables a été retenue. Cette approche est décrite à la Section 7.2.1.

### **6.4 Changements saisonniers à la section de contrôle**

Les CT peuvent également être affectées par des changements temporaires, saisonniers ou également appelés transitoires de la section de contrôle en raison de la croissance des plantes et arbustes sur les rives et les plantes aquatiques au cours de l'été (WMO, 2010a; Le Coz *et al.*, 2014). Lorsque la hauteur des végétaux et leur densité augmentent, la vitesse d'écoulement de l'eau diminue et la résistance dans le chenal augmente (Green, 2005).

Dans le cadre de projet, ces changements saisonniers n'ont pas été prise en compte dans l'évaluation des incertitudes en lien avec les CT. D'ailleurs, une seule étude en cette matière a été identifiée (Perret *et al.*, 2021). Selon ces mêmes auteurs, aucun modèle de construction de CT tient compte de la végétation aquatiques dans la littérature.

Considérant qu'aucun modèle d'incertitudes n'est actuellement appliqué aux CT des SH à l'étude (voir Section 6.2), il va de soi que la priorité consiste à développer un tel modèle tenant compte des incertitudes générales liées aux CT (voir Chapitre 8). Une fois cette étape réalisée et appliquée par les intervenants de la DEH, il pourrait être judicieux de se pencher sur cet enjeu associé aux changements transitoires de la relation h-Q des CT en lien avec la croissance des végétaux. Des analyses en ce sens pourraient être réalisées en suivant notamment ces quelques étapes :

1. Identification des SH où la croissance des végétaux pourrait avoir une incidence sur la CT (faible courant, relief peu accentué, substrat favorable à l'ancrage, observation des techniciens réalisant les jaugeages, etc.).
2. Sélection de quelques SH pour des analyses plus approfondies sur la relation entre les débits et la croissance des végétaux aquatiques;
  - a. SH associées à des cours d'eau de taille différente;
  - b. SH situées dans un rayon permettant de jaugeages fréquents tout en minimisant les déplacements.
3. Réalisation de jaugeages fréquents (p. ex. sur une base hebdomadaire) tout au cours de la période d'écoulement en eau libre pour les SH retenues à l'étape précédente.
4. Analyses de l'impact de la croissance des végétaux sur les débits et les CT.
5. Développement d'un modèle de construction de CT tenant compte de l'impact de la présence des végétaux;
6. Application du modèle sur les SH identifiées à la première étape.

Il est important de spécifier qu'il ne s'agit pas ici d'une liste exhaustive des étapes visant l'application de modèle de construction de CT intégrant l'impact de la croissance des végétaux.

## CHAPITRE 7. CONSTRUCTION DES COURBES DE TARAGE

Le présent chapitre détaille la procédure proposée et utilisée pour construire les courbes de tarage (CT) aux différentes stations hydrométriques (SH). Dans un premier temps, la régression hydraulique (RH) utilisée pour représenter les relations hauteur-débit (h-Q) et la méthode utilisée pour en estimer les paramètres est décrite (Section 7.1). Deux cas particuliers sont ensuite considérés lors de la sélection des jaugeages à utiliser pour construire une CT (Section 7.2). Le premier survient lorsque des modifications hydrauliques ou géomorphologiques font en sorte que la relation h-Q évolue avec le temps et que des CT distinctes doivent être développées selon la période considérée (Section 7.2.1). Le deuxième cas correspond à la situation où la relation h-Q doit être représentée par plusieurs RH afin de tenir compte de modifications des conditions d'écoulement à la section de contrôle lorsque le niveau augmente (p. ex. passage en plaine inondables, changements importants aux profils de la section; Section 7.2.2). Ces approches sont appliquées à l'ensemble des jaugeages aux SH actuellement en opération. L'Annexe D regroupe l'ensemble des résultats relatifs à la sélection et à l'ajustement des CT aux différentes SH sous étude.

### 7.1 Régression hydraulique et ajustements des courbes de tarage

Les CT sont construites à partir des jaugeages disponibles. Désignons par  $(h_j, Q_j)_k$  avec  $j = 1, \dots, N$  les N couples de niveaux et de débits jaugés à la station k. La représentation mathématique de la relation h-Q qui permet d'estimer les débits correspondants à un niveau mesuré donné doit être précisée et sa capacité à bien représenter cette relation pour une gamme de niveaux donnés évaluée. Le lecteur est invité à consulter le Chapitre 4 et notamment la Section 4.5 pour une discussion des différentes représentations mathématiques possibles de la CT.

Dans le cas présent la relation h-Q est représentée par l'équation suivante, appelée dans ce qui suit RH :

$$Q(h) = a (h - b)^c \quad (7.1)$$

où Q est le débit ( $m^3/s$ ), h le niveau (m) et a, b et c trois paramètres à ajuster. La forme de cette équation s'inspire des équations généralement rencontrées pour décrire la relation h-Q pour des déversoirs et seuils de diverses formes ou encore l'équation d'un écoulement en régime uniforme permanent (p. ex. l'équation de Manning; Le Coz *et al.* 2013 ; Hrafnkelsson *et al.* 2022). Le Tableau 1 de Le Coz *et al.* (2014) présente les valeurs des paramètres a, b et c pour des sections régulières simples. Plusieurs RH peuvent être utilisées pour représenter le passage entre différents contrôles et ainsi représenter la relation h-Q pour l'ensemble des niveaux et débits jaugés. Des conditions de continuité doivent être appliquées pour assurer le raccordement des différents segments de la CT. La Section 7.2.2 aborde plus spécifiquement ce point.

Les écarts relatifs entre les débits estimés à l'aide de la CT à partir des niveaux jaugés,  $Q_{CT}(h_j)$ , et les débits jaugés correspondants,  $Q_j$ , donnent une représentation des

incertitudes sur les débits estimés à partir de la CT. On peut exprimer ces écarts sous la forme :

$$\Delta_j = \frac{Q_{CT}(h_j) - Q_j}{Q_j} \quad (7.2)$$

où  $\Delta_j$  est donc l'écart relatif pour le niveau jaugé  $j$  de la station  $k$  (l'indice  $k$  sur la station est omis afin de simplifier la notation). De même on peut définir :

$$B_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \delta_j \quad (7.3)$$

$$MARE_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\delta_j| \quad (7.4)$$

où  $B_k$  est le biais relatif moyen à la station  $k$  et  $MARE_k$  est la moyenne des valeurs absolues des écarts relatifs (MARE pour *Mean Absolute Relative Error*) à la station  $k$ .

Dans le cadre de ce projet, l'ajustement de la régression hydraulique et la détermination des paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$  ont été réalisés en minimisant le MARE. Cette dernière métrique a été préférée à la moyenne des écarts relatifs quadratiques moyens (MSRE pour *Mean Square Relative Error*) définie par :

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

ou encore à la moyenne des écarts quadratiques (MSE pour *Mean Square Error*) :

$$MSE_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [Q_{CT}(h_j) - Q_j]^2$$

Le choix de considérer les écarts relatifs s'explique par le fait que les débits jaugés couvrent une large gamme de valeurs, parfois plusieurs ordres de grandeurs, et que les incertitudes relatives sur les débits et les niveaux jaugés sont présumées relativement constantes en fonction des débits et niveaux jaugés (ce qui n'est certainement pas le cas des incertitudes absolues). Ainsi en utilisant les écarts relatifs, un écart de 10% sur un débit élevé aura le même poids dans la fonction MARE qu'un écart relatif de 10% sur un débit plus faible alors que l'écart absolu correspondant à l'écart relatif de 10% pour le grand débit sera beaucoup plus grand que l'écart absolu correspondant pour le petit débit.

Par ailleurs, le choix de considérer la moyenne des écarts absolus plutôt que la moyenne des écarts quadratiques se justifie par le fait que, dans le second cas, un poids plus grand est accordé aux écarts relatifs plus importants contrairement au MARE. Ainsi dans le cas du MSRE, l'ajustement cherchera à se rapprocher des jaugeages plus marginaux au détriment des autres jaugeages ce qui n'est pas souhaitable.

En conclusion, la fonction MARE a été minimisée pour estimer les paramètres de la RH. Un premier ajustement de la CT a été réalisé en utilisant tous les jaugeages valides à une

station. Cette CT est désignée dans ce qui suit par CT moyenne ou CTM. Une terminologie similaire est utilisée par Morlot *et al.* (2014) qui parle dans ce cas de *Mean Rating Curve* (MRC).

Un critère sur le nombre minimal de jaugeages nécessaires pour permettre l'ajustement d'une CT a finalement été imposé afin d'obtenir une CT représentative de la relation h-Q pour la gamme disponible de niveaux jaugés. Cette valeur a été arbitrairement fixée à six jaugeages. Toutes les 173 SH retenues ont au moins 6 jaugeages en eau libre. Une seule station compte exactement six jaugeages à savoir la station Richelieu (030430).

La RH comportant trois paramètres (a,b,c), théoriquement trois jaugeages seraient suffisants pour ajuster cette régression. Une attention particulière devra être accordée par les hydrologues de la DEH lorsque moins de six jaugeages sont disponibles, par exemple lors de la mise en opération d'une nouvelle SH. Ces CT devront être utilisées avec prudence jusqu'à ce qu'un plus grand nombre de jaugeages soit disponible et couvre une gamme plus importante de niveaux.

## **7.2 Approche retenue**

Deux situations particulières sont à considérer lorsque les jaugeages sont utilisés pour construire les CT : 1) la présence de possibles changements des conditions hydrauliques ou géomorphologiques au fil du temps et conséquemment une modification de la CT ; 2) l'existence de plusieurs régimes d'écoulement ou de contrôle selon le niveau qui font en sorte qu'une seule RH ne permet pas de représenter adéquatement la relation h-Q sur toute la gamme des niveaux jaugés. Ces deux cas de figures sont discutés plus en détails aux sections suivantes.

### **7.2.1 Partition temporelle des séries de jaugeages**

Plusieurs facteurs peuvent faire en sorte que les conditions hydrauliques et géomorphologiques changent au fil du temps et que la CT développée à partir des jaugeages réalisés pendant une certaine période devienne inadéquate et ne représente plus la relation h-Q des périodes ultérieures (voir les Sections 6.3 et 6.4 où cette question est également abordée). A titre d'exemple, une crue majeure pourra changer la morphologie de la section d'écoulement ou déplacer la section de contrôle, ou encore une sédimentation importante pourra modifier la section et les conditions d'écoulement. Une nouvelle CT doit alors être générée afin de représenter la relation h-Q et les conditions d'écoulement suite à cet événement.

Ces modifications peuvent survenir de façon progressive ou être soudaines. Elles se manifesteront par des écarts systématiques des nouveaux jaugeages par rapport à la CT active (p. ex. tous les nouveaux jaugeages seront systématiquement au-dessus ou en-dessous de la CT active). Dans le cas général, plusieurs jaugeages seront nécessaires afin de confirmer une possible modification de la CT à moins que les observations sur le terrain indiquent clairement que les conditions hydrauliques ou géomorphologiques ont changé et soulèvent de très sérieux doutes quant à la représentativité de la CT active. Le

jugement de l'hydrologue est important dans ce cas et il devra mettre en balance les observations sur le terrain et les écarts des nouveaux jaugeages par rapport à la CT active afin de déterminer s'il est nécessaire de modifier ou de développer une nouvelle CT.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à cette question et ont proposé diverses procédures afin d'identifier des modifications aux CT et regrouper les jaugeages à considérer pour construire la CT à utiliser pour une période donnée (voir Section 6.3). A titre d'exemple Morlot *et al.* (2014) ont développé une telle approche. Une hypothèse importante de ces auteurs est que les jaugeages à considérer pour la construction d'une CT valide sur une période donnée n'ont pas à être contigües dans le temps. Cette hypothèse implique que les modifications géomorphologiques ou hydrauliques peuvent affecter certaines parties de la CT associées à certaines gammes de niveaux sans affecter d'autres parties de la courbe (p. ex. modifier la partie de la courbe associée aux petits débits sans changer celles associées aux plus grands débits). Une telle hypothèse est vraisemblable mais exige pour être mise en place de formuler plusieurs autres hypothèses sur les différentes sources d'incertitudes en jeu. Bien qu'à priori intéressante, l'approche proposée par Morlot *et al.* (2014) demeure toutefois relativement complexe surtout dans une optique d'application à grande échelle.

Dans un tel contexte, une approche beaucoup plus simple a été retenue dans le cadre de ce projet. Elle repose sur l'hypothèse qu'une modification à une CT se manifestera souvent par une rupture ou une tendance dans la série chronologique des écarts relatifs par rapport à la CTM. Afin d'automatiser la détection de ces ruptures, le test de Pettitt (Pettitt 1979) est appliqué à la série chronologique des écarts relatifs par rapport à la CTM. La Figure 7.1 présente l'exemple de la station Du Loup (022513) où les écarts relatifs entre la CTM et les jaugeages ont été ordonnés chronologiquement. La rupture dans ce cas est évidente et survient en août 1976. La p-value du test de Pettitt est dans ce cas très inférieure à 0.001. Cet exemple montre que deux CT doivent être considérées, une pour la période antérieure à août 1976 et une autre pour la période postérieure à cette même date. La CT à utiliser pour estimer les débits dépendra du moment où le niveau est mesuré.

Certaines règles spécifiques ont toutefois été ajoutées lors de l'application du test de Pettitt :

- Le test n'est appliqué que si la série compte 12 jaugeages ou plus. Cette règle vise à éviter d'appliquer le test à des séries trop courtes pour lesquelles la puissance du test diminue.
- La rupture détectée ne doit pas se trouver dans les six premières ou les six derniers jaugeages de la série temporelle. Le test de Pettitt est en effet plus sensible à des ruptures survenant en début ou en fin de série.
- Le seuil de significativité utilisé est de 5%.

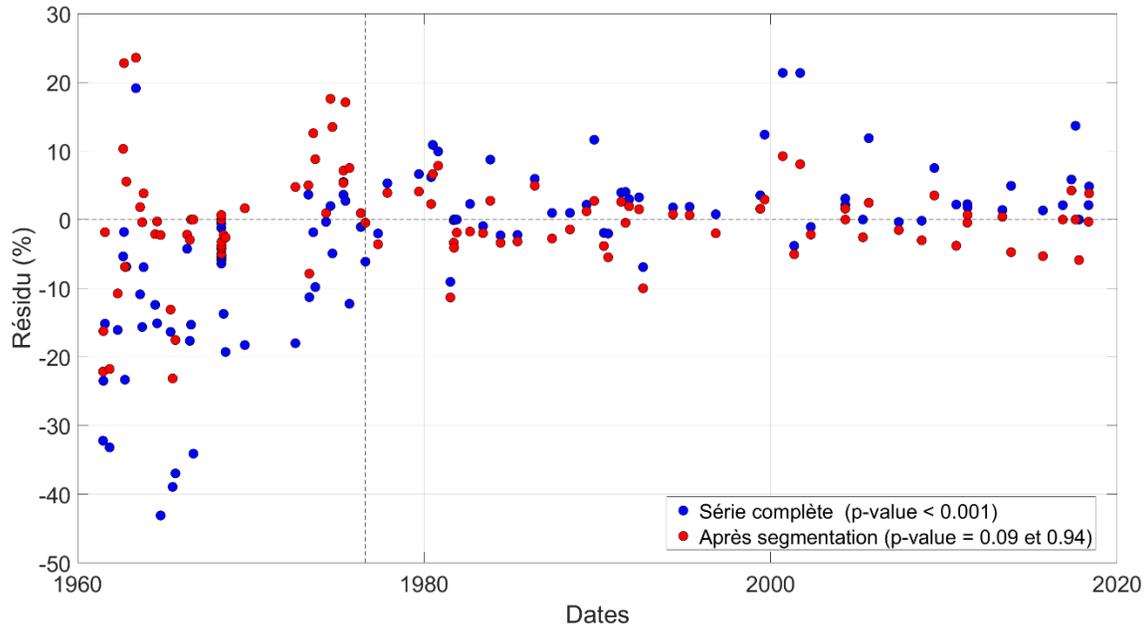


Figure 7.1 - Exemple de la série des écarts relatifs entre débits jaugés et estimés à partir de la CTM à la station Du Loup (022513) avant (points bleus) et après (points rouges) la segmentation en deux RH. La date de la rupture est identifiée par le trait vertical en tiret. La p-value du test de Pettitt est très inférieure à 0.001 dans ce cas.

Ces critères sont, dans une large mesure, arbitraires mais nécessaires dans un contexte d'application à grande échelle. La Figure 7.2 présente le schéma global décrivant la procédure utilisée pour l'application du test de Pettitt et la partition temporelle des jaugeages en diverses périodes où l'on présume que les conditions hydrauliques et géomorphologiques sont stables. Cette procédure est nécessaire puisque le test de Pettitt ne permet de détecter qu'un seul point de rupture. La Figure 7.2 montre que le test de Pettitt est appliqué itérativement aux séquences tant que les critères énoncés plus haut sont respectés. Une fois la partition acceptée, les CTM correspondant à ces sous-séquences sont calculées et utilisées pour calculer les nouveaux écarts relatifs. Les critères d'application du test de Pettitt sont ensuite vérifiés et le test appliqué, le cas échéant, à chaque sous-séquence.

La série initiale des jaugeages est ainsi partitionnée en plusieurs séquences de jaugeages consécutifs de six jaugeages ou plus. Au terme de chaque application de cette procédure, chaque séquence de jaugeages consécutifs sera classée dans l'une ou l'autre des catégories suivantes (Figure 7.2) :

- A1 : Séquences avec moins de 12 jaugeages (le test de Pettitt n'est pas appliqué)
- A2 : Séquences avec plus de 12 jaugeages et aucune rupture
- A3 : Séquences avec plus de 12 jaugeages et une rupture potentielle dans les six premiers ou les six derniers jaugeages de la séquence
- A4 : Séquences avec plus de 12 jaugeages et une partition en deux séquences.

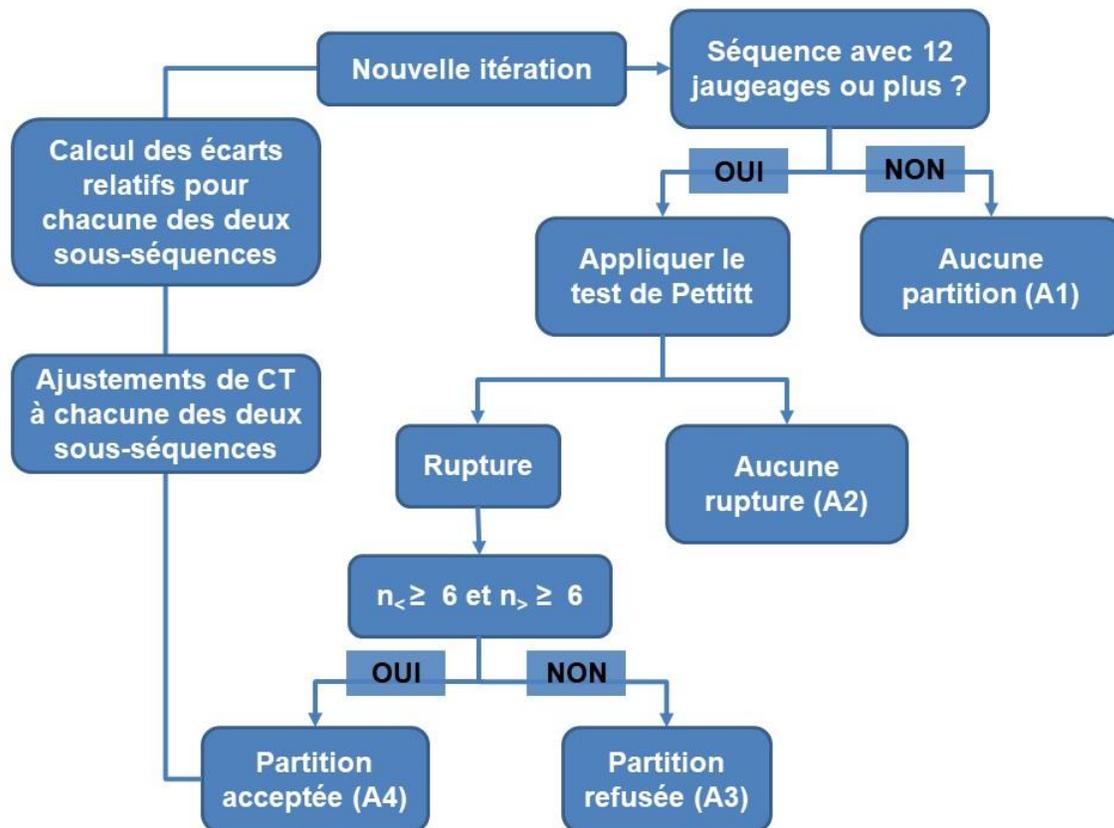


Figure 7.2 - Schéma décrivant la procédure utilisée pour la partition temporelle des séries des écarts relatifs à partir du test de Pettitt ( $n_{<}$  et  $n_{>}$  réfèrent respectivement aux nombres de jaugages des séquences avant et après la date de rupture).

Une première application de cette procédure utilisant tous les jaugages disponibles (rappelons que seules les stations avec six jaugages ou plus sont considérées) a permis de classer les séquences de chaque station dans l'une des catégories précédentes. Les itérations suivantes ne s'appliqueront qu'aux séquences de catégorie A4.

Un point important à souligner concerne la partition temporelle des séries à certaines stations. L'ajustement de la RH aux jaugages peut conduire dans certains cas à de légères variations des valeurs des paramètres de la RH attribuables à la précision de l'optimisateur (environ  $10^{-4}$  pour chaque paramètre) et ce même si la qualité de l'ajustement est très similaire. Or, ces petites variations peuvent résulter lors de l'application du test de Pettitt en des dates de ruptures très différentes. Pour les stations avec plusieurs ruptures, le fait de changer une date de rupture peut entraîner une cascade de changements dans la détection des dates de rupture suivantes résultant en des séquences très différentes. Afin d'atténuer cet effet et augmenter la robustesse des ajustements des RH, les ajustements de la RH ont été répétés 1 000 fois en utilisant des valeurs initiales des paramètres générées aléatoirement. Au final, le meilleur calage parmi les 1 000 optimisations est retenu.

Tableau 7.1 - Nombre de stations avec un nombre donné de séquences et répartition des séquences selon les catégories A1, A2 et A3 (nb A1 + nb A2 + nb A3 = nb station x nb séquences).

Nombre de séquences	Nombre de stations	A1	A2	A3
1	97	3	94	0
2	33	7	59	0
3	19	6	50	1
4	12	14	34	0
5	6	7	23	0
6	4	10	13	1
7	2	4	10	0
TOTAL	173	51	283	2

Le Tableau 7.1 présente le nombre de SH selon le nombre de séquences après partition des jaugeages et le nombre total de séquences de catégories A1, A2 et A3 dans chaque cas. Ainsi ce tableau montre que 97 stations (56.1%) ne comportent qu'une séquence, c.-à-d. que dans ces cas, on conclut que tous les jaugeages peuvent être utilisés pour construire la CT. De ce nombre, trois stations n'ont pas assez de jaugeages pour que le test de rupture soit appliqué (catégorie A1) et aucune station ne présente une rupture au début ou à la fin de la période jaugée (catégorie A3). Ces cas devraient éventuellement faire l'objet d'une attention plus particulière.

Le Tableau 7.1 montre aussi que 33 stations (19.1%) présentent une seule rupture et donc que la séquence des jaugeages peut être partitionnée en deux périodes distinctes. Des 66 séquences résultantes, 59 ne présentent pas de rupture (catégorie A2), sept contiennent 12 jaugeages ou moins (catégorie A1) et aucune ne présente de rupture en début ou en fin de séquence (catégorie A3).

Les stations avec trois séquences sont au nombre de 19 (11.0% ; Tableau 7.2) alors que celles avec quatre séquences ou plus sont au nombre de 24 (13.9% ; Tableau 7.3). Les stations Des Hurons (03415) et Croche (050135) comptent le plus grand nombre de séquences à savoir sept.

Il convient de noter que seulement deux séquences sont classées dans la catégorie A3, une associée à une station avec trois séquences et une autre associée à une station avec six séquences. Toutes les autres séquences qui ne sont pas de catégorie A2 (aucune rupture) appartiennent à la catégorie A1 (séquences avec 12 jaugeages ou moins).

Les Tableaux 7.2 et 7.3 contiennent également des informations sur les nombres de jaugeages totaux et de chaque séquence de même que sur les valeurs des MARE totaux et par séquence aux SH comportant trois séquences et quatre séquences ou plus respectivement. On constate, à quelques exceptions près, que les MARE des séquences après partition diminuent par rapport à la valeur initiale.

Tableau 7.2 - Liste des 19 stations (en ordre croissant de numéro de station) avec trois séquences après application du test de Pettitt. Les séquences avec moins de 12 jaugeages sont indiquées en gras (colonne 'Nombre de jaugeages par séquence'). Les séquences avec un MARE plus grand que le MARE total sont indiquées en gras (colonne 'MARE (%) total et de chaque séquence').

Numéro de la station	Nom de la station	Nombre de jaugeages	Nombre de jaugeages par séquence	MARE (%) total et de chaque séquence
011003	Casapédia	82	[29;19;34]	3.5 [2.8; 2.1; 3.1]
021702	Blanche	78	[40;19;19]	6.7 [5.5; 4.8; 5.8]
022601	Kamouraska	30	[13; <b>7</b> ;10]	10.5 [5.4; 3.6; 5.9]
023402	Chaudière	82	[29;36;17]	7.4 [ <b>7.6</b> ; 6.5; 4.1]
030220	Massawippi	88	[44;15;29]	9.2 [3.3; 7.6; <b>11.8</b> ]
030278	Saint-François	53	[19;12;22]	6.8 [5.5; 3.7; 2.5]
030302	Yamaska	85	[37;30;18]	8.0 [8.0; 4.8; 2.9]
030314	Yamaska Sud-Est	43	[12;12;19]	5.7 [3.0; 1.4; <b>7.2</b> ]
040110	Du Nord	68	[15; <b>9</b> ;44]	4.7 [2.0; 3.8; 3.0]
040204	Rouge	106	[18;21;67]	5.1 [ <b>5.3</b> ; 2.0; 4.1]
041902	Dumoine	56	[35; <b>7</b> ;14]	3.4 [1.7; 2.9; 1.8]
050119	Matawin	79	[38;16;25]	4.6 [4.6; 2.2; 3.6]
050409	Bras du Nord	87	[33;17;37]	5.2 [3.9; 1.5; <b>5.8</b> ]
050812	Aux Pommes	98	[34;29;35]	18.3 [5.0; 7.6; 5.1]
050916	Des Hurons	56	[20; <b>11</b> ;25]	15.3 [4.7; 11.5; 8.0]
052235	Saint-Pierre	67	[16;32;19]	14.3 [4.4; <b>16.7</b> ; 6.7]
054001	Beauport	67	[13;13;41]	10.6 [6.1; 5.8; 6.7]
061307	La Belle Rivière	63	[22;18;23]	6.8 [4.2; 3.6; <b>7.5</b> ]
081101	Pontax	36	[16; <b>6</b> ;14]	4.9 [4.8; 1.2; 2.1]

Tableau 7.3 - Liste des 24 stations (en ordre croissant de numéro de station) avec quatre séquences ou plus après application du test de Pettitt. Les séquences avec moins de 12 jaugeages sont indiquées en gras (colonne 'Nombre de jaugeages par séquence'). Les séquences avec un MARE plus grand que le MARE total sont indiquées en gras (colonne 'MARE (%) total et de chaque séquence').

Numéro de la station	Nom de la station	Nombre de séquences	Nombre de jaugeages	Nombre de jaugeages par séquence	MARE (%) total et de chaque séquence
010802	Bonaventure	6	107	[29; <b>10</b> ;24;17;13;14]	13.8 [3.9; 1.0; 8.0; 5.6; 7.5; 10.3]
021407	Sainte-Anne	5	120	[27;14;17;46;16]	15.9 [3.3; 1.7; 4.5; <b>16.7</b> ; 5.8]
021601	Matane	4	81	[44;12; <b>10</b> ;15]	7.4 [4.5; 3.1; 4.2; 5.1]
023002	Boyer Sud	4	104	[34;31;16;23]	17.2 [5.5; 9.4; 5.7; 12.1]
030103	Nicolet	4	93	[40; <b>7</b> ;21;25]	10.6 [5.9; 4.2; 6.9; 5.0]
030215	Coaticook	4	79	[41;15; <b>7</b> ;16]	6.0 [3.9; 4.7; 1.1; 2.8]
030234	Eaton	4	67	[31; 13;12; <b>11</b> ]	7.2 [6.1; 4.5; 3.5; 3.0]
030282	Au Saumon	4	85	[41; <b>11</b> ;9;24]	9.6 [6.9; 0.8; 6.2; 5.7]
030309	Yamaska Nord	4	80	[ <b>11</b> ;14;13;42]	14.7 [5.7; 4.4; 3.7; 5.4]
030340	Yamaska Nord	6	88	[14;31;12; <b>10</b> ;9;12]	5.9 [2.5; 6.6; 2.1; 1.9; 1.0; 3.8]
030415	Des Hurons	7	118	[17;14;20; <b>11</b> ;13;27;16]	16.9 [6.4; 6.1; 6.4; 4.7; 5.3; 4.8; 5.2]
030905	Châteauguay	5	95	[46; <b>10</b> ; <b>11</b> ;7;21]	9.8 [8.4; 2.1; 7.0; 2.5; 2.7]
030907	Des Anglais	5	86	[36; <b>9</b> ; <b>9</b> ;15;17]	12.3 [ <b>17.8</b> ; 3.8; 2.7; 4.5; 5.3]
040129	Doncaster	6	81	[22; <b>8</b> ; <b>11</b> ;15; <b>8</b> ;17]	9.6 [5.6; 3.9; 3.3; 1.6; 3.8; 4.5]
050135	Croche	7	109	[ <b>7</b> ; <b>8</b> ; <b>6</b> ;14;14;18;42]	7.8 [3,2; 2.9; 2.2; 5.4; 3.6; 5.3; 5.3]
050904	Saint-Charles	5	108	[29;24; <b>8</b> ;22;25]	15.3 [7.7; 14.4; 2.3; 4.1; 6.5]
050915	Nelson	4	78	[41;13; <b>9</b> ;15]	15.8 [ <b>18.0</b> ; 2.9; 12.2; 5.6]
052212	Ouareau	4	95	[17;20;31;27]	4.6 [3.0; 4.5; 5.0; 3.0]
052601	Maskinongé	4	91	[46;15; <b>9</b> ;21]	7.6 [ <b>7.7</b> ; 2.4; 3.5; 6.5;]
061022	Pikauba	5	85	[23;27; <b>9</b> ;13;13]	11.1 [3.7; 5.3; 3.6; 3.2; 3.1]
061801	Petite rivière Péribonka	4	65	[30; <b>9</b> ;13;13]	4.2 [2.5; 2.0; 3.1; 1.1]
061909	Aux Saumons	6	76	[23; <b>10</b> ;14; <b>10</b> ; <b>8</b> ; <b>11</b> ]	15.7 [5.3; 2.8; 11.5; 1.7; 2.8; 1.4]
103605	Aux Mélézes	4	34	[ <b>11</b> ; <b>8</b> ; <b>8</b> ;7]	3.9 [1.3; 1.4; 2.4; 0.4]
120201	Dauphine	5	190	[38;27;28;44;53]	21.8 [10.1; 12.7; 8.2; 16.9; <b>27.7</b> ]

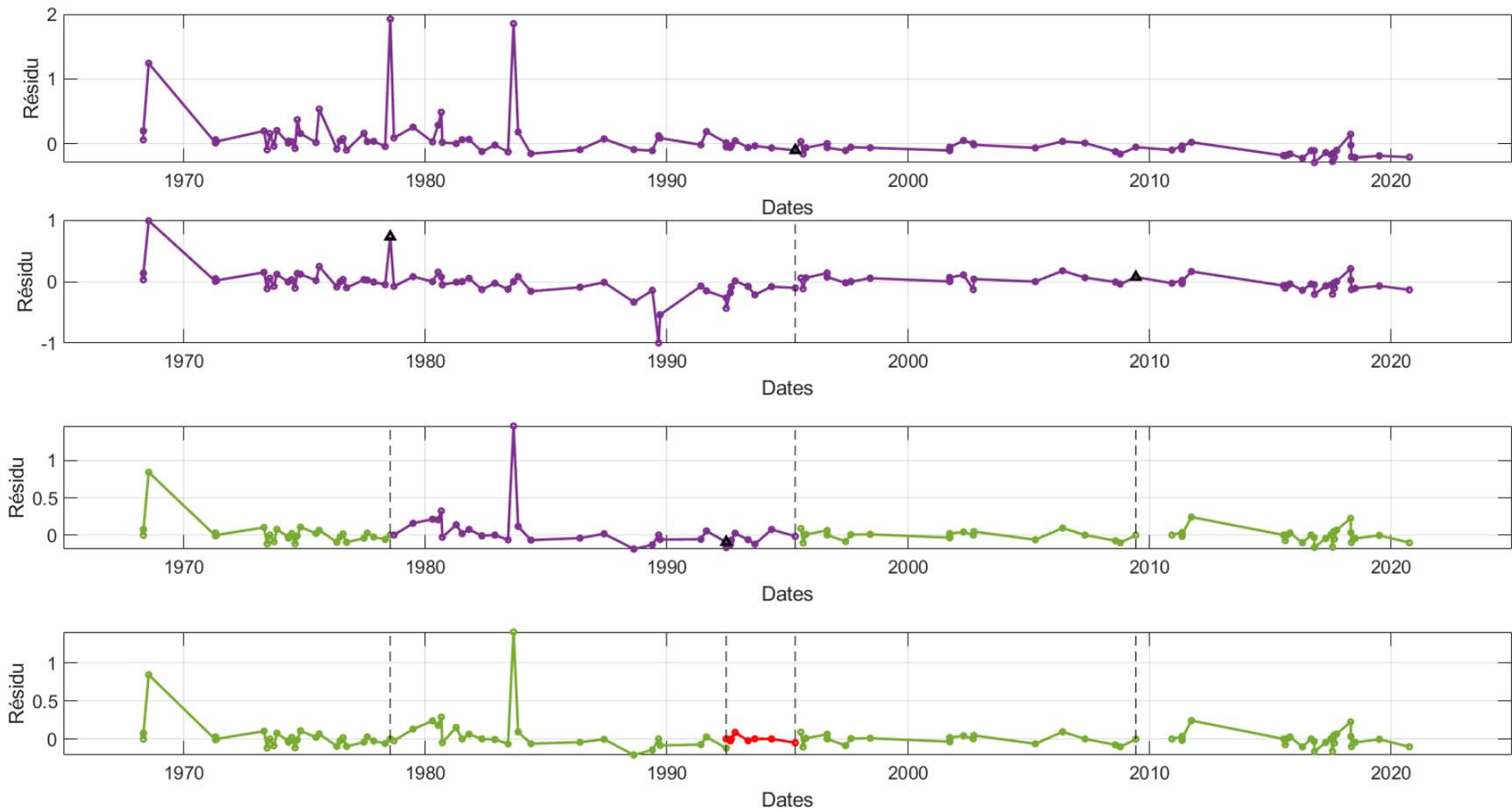


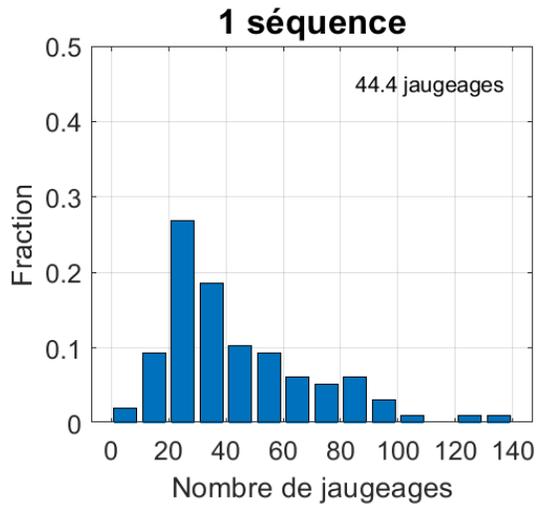
Figure 7.3 - Schéma montrant les étapes de la partition des jaugeages à la station St-Charles (050904) en appliquant la procédure présentée à la Figure 7.2. La séquence initiale des écarts relatifs est présentée sur le graphique du haut et les séquences successives après application du test de Pettitt sont présentées dans les graphiques des lignes suivantes, de haut en bas. Les triangles noirs correspondent aux points de rupture identifiés par le test. Les séquences en violet indiquent les séquences où une rupture est détectée, en vert les séquences sans rupture, et en rouge les séquences n'ayant pas assez de données pour appliquer le test de Pettitt. La partition finale en cinq séquences est présentée dans le graphique du bas.

La Figure 7.3 présente un exemple des étapes de la partition de la série temporelle des écarts relatifs à la station St-Charles (050904). On voit qu'au terme de l'application de cette procédure cinq séquences sont identifiées comportant respectivement 29, 24, 8, 22 et 25 jaugeages pour un total de 108 jaugeages. La valeur du MARE de la série complète est 15.3%. Une fois la partition complétée les valeurs des MARE de chaque séquence sont 7.7, 14.4, 2.3, 4.1, 6.5%. On voit que la partition de la série en plusieurs séquences diminue les valeurs des MARE.

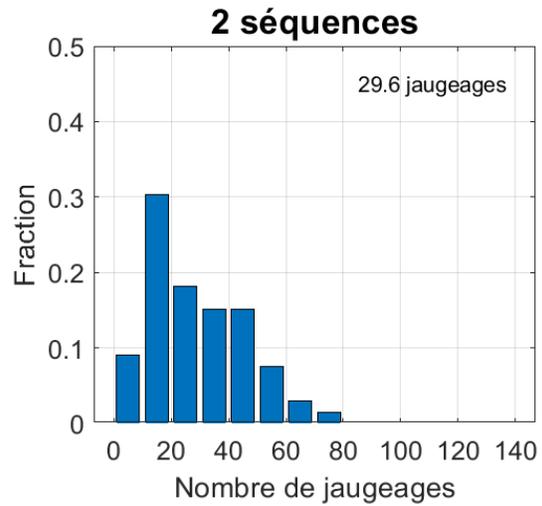
La Figure 7.4 présente les histogrammes du nombre de jaugeages par séquence pour les SH avec : 1) une séquence (97 stations); 2) deux séquences (33 stations); 3) trois séquences (19 stations); 4) quatre séquences ou plus (24 stations). On constate que le nombre moyen de jaugeages par séquence diminue lorsque le nombre de séquences augmente passant de 44.4 jaugeages/séquence pour les stations avec une séquence à 19.9 jaugeages/séquence pour les stations avec quatre séquences ou plus.

La Figure 7.5 présente les histogrammes des valeurs de MARE (en %) des séquences selon le nombre de séquences aux stations. On constate que les distributions varient légèrement selon le nombre de séquences. Une majorité de SH ont des MARE compris entre 2% et 8% et le MARE moyen varie peu selon le nombre de séquences. On constate aussi que, pour toutes les stations quel que soit le nombre de séquences, il subsiste un certain nombre de séquences avec des MARE plus élevés pouvant atteindre jusqu'à 28% pour une séquence à une station avec quatre séquences ou plus. Ces valeurs pourraient signifier que l'utilisation d'une RH est inadéquate pour l'ensemble des jaugeages de la séquence. Ce point sera abordé à la Section 7.2.2.

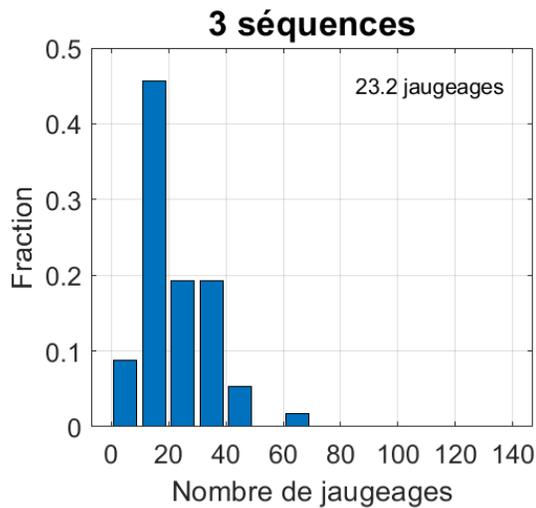
La Figure 7.6 présente enfin les histogrammes des valeurs de  $MARE_i/MARE_t$  où  $MARE_i$  est le MARE de la séquence  $i$  et  $MARE_t$  est le MARE de la séquence initiale avant partition selon les catégories du nombre de séquences finales définies précédemment. Une valeur de ce ratio inférieure à 1 signifie que la partition conduit à une réduction des valeurs moyennes des MARE des séquences par rapport au MARE de la séquence initiale. Cette figure indique que le rapport  $MARE_i/MARE_t$  diminue lorsque l'on partitionne les séquences initiales.



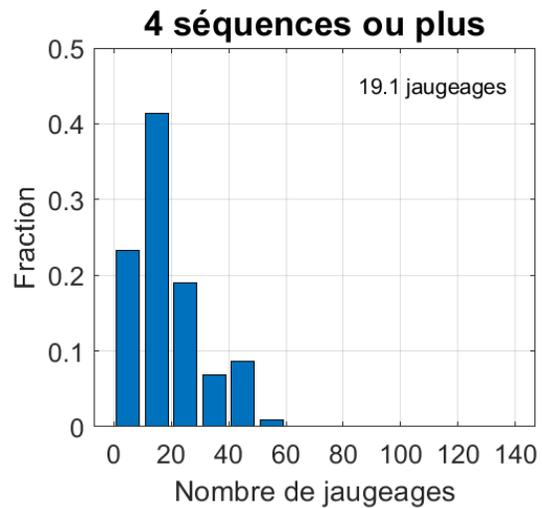
(a)



(b)

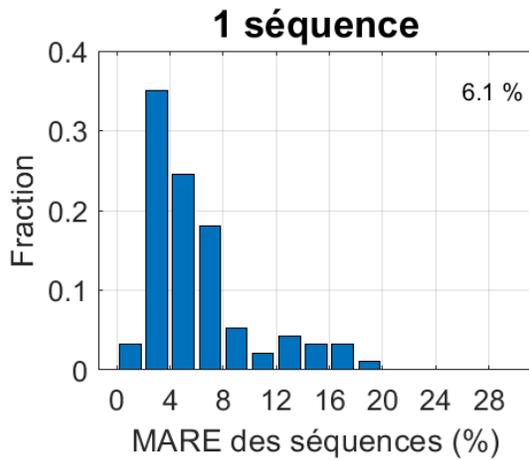


(c)

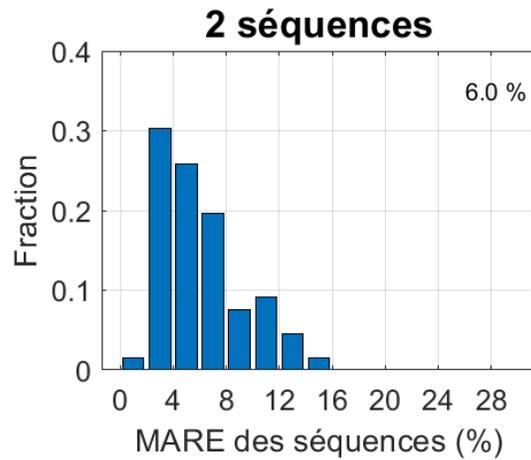


(d)

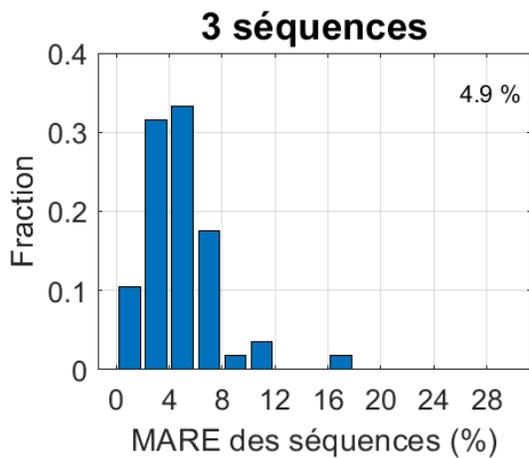
Figure 7.4 - Histogrammes du nombre de jaugeages par séquence pour les stations avec : a) 1 séquence (97 stations); b) 2 séquences (33 stations); c) 3 séquences (19 stations); d) 4 séquences ou plus (24 stations). Le nombre moyen de jaugeages par séquence est indiqué dans le coin supérieur droit de chacun des histogrammes.



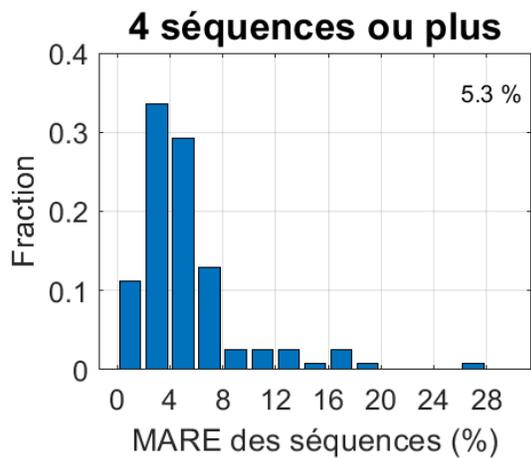
(a)



(b)

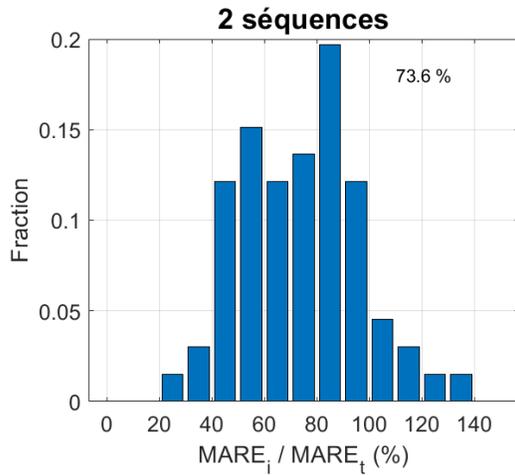


(c)

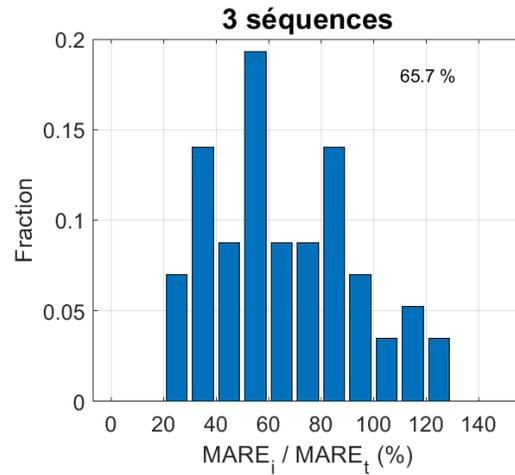


(d)

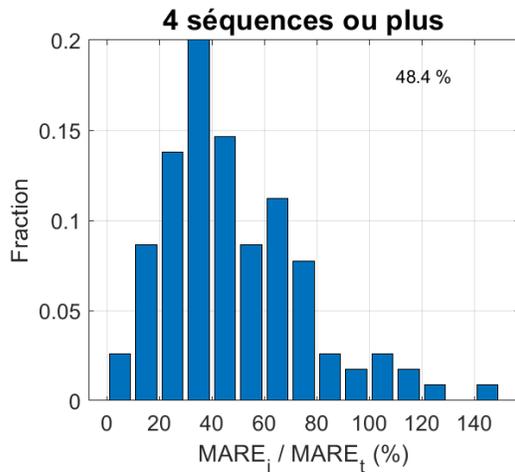
Figure 7.5 - Histogrammes des valeurs des MARE (en %) des séquences pour les stations avec : a) 1 séquence (97 stations); b) 2 séquences (33 stations); c) 3 séquences (19 stations); d) 4 séquences ou plus (24 stations). La valeur moyenne du MARE par séquence est indiquée dans le coin supérieur droit de chacun des histogrammes.



(a)



(b)



(c)

Figure 7.6 - Histogrammes des rapports  $MARE_i/MARE_t$  où  $MARE_i$  est le MARE de la séquence  $i$  et  $MARE_t$  est le MARE de la séquence initiale avant partition pour les stations avec : a) 2 séquences (33 stations); b) 3 séquences (19 stations); c) 4 séquences ou plus (24 stations). La valeur moyenne des rapports  $MARE_i/MARE_t$  est indiquée dans le coin supérieur droit de chacun des histogrammes.

## 7.2.2 Représentation de la relation h-Q par plusieurs relations hydrauliques

Le deuxième enjeu évoqué plus haut concerne les cas où plusieurs RH sont nécessaires pour représenter la relation h-Q pour l'ensemble des jaugeages d'une séquence donnée obtenue après partition temporelle de la série initiale des jaugeages à une station (voir Section 7.2.1). Dans ce cas, les jaugeages seront subdivisés en deux groupes, un premier regroupant les jaugeages  $(h_j, Q_j)_k$  où  $h_j < h'$  et un second les jaugeages où  $h_j \geq h'$ . Si l'on désigne par  $n_{<h'}$  le nombre de jaugeages où  $h_j < h'$  et par  $n_{>h'}$  le nombre de jaugeages où  $h_j \geq h'$  alors on a  $n_{<h'} + n_{>h'} = N$  avec  $N$  le nombre total de jaugeages de la séquence considérée.

La relation h-Q d'une séquence est représentée dans ce cas par les deux RH suivantes :

$$Q(h) = \begin{cases} Q_1(h) = a_1 (h - b_1)^{c_1} & h < h' \\ Q_2(h) = a_2 (h - b_2)^{c_2} & h \geq h' \end{cases}$$

où  $(a_1, b_1, c_1)$  et  $(a_2, b_2, c_2)$  sont les paramètres des RH de chacun des segments et  $h'$  est le niveau de transition entre les deux segments. La continuité de cette fonction est assurée en imposant  $Q_1(h = h') = Q_2(h = h')$ , à savoir :

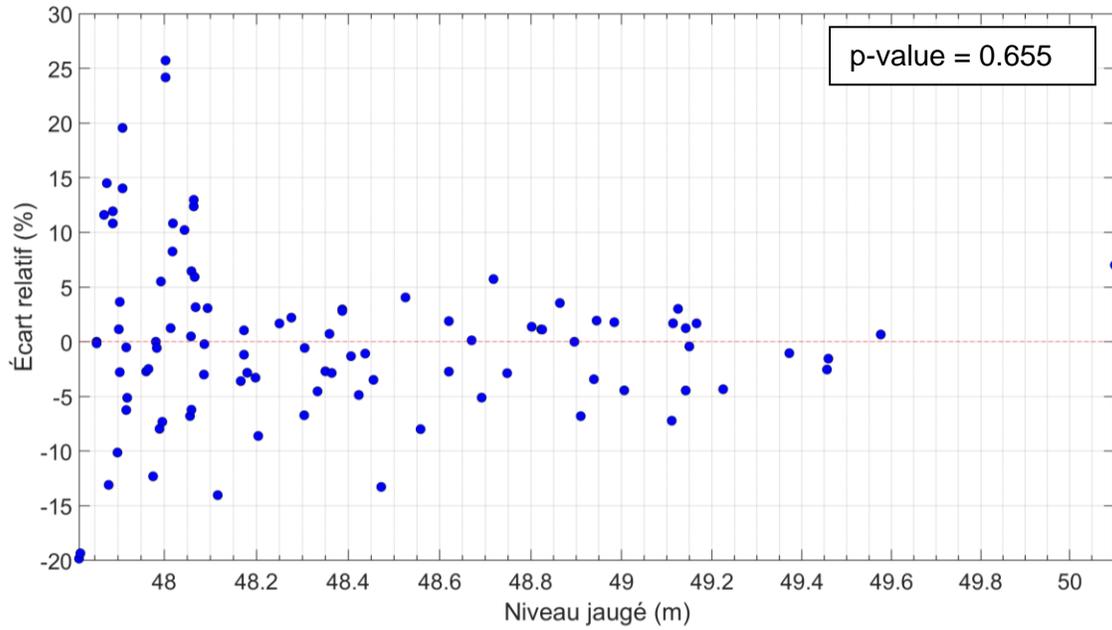
$$a_1 (h' - b_1)^{c_1} = a_2 (h' - b_2)^{c_2}$$

Cette approche peut être aisément généralisée à n segments. Dans le cas de deux segments, le nombre de paramètres à estimer est de six auquel s'ajoute le niveau de transition  $h'$ . Une contrainte (continuité de la fonction) est à considérer pour un total de six degrés de liberté. Les seuls cas considérés dans ce qui suit sont ceux à deux segments, c.-à-d. les cas où deux RH sont nécessaires pour représenter les jaugeages d'une séquence. Les cas où plus de deux RH sont nécessaires pour représenter les jaugeages d'une séquence sont pour le moment regroupés dans une catégorie spécifique.

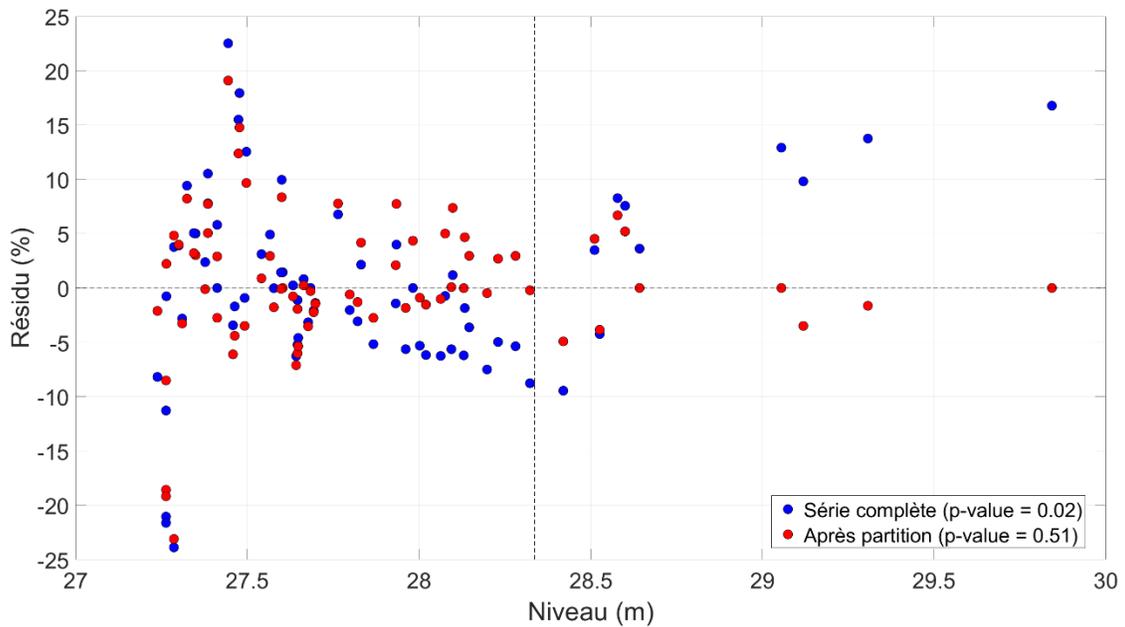
Comment déterminer si la CT doit être segmentée et représentée par plusieurs RH selon le niveau mesuré ? Plusieurs approches sont possibles. L'une d'elle consiste à utiliser des critères de type Akaike (AIC pour *Akaike Information Criteria*) ou encore le critère d'information bayésien (BIC pour *Bayesian Information Criteria*) et à comparer les valeurs des critères en question dans le cas avec un ou deux segments. Ces critères pondèrent la vraisemblance du modèle de régression considéré (ici à un ou deux segments) en fonction du nombre de paramètres de ces modèles (3 ou 6 paramètres), pénalisant davantage pour une vraisemblance donnée les modèles avec plus de paramètres. L'application de ce type d'approche implique toutefois de préciser la distribution décrivant le modèle d'erreurs.

L'approche utilisée pour déterminer si la CT doit être découpée en plusieurs segments repose sur l'idée que la série des écarts relatifs ordonnés en fonction du niveau jaugé sera aléatoire dans le cas où la RH décrit de façon adéquate la relation h-Q sur toute la gamme des niveaux jaugés. La Figure 7.7 montre deux exemples, un premier où la série des écarts relatifs est aléatoire et un autre où la série des écarts relatifs n'est pas aléatoire. Dans ce dernier cas, on voit que la CT a tendance à surestimer les faibles et les forts débits et à sous-estimer les débits intermédiaires.

Afin d'automatiser la procédure, un 'run test' (RT), aussi appelé *randomness test*, a été appliqué aux séries des écarts relatifs ordonnés en fonction du niveau afin de déterminer si ces séries sont aléatoires. Plusieurs RT existent. Le RT utilisé, aussi appelé *Wald-Wolfowitz runs test* (Wald et Wolfowitz 1940) est basé sur le nombre de séquences de valeurs consécutives qui sont inférieures ou supérieures à la moyenne de l'échantillon. Le niveau de significativité a été fixé à 5%.



(a)



(b)

Figure 7.7 - Exemple de séries des écarts relatifs en fonction du niveau jaugé : a) aléatoire (station Petite rivière Cascapédia, 010902) ; b) non-aléatoire (station Des Trois-Pistoles, 022301) avant (points bleus) et après (points rouges) la partition en deux relations hydrauliques.

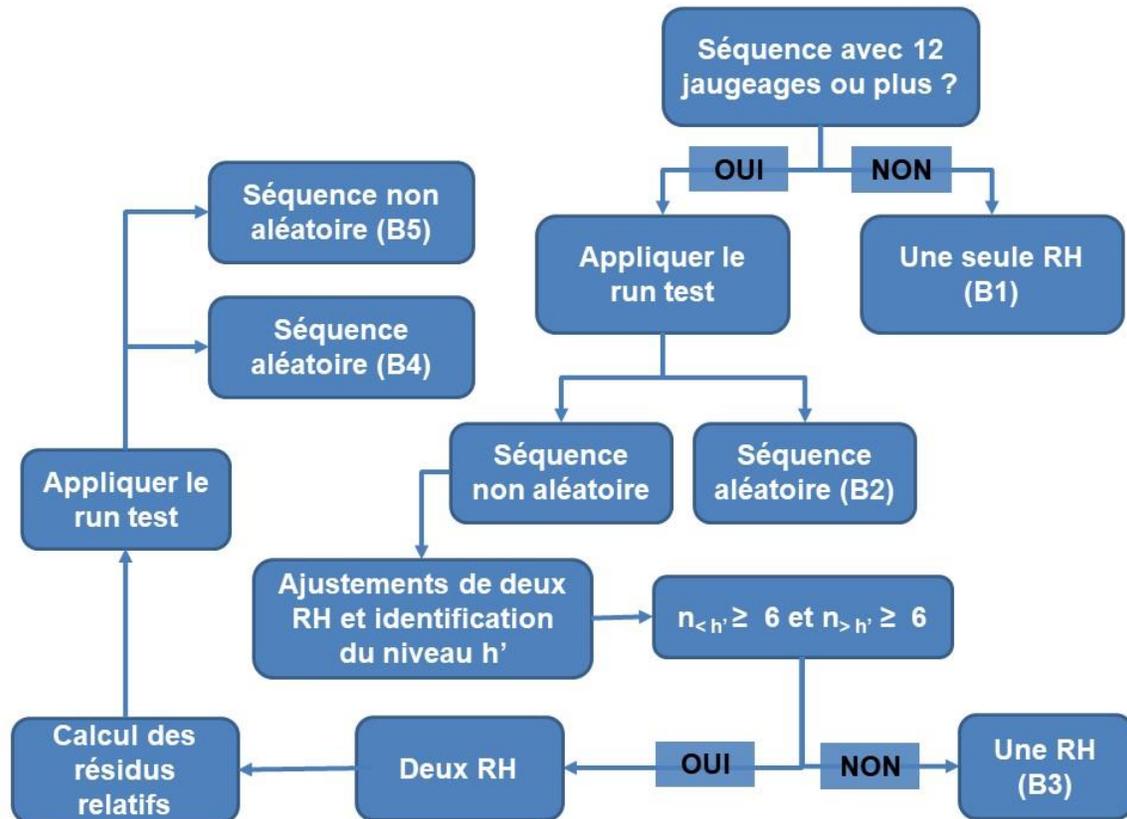


Figure 7.8 - Schéma décrivant la procédure utilisée pour la segmentation des CT en plusieurs RH à l'aide du RT ( $n_{<h'}$  et  $n_{>h'}$  réfèrent respectivement aux nombres de jaugeages des séquences avant et après le niveau de transition estimé  $h'$ ).

Le RT est appliqué à chaque séquence obtenue après partition temporelle de la série des jaugeages selon la procédure décrite à la Section 7.2.1. Les écarts relatifs de chacune de ces séquences sont estimés et ordonnés en fonction des niveaux jaugés. Tout comme pour le test de Pettitt, certaines règles spécifiques s'appliquent lors de l'application du RT :

- Le RT est appliqué si la séquence compte plus 12 jaugeages ou plus. Cette règle vise à éviter d'appliquer le test à des séquences trop courtes pour lesquelles la puissance du test diminue.
- Le niveau de transition estimé  $h'$  ne doit pas se trouver dans les six plus petits niveaux jaugés ou les six plus grands niveaux jaugés de la séquence. L'ajustement de RH à des séquences de six jaugeages ou moins est ainsi évité.
- Le seuil de significativité utilisé est de 5%.

Le RT est appliqué une seule fois à chaque séquence et les séquences sont classées selon les résultats du test. Si le RT conclut que deux segments sont nécessaires, chacun des segments est alors soumis à nouveau au RT. Les segments qui demeurent non aléatoires sont regroupés dans une catégorie pour examen ultérieur (catégorie B4) alors

que les segments dont les résidus sont aléatoires sont classés dans la catégorie B5. La Figure 7.8 présente un diagramme décrivant l'ensemble de la procédure.

Après application de cette procédure, les séquences obtenues au terme de la partition temporelle (voir section précédente) seront classées dans l'une ou l'autre des catégories suivantes (Figure 7.8) :

- B1 : Séquences avec moins de 12 jaugeages, représentées par une RH (RT n'a toutefois pas été appliqué);
- B2 : Séquences avec 12 jaugeages ou plus, représentées par une RH et avec écarts relatifs aléatoires;
- B3 : Séquences avec 12 jaugeages ou plus, représentées par une RH et écarts relatifs non aléatoires avec niveau de transition dans les six plus petits niveaux jaugés ou les six plus grands niveaux jaugés;
- B4 : Séquences avec 12 jaugeages ou plus, représentées par deux RH et écarts relatifs aléatoires ;
- B5 : Séquences avec 12 jaugeages ou plus, représentées par plus de deux RH et écarts relatifs non aléatoires pour les écarts relatifs avec deux RH.

Cette classification montre que les séquences appartenant à la catégorie B2 sont celles où l'utilisation d'une seule RH permet une représentation adéquate de la relation h-Q pour l'ensemble des niveaux jaugés alors que celles de la catégorie B4 peuvent être représentées par deux RH. Les séquences des autres catégories doivent faire l'objet d'un examen plus approfondi. Ainsi la catégorie B1 regroupe les séquences avec un nombre insuffisant de jaugeages et pour lesquelles les résultats du RT sont jugés non concluants. Un examen visuel de ces séquences par les hydrologues s'impose afin de valider ce résultat et confirmer que les écarts relatifs sont bien distribués. De même pour la catégorie B3 où le niveau de transition se trouve parmi les plus petits ou plus grands niveaux jaugés. Encore ici un examen visuel s'impose et l'ajout éventuel de jaugeages en régime de faibles ou forts débits pourra permettre de confirmer la nécessité de considérer plusieurs RH. Enfin la catégorie B5 regroupe l'ensemble des séquences qui pourraient potentiellement exiger plus de deux RH. Ces cas devront faire l'objet d'un examen plus attentif ultérieurement.

En combinant les catégories après partition temporelle (A1, A2, A3) et celles résultant de la segmentation en RH (B1, B2, B3, B4, B5), on voit que les séquences de catégorie A1 sont nécessairement des séquences B1 et que les combinaisons (A2, B1) et (A3, B1) sont impossibles. Toutes les autres combinaisons sont possibles. Le Tableau 7.4 présente le nombre et le pourcentage de séquences selon les diverses combinaisons de catégories. Ainsi ce tableau montre que 254 séquences, soit 75.6% des séquences, comptent 12 jaugeages ou plus et qu'une seule RH est nécessaire pour représenter la CT (combinaison A2, B2). Par ailleurs 51 séquences (15.2% des séquences) comportent moins de 12 jaugeages et seraient donc représentées par une seule RH pour cette raison (catégorie A1, B1). Enfin 20 séquences (environ 6% des séquences) comptent au moins 12 jaugeages et sont représentées par deux RH (combinaison A2, B4). La liste de ces séquences et des SH correspondantes est présentée au Tableau 7.5.

Tableau 7.4 - Nombre de séquences selon les diverses combinaisons des catégories (A1, A2, A3) et (B1, B2, B3, B4, B5).

	B1	B2	B3	B4	B5	TOTAL
A1	51					51
A2		254	5	20	4	283
A3		2	0	0	0	2
TOTAL	51	276	5	4		336

Tableau 7.5 - Liste des 19 stations avec des séquences de 12 jaugeages ou plus, représentées par 2 RH – catégorie (A2, B4) (ces séquences apparaissent en gras dans la colonne 'Nombre de jaugeages par séquence'). A noter que la station Dartmouth est la seule station qui compte deux séquences appartenant à la catégorie (A2, B4).

Numéro de la station	Nom de la station	Nombre de séquences	Nombre de jaugeages	Nombre de jaugeages par séquence
022301	Des Trois-Pistoles	1	72	<b>72</b>
023401	Beaurivage	1	59	<b>59</b>
040238	Du Diable	1	24	<b>24</b>
043012	Kinojévis	1	72	<b>72</b>
050801	Jacques-Cartier	1	62	<b>62</b>
052228	Noire	1	96	<b>96</b>
052805	Du Loup	1	81	<b>81</b>
061029	Aux Sables	1	21	<b>21</b>
080101	Harricana	1	71	<b>71</b>
089907	Bellefeuille	1	24	<b>24</b>
011508	Décharge du lac Matapédia	2	87	[32; <b>55</b> ]
020404	York	2	105	[32; <b>73</b> ]
020602	Dartmouth	2	100	[ <b>38</b> ; <b>62</b> ]
030424	Aux Brochets	2	39	[9; <b>30</b> ]
046709	du Chêne	2	41	[ <b>26</b> ;15]
061020	Aux Écorces	2	65	[42; <b>23</b> ]
023402	Chaudière	3	82	[29; <b>36</b> ;17]
052212	Ouareau	4	95	[17;20;31; <b>27</b> ]
030907	Des Anglais	5	86	[ <b>36</b> ;9;9;15;17]

Tableau 7.6 - Liste des stations avec des séquences appartenant aux combinaisons (A2, B3), (A2, B5) ou (A3, B2) (en gras dans la colonne 'Nombre de jaugeages par séquence').

Cas	Numéro de la station	Nom de la station	Nombre de séquences	Nombre de jaugeages	Nombre de jaugeages par séquence
(A2, B3)	011003	Casapédia	3	82	[29;19; <b>34</b> ]
	022704	Ouelle	2	70	[ <b>31</b> ;39]
	023429	Chaudière	2	79	[50; <b>29</b> ]
	030425	De la Roche	1	49	<b>49</b>
	061004	Chicoutimi	1	64	<b>64</b>
(A2, B5)	022507	Du Loup	1	90	<b>90</b>
	050807	Ontaritzzi	2	50	[35; <b>15</b> ]
	061029	Aux Sables	1	21	<b>21</b>
	120201	Dauphine	5	190	[38;27;28; <b>44</b> ;53]
(A3, B2)	010802	Bonaventure	6	107	[29;10;24;17; <b>13</b> ;14]
	030220	Massawippi	3	88	[44; <b>15</b> ;29]

Trois autres combinaisons, (A2, B3), (A2, B5) et (A3, B2), pour un total de 11 séquences, sont également répertoriées au Tableau 7.4. La liste des stations avec une séquence appartenant à l'une ou l'autre de ces trois combinaisons est présentée au Tableau 7.6. Ainsi cinq séquences se retrouvent dans la combinaison (A2, B3), c.-à-d. que ce sont des séquences de 12 jaugeages ou plus avec des résidus relatifs non aléatoires mais où le niveau de transition se trouve dans les six plus petits ou les six plus grands niveaux jaugés. Quatre séquences se retrouvent dans la catégorie (A2, B5), c.-à-d. qu'elles comptent 12 jaugeages ou plus et des résidus relatifs non aléatoires même après avoir ajustées deux RH à ces séquences. Enfin deux séquences sont classées dans la combinaison (A3, B2), c.-à-d. des séquences de 12 jaugeages ou plus qui peuvent être représentées par une RH (série aléatoire) mais comportant une rupture dans la série temporelle des résidus localisée dans les six premiers ou les six derniers jaugeages de la séquence.

Des séquences répertoriées au Tableau 7.4, les plus problématiques sont les quatre associées à la combinaison (A2, B5). En effet, ce résultat suggère que la représentation en deux RH des séquences en question pourrait être insuffisante. Une investigation plus poussée de ces quatre séquences serait nécessaire.

### 7.3 Exposants des régressions hydrauliques

Une analyse des valeurs de l'exposant  $c$  (voir équation 7.1) des différentes CT a été réalisée. Rappelons que les valeurs de cet exposant sont connues pour divers ouvrages hydrauliques (voir par exemple le Tableau 1 de Le Coz *et al.* (2014) où les valeurs des paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$  pour diverses sections régulières sont présentées). Sans prétendre que les valeurs de sections quelconques soumis à différents types de contrôle devraient

être similaires à des valeurs d'ouvrages hydrauliques 'standards', il n'en demeure pas moins intéressant et pertinent de comparer ces valeurs entre elles.

La Figure 7.9 présente les distributions des exposants  $c$  et les valeurs de certaines structures hydrauliques. On note que les valeurs des exposants aux CT sont regroupées entre 1 et 3 et donc comparables aux exposants connus rapportés sur la même figure. Un certain nombre de séquences présente toutefois des valeurs de  $c$  relativement élevées. Le Tableau 7.7 dresse la liste des 32 séquences dont les CT sont représentées par une RH avec  $c > 3$  alors que le Tableau 7.8 présente les valeurs correspondantes pour les six CT représentées par deux RH. Rappelons que 20 CT sont représentées par deux RH et donc qu'un nombre relativement important de CT compte une RH avec  $c > 3$ . A noter également que dans tous les cas, à l'exception de la station Du Loup, 10 jaugeages ou moins sont utilisés pour ajuster la RH associée aux plus grands niveaux.

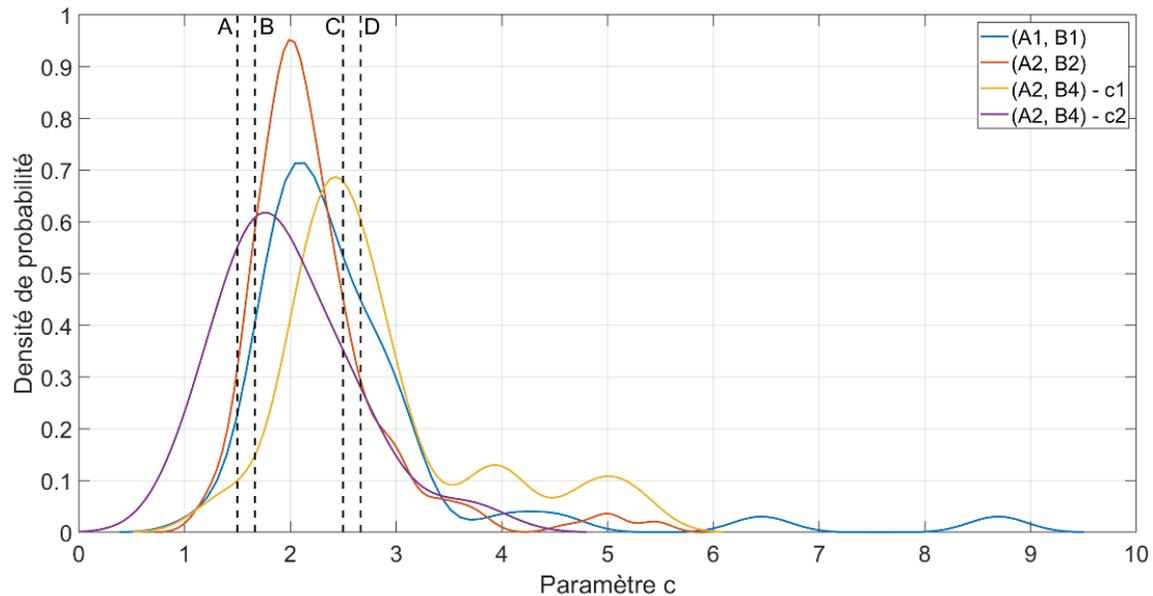


Figure 7.9 – Distributions des valeurs de l'exposant  $c$  des RH (équation 7.1) pour les 50 séquences (A1, B1) et les 254 séquences (A2, B2) représentées par une RH, et pour les 20 séquences (A2, B4) représentées par deux RH. Dans ce dernier cas,  $c_1$  réfère à l'exposant pour la RH associée aux petits niveaux et  $c_2$  aux exposants pour les 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 ( $c = 8/3$ ).

Tableau 7.7 - Liste des stations et des séquences dont les CT sont représentées par une RH avec  $c > 3$ . Les niveaux sont exprimés en m et les débits en  $m^3/sec$ .

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	a	b	c
010802	Bonaventure	2017-2020	8	$4.6 \times 10^{-3}$	45.20	8.69
022704	Ouelle	1999-2020	39	4.67	47.70	3.35
023106	Du Sud	1966-2019	104	2.36	27.05	3.72
023429	Chaudière	1980-2011	50	32.83	28.53	3.01
030234	Eaton	1969-1993	31	17.44	24.93	3.07
030234	Eaton	1994-1997	13	19.00	24.94	3.02
030234	Eaton	1998-2010	12	17.62	24.92	3.01
030304	Noire	2011-2018	21	14.21	27.26	4.59
030314	Yamaska Sud-Est	1997-2006	12	7.83	29.54	3.74
030314	Yamaska Sud-Est	2006-2011	12	18.63	29.78	3.06
030340	Yamaska Nord	2003-2006	12	2.45	92.85	5.04
030905	Châteauguay	1983-1994	10	1.85	27.23	4.03
030907	Des Anglais	1999-2008	15	60.25	29.91	3.84
040129	Doncaster	1984-1993	18	3.71	28.48	3.30
040132	Décharge du lac Ludger	1983-2019	65	3.38	373.3 1	3.11
040204	Rouge	1966-1971	15	0.02	22.31	5.04
040204	Rouge	1972-1976	12	$6.6 \times 10^{-3}$	21.98	5.41
040204	Rouge	1977-2020	67	$7.4 \times 10^{-3}$	22.22	5.49
041902	Dumoine	1992-2007	7	8.56	26.18	3.01
048603	Gordon	2008-2019	9	0.88	45.86	6.46
050135	Croche	1978-1986	14	2.17	24.21	3.58
050135	Croche	1986-1993	18	2.31	24.23	3.61
051001	Montmorency	1998-2020	19	3.17	25.11	3.48
052810	Du Loup	2013-2015	12	0.04	42.13	4.99
061901	Ashuapmushuan	1953-2019	81	10.29	21.91	3.11
075705	Du Petit Mécatina	1983-2009	29	3.43	89.51	3.01
076601	Saint-Paul	1967-1973	10	6.35	24.23	3.12
080106	Bourlamaque	2010-2019	23	7.43	48.94	3.40
080707	Bell	1962-2019	39	2.60	17.32	3.37
093801	Grande rivière de la Baleine	1961-2019	26	0.07	22.93	4.81
095003	Lac des Loups Marins	1994-2017	7	0.14	23.98	4.52
103605	Aux Mélèzes	1965-1966	11	14.17	25.92	3.09

Tableau 7.8 - Liste des stations et des séquences dont les CT sont représentées par deux RH avec  $c > 3$  pour l'une ou l'autre des RH. Les niveaux sont exprimés en m et les débits en  $m^3/sec$ .

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Niveau de transition (m)	RH1			RH2				
				Nombre de jaugeages	a	b	c	Nombre de jaugeages	a	b	c
020602	Dartmouth	1970-1992	29.72	28	6.31	28.29	<b>5.21</b>	10	26.82	28.54	2.46
020602	Dartmouth	1993-2020	29.76	53	9.62	28.39	<b>4.82</b>	9	23.71	28.50	2.65
030907	Des Anglais	1974-1989	30.70	29	77.08	29.93	<b>3.84</b>	7	25.52	29.66	2.41
040238	Du Diable	2010-2018	37.41	16	5.49	35.78	<b>4.04</b>	8	14.45	35.69	1.84
050801	Jacques-Cartier	1925-2018	28.72	54	5.87	27.11	2.85	8	0.22	24.11	<b>3.69</b>
052805	Du Loup	1966-2019	28.06	39	7.58	26.88	<b>3.09</b>	42	36.24	27.59	1.39

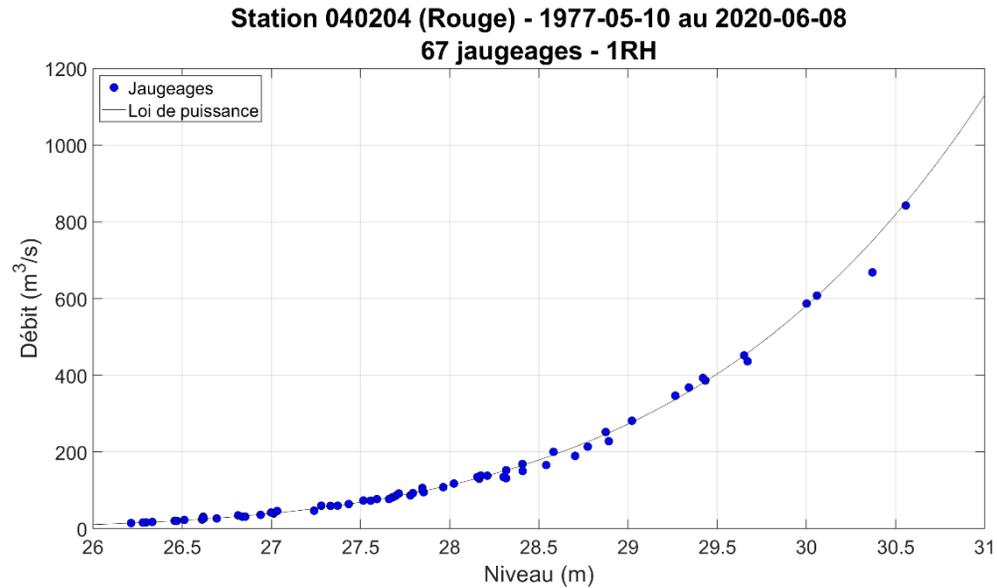


Figure 7.10 – CT à la station Rouge (040204) pour la période 1977-2020 représentée par une RH d'exposant  $c = 5.49$  (voir Tableau 7.7).

Un examen des CT des séquences répertoriées aux Tableaux 7.7 et 7.8 n'a pas permis de discerner de particularités spécifiques pour ces courbes. On constate toutefois que plusieurs d'entre elles présentent peu de jaugeages. Ainsi dans le cas des CT représentées par une RH, 17 séquences (53% des séquences) comptent 15 jaugeages ou moins. Ce faible nombre de jaugeage pourrait signifier que la gamme des niveaux jaugés demeure petite. Dès lors, l'ajout de nouveaux jaugeages permettra d'étendre la relation et conséquemment l'exposant  $c$  en sera modifié. Des contre-exemples existent cependant comme la CT à la station Rouge (040204) couvrant la période 1977-2020 (Figure 7.10). On dispose dans ce cas de 67 jaugeages dont les niveaux semblent bien distribués. Deux autres CT à cette station couvrant d'autres périodes présentent également des exposants  $c$  élevés. Le type de contrôle ou les conditions locales d'écoulement pourraient dans ce cas expliquer ces exposants très élevés.

Une comparaison des exposants des CT représentées par deux RH a finalement été réalisée (Figure 7.11; Tableau D.2 de l'Annexe D). L'idée ici est de voir si l'exposant de la partie représentant les plus petits niveaux,  $c_1$ , est supérieur ou inférieur à l'exposant associé aux plus grands niveaux,  $c_2$ . La Figure 7.11 montre que des 20 CT, trois seulement ont  $c_2 > c_1$ . Dans l'hypothèse que le jaugeage en niveau élevé se fait dans des conditions de crue où la section ou encore le type de contrôle peut changer, ce résultat suggère que l'écoulement sous ces conditions entraîne une diminution des débits associés à une réduction probable des vitesses moyennes d'écoulement. Ce résultat demanderait toutefois à être analysé sur un plus grand nombre de sections.

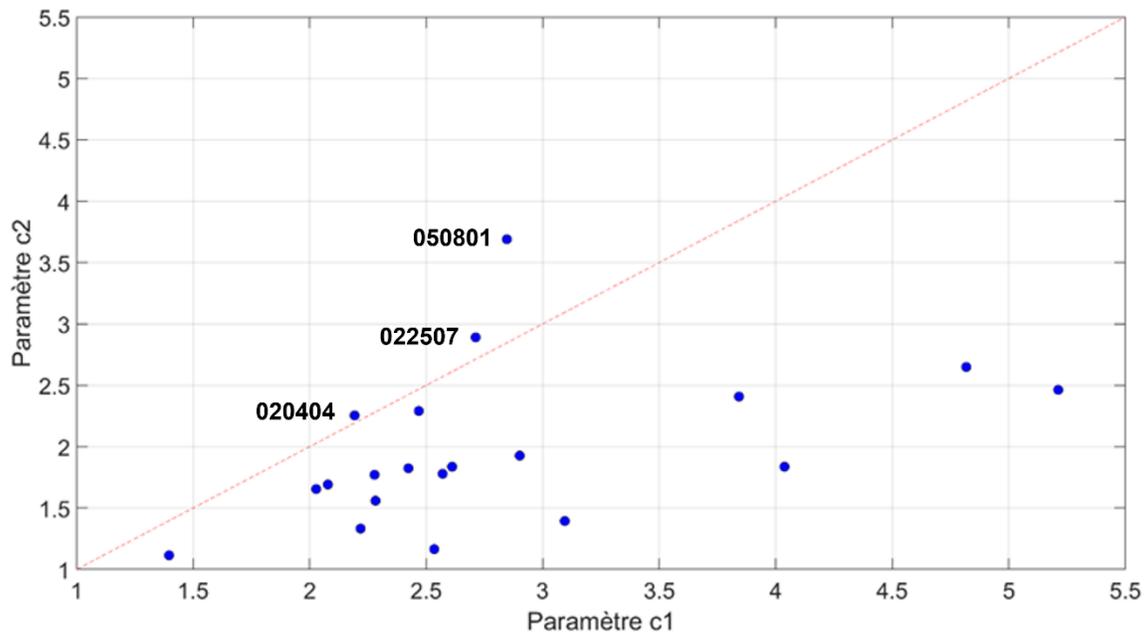


Figure 7.11 – Valeurs des exposants des 20 CT représentées par deux RH.  $c_1$  (en abscisse) est l'exposant associé à la RH pour les plus petits niveaux et  $c_2$  (en ordonnée) à l'exposant de la RH pour les plus grands niveaux. Le numéro des SH est identifié pour

les trois cas où le paramètre  $c_2$  est plus grand que le paramètre  $c_1$  (020404; York, 022507; Du Loup et 050801; Jacques-Cartier).

## 7.4 Synthèse et livrables

Le présent chapitre a permis d'identifier les jaugeages à considérer pour la construction des différentes CT aux SH à l'étude. La représentation mathématique adoptée pour représenter les relations h-Q dans le cadre des présents travaux est du type loi de puissance, une forme très souvent rencontrée en hydraulique. Elle est désignée par RH et nécessite l'ajustement de trois paramètres. Il convient de noter qu'elle diffère de la représentation utilisée par la DEH qui repose sur une interpolation de type spline cubique.

Deux situations particulières devaient *a priori* être considérées pour la sélection des jaugeages à utiliser pour construire les CT : 1) la présence de possibles changements des conditions hydrauliques ou géomorphologiques au fil du temps et conséquemment une modification de la CT ; 2) l'existence de plusieurs régimes d'écoulement ou de contrôle selon le niveau qui font en sorte qu'une seule RH ne permet pas de représenter adéquatement la relation h-Q sur toute la gamme des niveaux jaugés.

Tous les jaugeages disponibles à une SH ont été considérés dans un premier temps. Une RH a été ajustée à ces jaugeages. Les trois paramètres de la RH ont été estimés en minimisant la somme des valeurs absolues des écarts relatifs entre les débits jaugés et les débits estimés à partir de la RH. L'utilisation des écarts relatifs s'explique par les incertitudes sur les débits et les niveaux jaugés souvent exprimées en pourcentage de la valeur mesurée (p. ex.  $\pm 10\%$ ). La CT ainsi obtenue est désignée comme la CT moyenne (ou CTM). Les écarts relatifs entre débits jaugés et estimés à partir de la CMT sont ensuite estimés pour chaque niveau jaugé.

Un test de rupture (test de Pettitt) a été appliqué aux séries temporelles de ces écarts relatifs. L'application de ce test permet d'identifier d'éventuelles ruptures pouvant être associées à des changements géomorphologiques de la section de contrôle. En effet, l'absence de changement de la CT devrait se traduire par une série temporelle des écarts relatifs sans rupture. L'apparition d'une rupture signifie qu'à partir d'une date, les écarts entre la CMT et les 'nouveaux' jaugeages présentent un biais et que donc ces nouveaux jaugeages s'écartent de façon systématique de la CT. Le test de rupture est donc appliqué aux séquences de jaugeages et ces séquences sont partitionnées en sous-séquences jusqu'à ce qu'aucune rupture ne soit plus détectée. Les séquences de jaugeages consécutifs ainsi générées sont celles retenues pour la suite des analyses. Une RH est enfin ajustée à chacune de ces séquences selon une approche similaire à celle décrite précédemment à savoir en minimisant la somme des valeurs absolues des écarts relatifs entre les débits jaugés et les débits estimés à partir des CT.

Les écarts relatifs entre débits jaugés et débits estimés à partir de chacune des CT pour chacune des séquences sont calculés et ordonnés en ordre croissant de niveau jaugé.

Un test de type 'run test' est ensuite appliqué à cette série. Ce type de test permet de déterminer si la série est aléatoire. Une série non aléatoire signifiera qu'il existe une 'structure' dans la série des écarts relatifs, par exemple, une surestimation des débits jaugés pour une gamme de niveaux suivi d'une sous-estimation pour une autre gamme de niveaux. Un tel résultat suggère que la CT ne décrit pas adéquatement la relation h-Q. Dans ces cas deux RH sont nécessaires pour construire la CT de cette séquence. L'ajustement de ces deux RH se fait en imposant la continuité de ces RH au niveau de transition où se joignent les deux régressions. Les paramètres des deux RH et le niveau de transition sont déterminés de sorte à minimiser la somme des valeurs absolues des écarts relatifs entre les débits jaugés et estimés à partir des deux RH. Il convient de noter que les séquences ne pouvant pas être adéquatement représentées par une ou deux RH n'ont pas été considérées dans la suite.

Au terme de ces différentes analyses, les jaugeages à chaque SH sont regroupés en séquences couvrant des périodes spécifiques et consécutives. Les jaugeages de chacune de ces séquences sont utilisés pour construire la CT correspondante représentée par une ou deux RH. Les paramètres de ces CT sont regroupés à l'Annexe D.

## CHAPITRE 8. INCERTITUDES SUR LES COURBES DE TARAGE

Ce chapitre présente l'ensemble des analyses et des résultats sur les incertitudes sur les courbes de tarage (CT). Une première partie (Section 8.1) présente une analyse globale des incertitudes selon une approche initialement proposée par Coxon *et al.* (2015). Une deuxième partie (Section 8.2) examine les incertitudes à chacune des CT développées au Chapitre 7. Sur la base de ces résultats plusieurs modèles d'incertitudes sont ensuite proposés (Section 8.3) et appliqués à l'ensemble des stations hydrométriques (SH) considérées (Section 8.4). La Section 8.5 discute plus spécifiquement de la question des incertitudes pour les parties extrapolées des CT. Les résultats des analyses sur les sections de contrôle (Chapitre 9) sont ainsi utilisés pour caractériser les différentes CT en fonction de la position relative des niveaux critiques et des niveaux jaugés et mesurés. Enfin la Section 8.6 présente un résumé de l'ensemble des résultats obtenus.

### 8.1 Estimation des résidus relatifs aux stations

Considérons une station  $k$  qui compte  $N_k$  séquences et  $(h_i, Q_i)_j$  les  $n_j$  jaugeages ( $i = 1, \dots, n_j$ ) de la séquence  $j$  (l'indice sur la station est omis afin de simplifier la notation). Rappelons qu'une séquence réfère à la suite de jaugeages obtenue après partition temporelle de la série originale des jaugeages à une station (voir Section 7.2.1). Une séquence peut être représentée par une ou deux régressions hydrauliques (RH, voir Section 7.2.2). Le résidu relatif,  $RR$ , pour le jaugeage  $i$  de la séquence  $j$ ,  $RR_i$ , est défini par :

$$RR_i = \frac{Q_{CT}(h_i) - Q_i}{Q_i} \quad (8.1)$$

où  $Q_{CT}(h_i)$  le débit estimé à partir de la CT pour le niveau jaugé  $h_i$  et  $Q_i$ , le débit jaugé correspondant (l'indice  $j$  sur la séquence est omis pour simplifier la notation). On dispose donc de  $n_j$  valeurs de  $RR$  pour la séquence  $j$ . A noter que les  $RR$  sont équivalents aux écarts relatifs définis au chapitre précédent (équation 7.1). Les  $RR$  donnent donc une appréciation des erreurs relatives sur les débits estimés à partir des CT.

Les 51 séquences de la catégorie (A1, B1), 254 séquences de la catégorie (A2, B2) et 20 séquences de la catégorie (A2, B4), pour un total de 325 séquences, ont été considérées pour la suite des analyses (Tableau 7.4). Suivant les analyses précédentes, tous les jaugeages disponibles peuvent être utilisés pour construire les CT de chacune de ces séquences et une ou deux RH permettent de représenter adéquatement la relation  $h$ - $Q$  correspondante. La Figure 8.1 présente l'histogramme du nombre de jaugeages disponibles à ces 325 séquences. On constate qu'une majorité de séquences compte entre 10 et 20 jaugeages et que quelques séquences comptent plus de 100 jaugeages. Le nombre moyen de jaugeages disponibles par séquence est de 30.9.

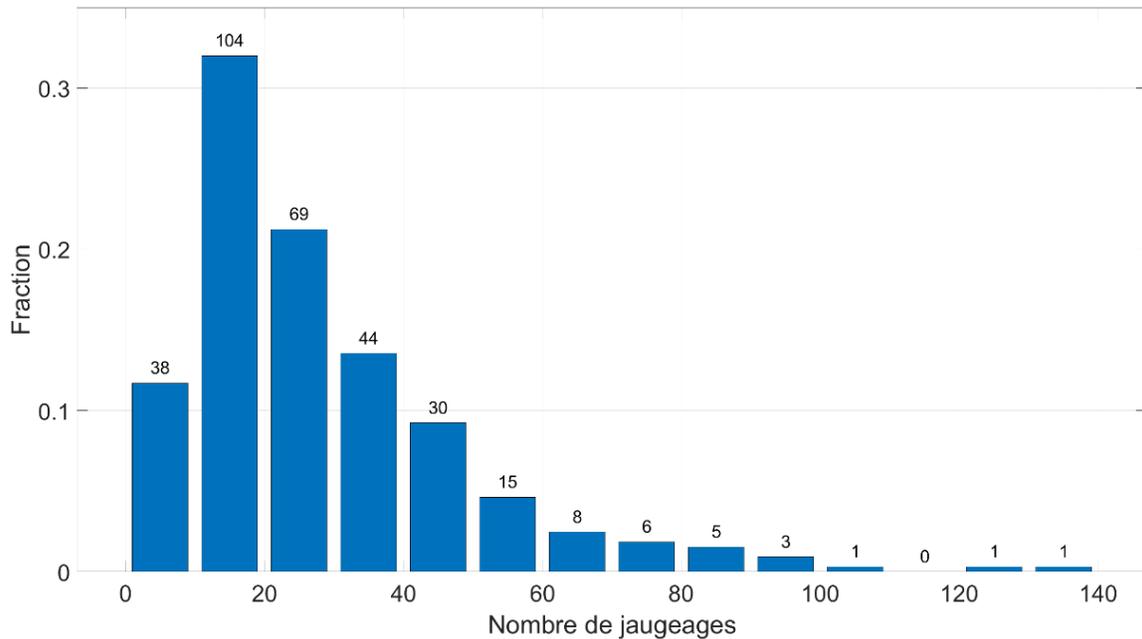
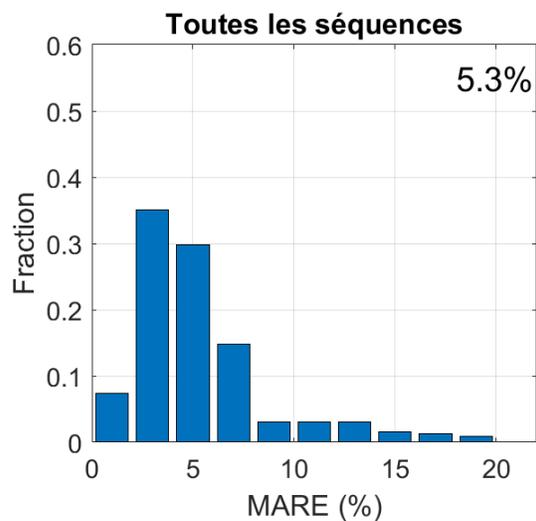


Figure 8.1 - Histogramme du nombre de jaugeages par séquence pour les 325 séquences appartenant aux catégories (A1, B1), (A2, B2) et (A2, B4). Le nombre d'occurrence apparaît au-dessus de chacune des barres.

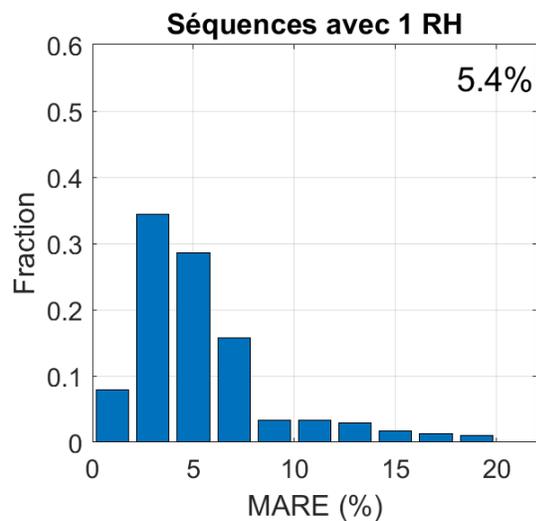
Onze séquences des catégories (A2, B3), 5 séquences, (A2, B5), 4 séquences, et (A3, B2), 2 séquences, sont donc éliminées des analyses qui suivent (Tableau 7.4) et devront faire l'objet d'une analyse distincte.

Les valeurs des MARE, qui correspondent aux moyennes des valeurs absolues des RR (voir équation 7.4) aux 325 séquences retenues, ont été estimées et l'histogramme de ces valeurs a été construit (Figure 8.2a). On constate qu'une grande majorité des séquences ont des MARE de moins de 10% et quelques séquences présentent des valeurs plus élevées pouvant aller dans certains cas à près de 20%.

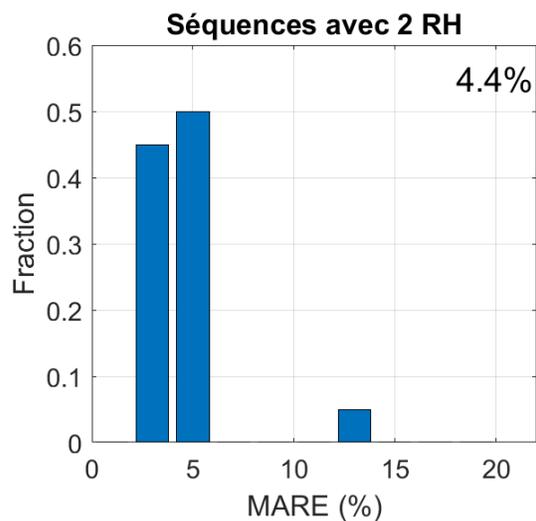
Le même exercice a été réalisé cette fois en considérant d'une part les 305 séquences représentées par 1 RH et les 20 séquences représentées par 2 RH (Figure 8.2b et 8.2c respectivement). On voit que la grande majorité des séquences avec des MARE de plus de 10% sont représentées par une seule RH (Figure 8.2b) et qu'une seule est représentée par deux RH (Figure 8.2c).



(a)



(b)



(c)

Figure 8.2 - Histogramme des valeurs du MARE aux : a) 325 séquences retenues ; b) 305 séquences représentées par 1 RH ; c) 20 séquences représentées par 2 RH. Les valeurs moyennes sont indiquées dans la partie supérieure droite de chaque histogramme.

## 8.2 Résidus relatifs en fonction des débits normalisés

Les RR dépendent du débit ou du niveau (incertitudes hétéroscédastiques). Ils ont donc été exprimés en fonction du débit normalisé,  $\tilde{Q}_j$ , défini comme le débit jaugé  $Q_j$  divisé par la moyenne des débits jaugés de la séquence  $\bar{Q}$  (Coxon *et al.* 2015) :

$$\tilde{Q}_j = \frac{Q_j}{\bar{Q}} \quad (8.2)$$

La Figure 8.3 présente le graphique des RR en fonction des débits normalisés après regroupement des 325 séquences retenues. Cette figure confirme que les erreurs sont hétéroscédastiques et suggère une dispersion plus importante des erreurs pour les faibles et les forts débits jaugés. Ce résultat n'est pas surprenant considérant les incertitudes de mesures vraisemblablement plus importantes pour ces deux régimes d'écoulement et les hypothèses associées à l'utilisation et à l'ajustement de la RH pour représenter la relation h-Q.

Afin d'avoir une meilleure idée de la dispersion des RR, l'intervalle des débits normalisés a été subdivisé en 48 sous-intervalles et les RR de chaque sous-intervalle regroupés (environ 200 RR par sous-intervalle). Les valeurs moyennes et les écart-types des RR de chaque sous-intervalle ont ensuite été estimés et sont présentés à la Figure 8.4. Cette figure confirme que les RR tendent à être plus dispersés pour les petits et plus grands débits. On constate également un biais positif pour les plus grands débits indiquant que les débits estimés à partir de la CT tendent à surestimer les débits jaugés (équation 8.1). On voit que pour des débits normalisés  $\tilde{Q}$  compris entre  $\approx 0.25$  et  $\approx 5$  les erreurs relatives moyennes entre débits estimés à l'aide des CT et les débits jaugés sont de 10% ou moins, une valeur comparable aux incertitudes de mesures des débits jaugés (voir Chapitre 6).

La Figure 8.4 suggère également que les résultats de la présente étude sont globalement cohérents avec ceux rapportés par Coxon *et al.* (2015). Une différence notable toutefois concerne les biais et écarts-types pour les trois intervalles de débits normalisés les plus grands où l'on constate une augmentation marquée des biais et des écarts-types des distributions dans ces cas ce qui n'a pas été rapporté par Coxon *et al.* (2015).

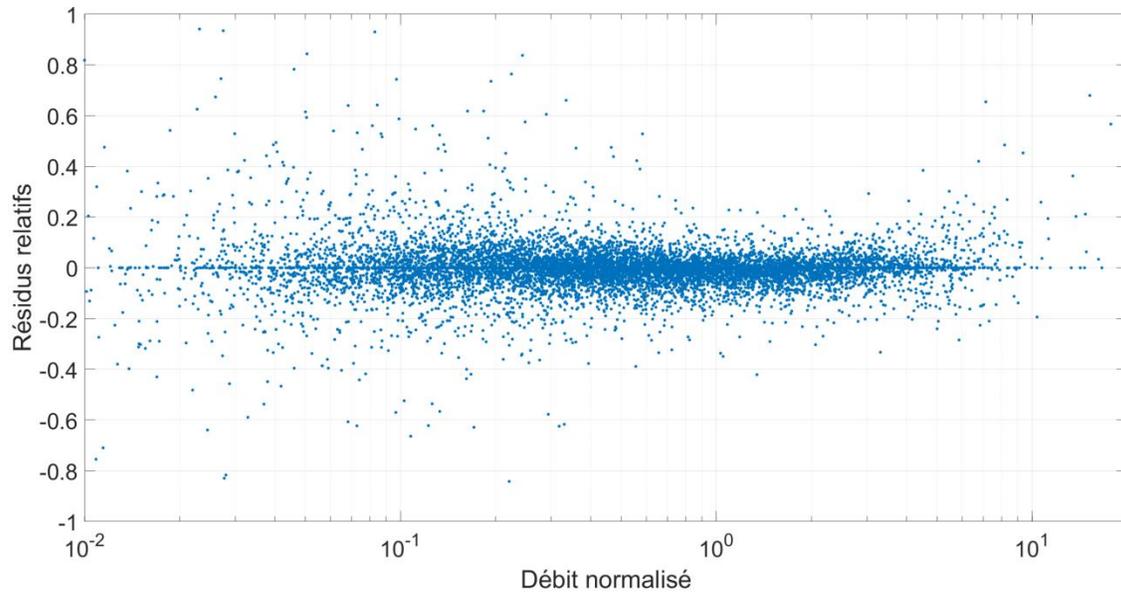


Figure 8.3 – Résidus relatifs des jaugeages aux 325 séquences retenues en fonction du débit normalisé. A noter que les axes des x et des y ont été tronqués afin d’améliorer la visibilité de la figure. A noter également que l’axe des x est logarithmique.

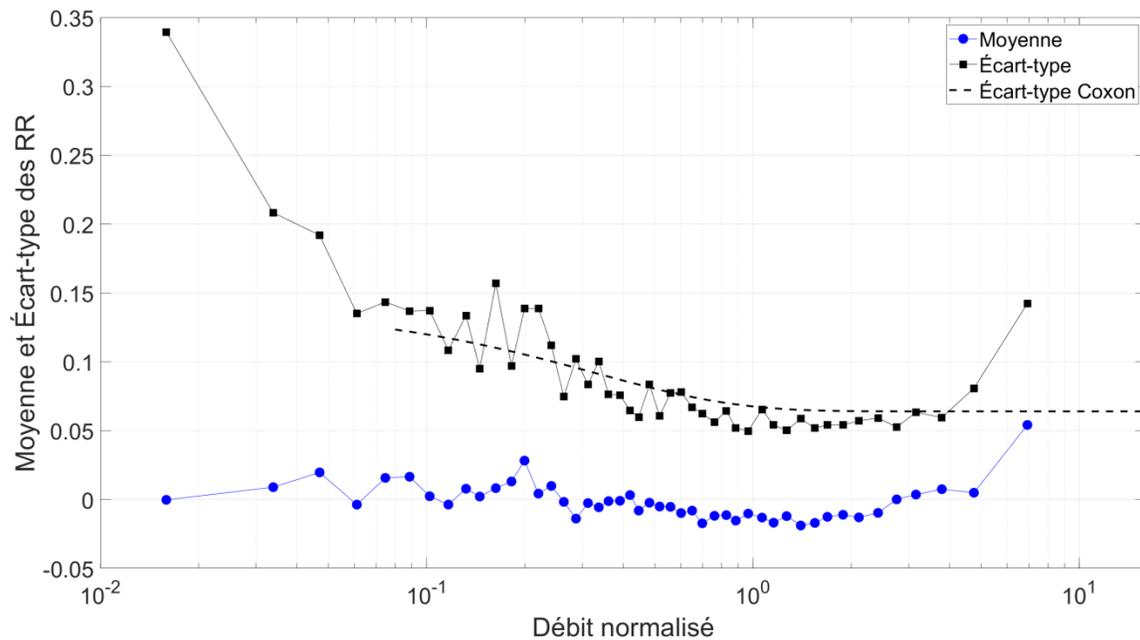


Figure 8.4 - Moyennes et écart-types des résidus relatifs aux 325 séquences retenues en fonction de la moyenne des débits normalisés appartenant à chaque intervalle de valeurs. A noter que l’axe des x est logarithmique. La courbe en tiret correspond à l’équation de l’écart-type de la distribution logistique obtenue par Coxon et al. (2015) :  $\pi [4.18 \exp(-3.051 \tilde{Q}) + 3.531] - \sqrt{3}$  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).

Le diagramme des L-moments  $\tau_3 - \tau_4$  a été construit (Hoskins et Wallis 1997) afin d'identifier la distribution la mieux à même de représenter la distribution des RR de chaque sous-intervalle (Figure 8.5). Rappelons que le L-moment  $\tau_3$  est une mesure de l'asymétrie de la distribution (*skewness*). Ainsi une valeur près de zéro indique une distribution symétrique, une valeur positive une distribution avec une queue plus importante à droite et une valeur négative une distribution avec une queue plus importante à gauche. Le L-moment  $\tau_4$  est pour sa part associé au kurtosis et peut être interprété comme une mesure du poids relatif de la partie centrale et des queues de la distribution. Ainsi un kurtosis élevé correspond à une distribution concentrée (ou pointue) près de sa moyenne et avec des queues de distribution épaisses ou lourdes (probabilité d'avoir des valeurs très éloignées de la moyenne). Une distribution avec un kurtosis supérieure à 3 est dite leptokurtique. Ainsi le kurtosis de la distribution logistique est 4.25 et celui de la distribution normale 3.

La Figure 8.5 suggère que les distributions des résidus pour les différents intervalles de débits normalisés sont généralement symétriques (valeurs de  $\tau_3$  près de zéro) et avec une valeur de L-kurtosis très élevée et supérieure aux valeurs des distributions affichées à la Figure 8.5. Coxon *et al.* (2015) ont conclu que la distribution logistique représentait de façon adéquate les distributions des RR aux stations considérées dans leur étude (voir l'Annexe E pour une description de la distribution logistique). De fait, des distributions présentées à la Figure 8.5, la distribution logistique (identifiée par la lettre L à la Figure 8.5) semble la plus appropriée puisque plus près du nuage de valeurs  $\tau_3 - \tau_4$  des différents intervalles de débits normalisés. La kurtosis de cette distribution semble toutefois trop petit pour adéquatement représenter la distribution des RR dans notre cas. Il convient enfin de noter qu'il ne semble y avoir aucune corrélation entre les valeurs des L-moment et le débit normalisé (Figure 8.5). D'autres distributions de kurtosis plus élevées devraient donc être possiblement envisagées, comme la distribution de Laplace ou Pearson de type VII. La distribution logistique a toutefois été retenue pour la suite des analyses.

### 8.3 Modèles d'incertitudes

Cette section présente les modèles utilisés pour décrire les incertitudes sur les CT aux séquences retenues. Des 325 séquences faisant partie des catégories (A1, B1), (A2, B2) et (A2, B4), seules celles ayant 10 jaugeages et plus ont été retenues, pour un total de 298 séquences. Les modèles considérés sont développés à partir de l'information disponible pour la partie interpolée des CT.

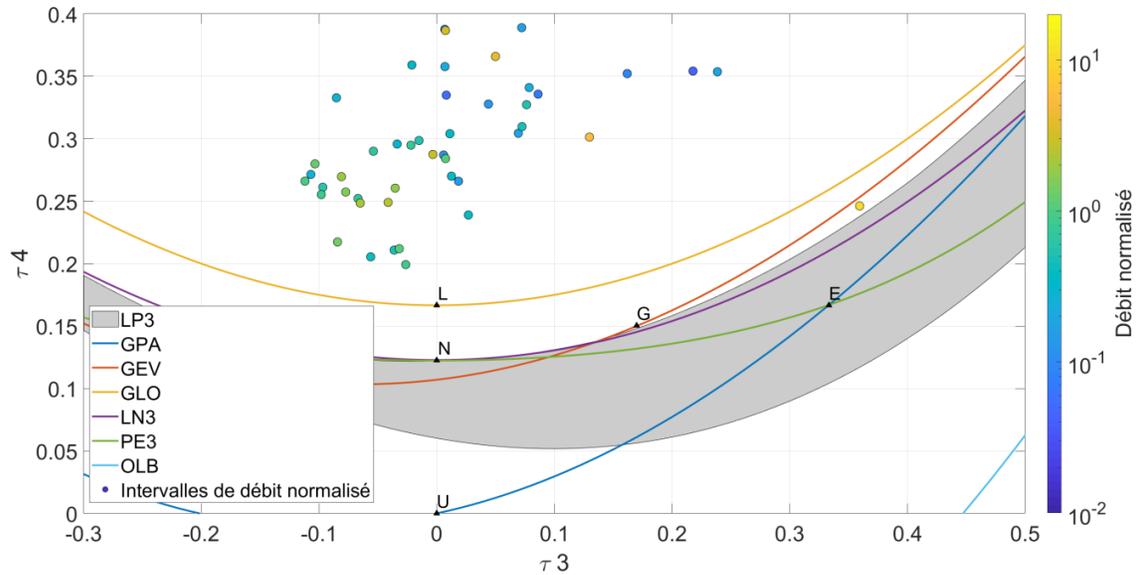


Figure 8.5 - Diagramme des L-moment  $\tau_3 - \tau_4$  des distributions des RR des 325 séquences retenues regroupées en 48 intervalles de débit normalisé. Le diagramme présente également les courbes  $\tau_3 - \tau_4$  pour les distributions suivantes à trois paramètres : logistique généralisée (*Generalized Logistic* – GLO), des valeurs extrêmes généralisées (*Generalized Extreme Value* – GEV), Pareto généralisée (*Generalized Pareto* – GPA), log normale (LN3), Pearson de type III (PE3). Les points correspondent aux distributions suivantes à deux paramètres : exponentielle (E), Gumbel (G), normale (N), logistique (L), uniforme (U). Le code de couleur à droite réfère à la valeur du débit normalisé de chacun des 48 intervalles du débit normalisé.

### 8.3.1 Biais moyens des résidus relatifs des séquences

Une analyse des biais des RR a d'abord été réalisée. Les moyennes des RR des 298 séquences sous étude ont été estimées et la distribution cumulative de ces biais moyens est présentée à la Figure 8.6. On observe que la distribution est centrée près de zéro et est symétrique autour de cette valeur. Plus de 97 % des séquences ont un biais compris entre -5% et +5%.

Le test de Student a été appliqué afin de vérifier que les biais moyens de chaque séquence ne sont pas significativement différents de zéro (seuil de 5%). Le test est rejeté pour trois séquences et ne permet pas de conclure que le biais moyen est nul dans ces cas. Le Tableau 8.1 dresse la liste de ces séquences et des SH correspondantes. Le biais moyen a été supposé nul pour toutes les séquences dans ce qui suit même lorsque le test de Student rejette cette hypothèse. Une analyse plus détaillée des trois séquences du Tableau 8.1 devra être réalisée. Les distributions des RR de ces séquences ont en général une skewness et un kurtosis très élevés, causés par un ou deux jaugeages ayant avec un RR beaucoup plus important que les autres.

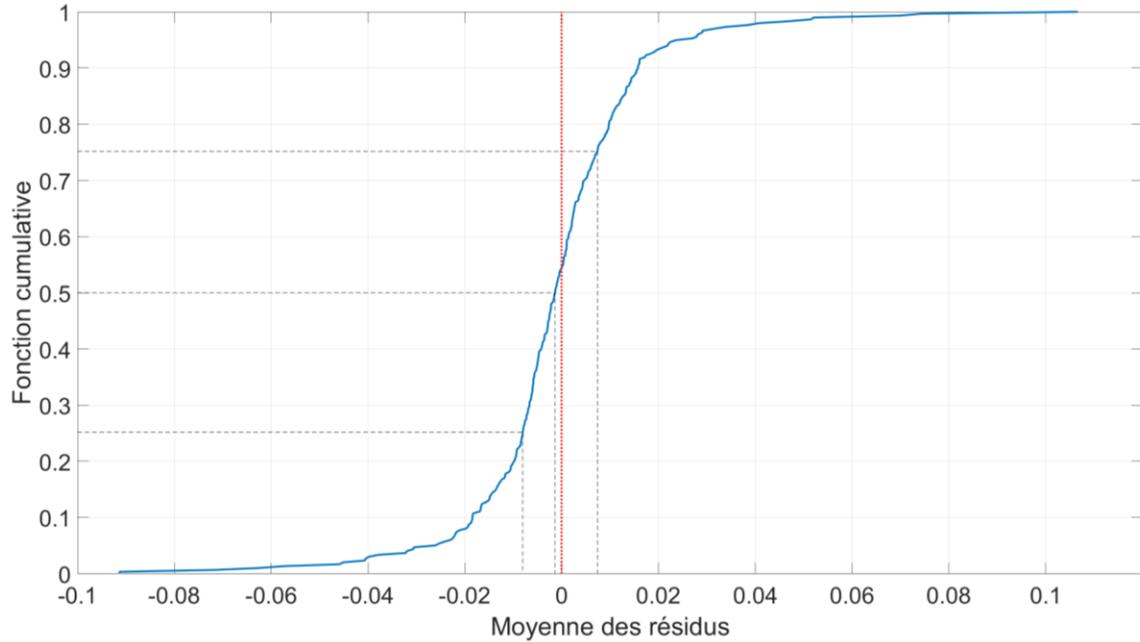
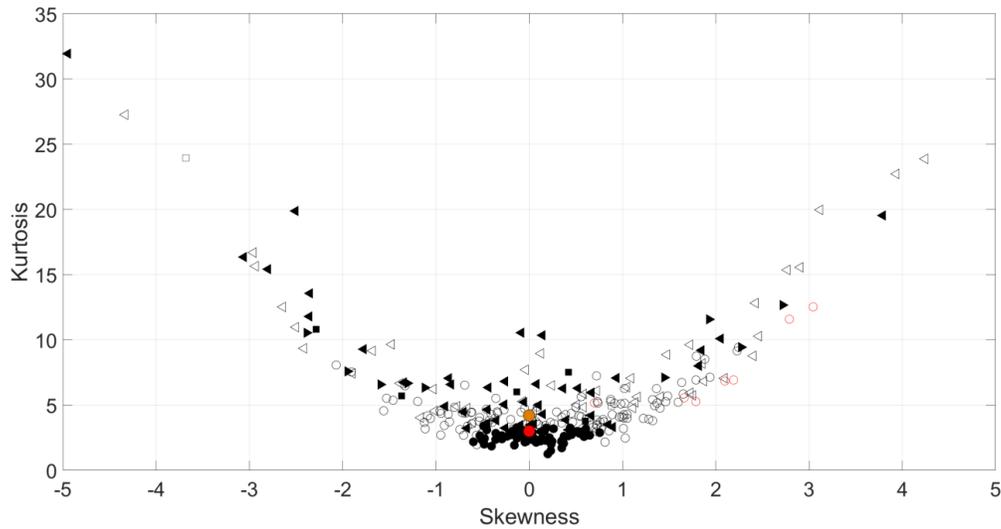


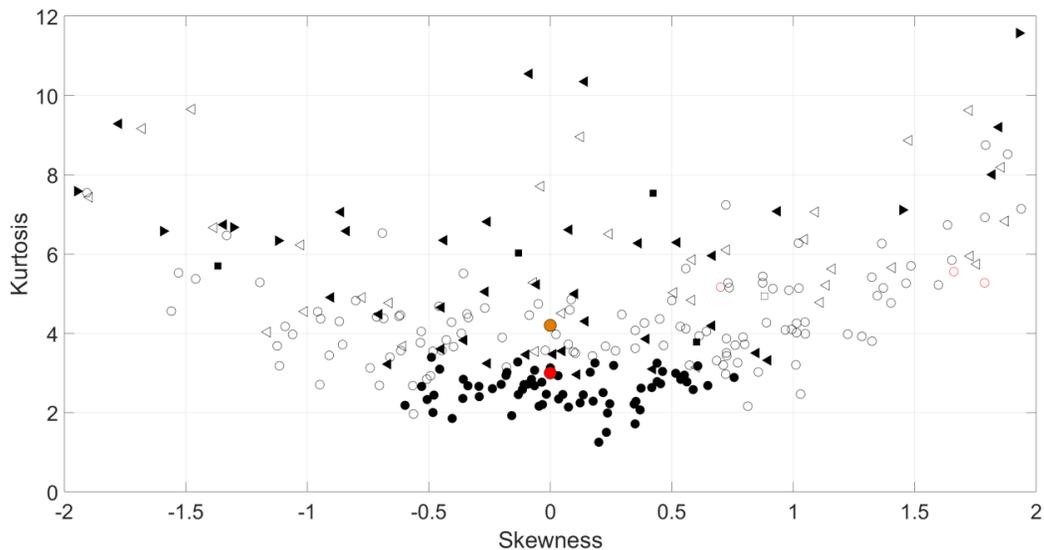
Figure 8.6 - Fonction cumulative des biais moyens des 298 séquences sous étude. Les lignes en tirets délimitent les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles de même que la médiane de la distribution. La ligne pointillé rouge correspond à une moyenne des RR nulle.

Tableau 8.1 - Séquences et SH où l'hypothèse d'un biais nul des RR est rejetée au seuil de 5%.

Numéro de la station hydrométrique	Nom de la station hydrométrique	Séquence	Biais (%)	Nombre de jaugeage de la séquence
030225	Saint-François	1972-1979	2.9	18
030343	Yamaska Nord	2006-2018	-7.2	49
050916	Des Hurons	2017-2019	-6.3	12



(a)



(b)

Figure 8.7 - a) Kurtosis et *skewness* des séries des résidus relatifs des séquences retenues et b) zoom sur la partie centrale ( $-2 < skewness < 2$ ). Le point rouge correspond aux valeurs de la distribution normale (*skewness* de zéro et kurtosis de 3) et le point orange aux valeurs de la distribution logistique (*skewness* de zéro et kurtosis de 4.2). Les différents symboles et couleurs désignent les différents modèles d'incertitude et les résultats de l'application du test de K-S aux modèles N-M1 et L-N1 ( $p\text{-value} > 0.05$  indique que le test rejette l'hypothèse que le modèle sélectionné représente adéquatement les distributions empiriques). La signification des différents symboles est la suivante : pleins : distribution N ; vides : distribution L ; N-M1 ( $p\text{-value} < 0.05$ ) : rond noir plein ; L-M1 ( $p\text{-value} < 0.05$ ) : rond noir vide ; L-M1 ( $p\text{-value} > 0.05$ ) : rond rouge vide ; N-M2 ( $\alpha_0 < 0$ ) : triangle noir plein pointant à gauche ; L-M2 ( $\alpha_0 < 0$ ) : triangle noir vide pointant à gauche ; N-M2 ( $\alpha_0 > 0$ ) : triangle noir plein pointant à droite ; L-M2 ( $\alpha_0 > 0$ ) : triangle noir vide pointant à droite ; N-M3 : carré noir plein ; L-M3 : carré noir vide.

### 8.3.2 Distributions retenues pour représenter les résidus relatifs

La Figure 8.7 présente les *skewness* et les *kurtosis* des RR des différentes séquences sous étude. Cette figure montre que les *skewness* de ces distributions sont concentrés autour de zéro et symétriques autour de cette valeur. Par ailleurs, on note que lorsque la *skewness* s'éloigne de zéro, le *kurtosis* augmente. Ces points seront discutés plus en détails dans les sections suivantes.

À la lumière de ces résultats, deux distributions sont considérées pour représenter les RR d'une séquence donnée : 1) la distribution normale ; 2) la distribution logistique (voir l'Annexe E pour une description de cette distribution). Ces deux distributions sont symétriques autour de la moyenne (coefficient d'asymétrie – *skewness* – nul) et présente un *kurtosis* de 3 pour la distribution normale et de 4.2 pour la distribution logistique (voir les points rouge et orange de la Figure 8.7). Rappelons que la distribution logistique est celle retenue par Coxon *et al.* (2015) pour représenter les écarts relatifs en fonction du débit normalisé (voir Section 8.2).

### 8.3.3 Modèles de dépendance des paramètres d'échelle en fonction du niveau

Les résultats précédents suggèrent que les RR peuvent être dans certains cas hétéroscédastiques et donc que le paramètre d'échelle des distributions dépendra du niveau. Les niveaux sont exprimés dans ce qui suit en termes de niveaux relatifs normalisés (NRN),  $h'$ , défini par :

$$h' = \frac{(h - h_{\min})}{(h_{\max} - h_{\min})}$$

avec  $h_{\min}$  et  $h_{\max}$  correspondant respectivement au PPNJ et au PGNJ de la séquence.

Quatre modèles sont considérés pour décrire cette dépendance des paramètres d'échelle en fonction du NRN ( $0 \leq h' \leq 1$ ),  $\sigma(h)$ , et utilisés pour représenter les incertitudes sur les débits relatifs :

$$\sigma_{M1}(h'; \sigma_1) = \sigma_1 \quad (8.3a)$$

$$\sigma_{M2d}(h'; \sigma_0, \sigma_1, \alpha_0) = \sigma_0 \exp(-\alpha_0 h') + \sigma_1 \quad (8.3b)$$

$$\sigma_{M2a}(h'; \sigma_1, \sigma_2, \alpha_2) = \sigma_2 \exp(\alpha_2 h') + \sigma_1 \quad (8.3c)$$

$$\sigma_{M3}(h'; \sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \alpha_0, \alpha_2) = \sigma_0 \exp(-\alpha_0 h') + \sigma_2 \exp(\alpha_2 h') + \sigma_1 \quad (8.3d)$$

Le paramètre d'échelle étant positif, tous les paramètres de ces modèles sont définis positifs. De plus on impose que le paramètre  $\sigma_1$  soit supérieur à une valeur  $\sigma_m = 2\%$  ( $\sigma_1 >$

$\sigma_m$ ). Cette dernière contrainte est imposée afin d'éviter des écarts-types indûment petits et irréalistes.

Le modèle M1 (équation 8.3a; 1 paramètre) correspond donc à une incertitude relative sur les débits indépendante du niveau (erreur homoscédastique). Le modèle M2 (équations 8.3b et 8.3c; 3 paramètres) correspond à une incertitude plus grande pour les petits niveaux jaugés (équation 8.3.b) ou plus grande pour les plus grands niveaux jaugés (équation 8.3.c). Enfin le modèle M3 (équation 8.3d; 5 paramètres) permet de représenter la situation où les incertitudes sur les niveaux les plus élevés et les plus faibles sont plus importantes que celles des niveaux intermédiaires (écarts-types en forme de U). La Figure 8.8 donne une représentation schématique de ces différents modèles.

### 8.3.4 Modèles d'incertitudes considérés

Les modèles d'incertitude possibles ont été construits en combinant les deux distributions, normale (N) et logistique (L), et les quatre modèles décrivant la dépendance du paramètre d'échelle, M1, M2d, M2a et M3. Ces modèles sont représentés sous la forme X-My où X désigne la distribution considérée, X= N pour la distribution normale ou X = L pour la distribution logistique, et où y = M1, M2d, M2a ou M3 selon le modèle retenu pour le paramètre d'échelle de la distribution. Le paramètre de position de ces deux distributions est fixé à zéro ce qui correspond à un biais nul (voir Section 8.3.1). Un total de huit modèles d'incertitudes a donc été considéré : 1) N-M1; 2) N-M2d; 3) N-M2a; 4) N-M3; 5) L-M1; 6) L-M2d; 7) L-M2a; 8) L-M3.

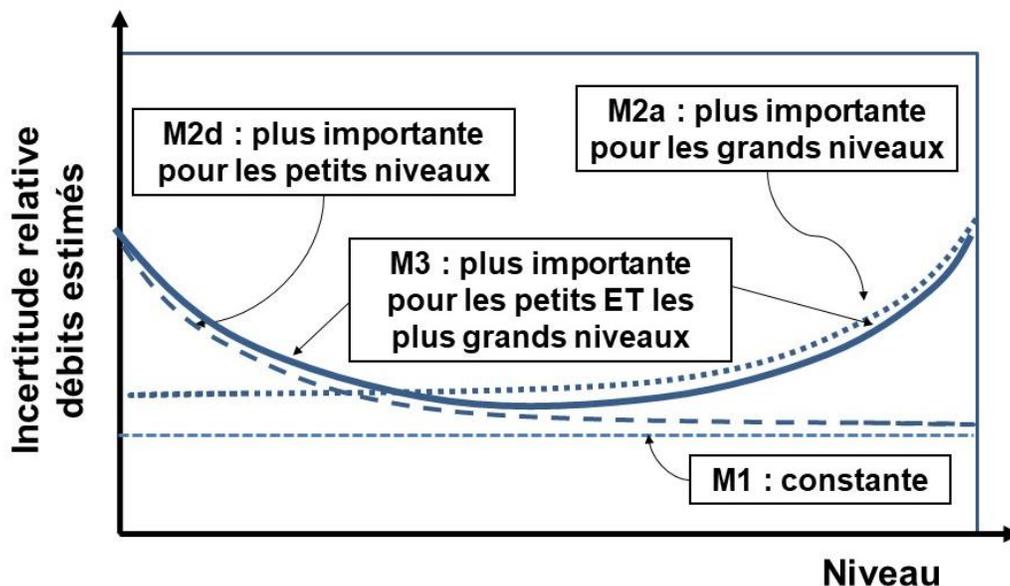


Figure 8.8 - Modèles considérés pour représenter la dépendance des incertitudes relatives sur les débits estimés en fonction du niveau : M1 : incertitude relative constante (équation 8.3a); M2d : incertitude relative plus importante pour les petits niveaux ; M2a : incertitude relative plus importante pour les grands niveaux ; M3 : incertitude relative plus importante pour les petits et les grands niveaux.

## 8.4 Modèles d'incertitudes sélectionnés

Les fonctions de vraisemblance des RR de chaque séquence ont été estimées et maximisées pour chacun des modèles d'incertitudes considérés. Les résultats de chaque modèle ont été comparés en utilisant le critère BIC (*Bayesian information criterion*) défini par :

$$\text{BIC} = k \ln n - 2 \ln \hat{\mathcal{L}} \quad (8.4)$$

où  $k$  est le nombre de paramètre du modèle (1 pour M1, 3 pour M2d et M2a et 5 pour M3),  $n$  le nombre de jaugeages disponibles pour ajuster le modèle et  $\hat{\mathcal{L}}$  le maximum de la fonction de vraisemblance après optimisation. Le modèle d'incertitude avec le plus petit BIC a été sélectionné pour chaque séquence.

Le Tableau 8.2 présente une synthèse des résultats aux 298 séquences sous étude. On constate que la distribution logistique est préférée à la distribution normale pour une majorité de séquences (59.4% pour la distribution logistique contre 40.6% pour la distribution normale). De plus le modèle M1 (incertitude relative constante) a été sélectionné pour 64.1% des séquences alors que le modèle M2d a été sélectionné pour 30.5% des séquences. Les modèles M2a et M3 n'ont été sélectionnés que pour 3.0% et 2.4% des séquences respectivement. Ainsi le modèle homoscédastique a été préféré aux modèles hétéroscédastiques pour une majorité de séquences. L'Annexe E dresse la liste des modèles d'incertitudes sélectionnés et présente les valeurs des paramètres de ces modèles. Le fait que les modèles homoscédastiques (N-M1 et L-M1) aient été préférés dans une majorité de cas montre que la représentation des incertitudes sous forme de RR est appropriée et reflète dans une vaste majorité de cas les incertitudes sur les mesures de débits (ce point est abordé plus en détails à la Section 8.4.1).

La Figure 8.9 présente les fonctions cumulatives du nombre de jaugeages des séquences associées aux différents modèles. On constate que le modèle M1, si on omet le modèle M2a qui demeure marginal, est plus souvent sélectionné lorsque le nombre de jaugeages des séquences est plus faible et que les modèles M2d et M3 sont plus fréquemment sélectionnés lorsque le nombre de jaugeages augmente. Ce résultat est aussi présent dans le Tableau 8.3 où l'on constate que le nombre moyen de jaugeages des modèles N-M1 et L-M1 est inférieur aux nombres moyens de séquences des autres modèles si on omet le modèle N-M2a. Ce résultat est cohérent avec le fait que la gamme de niveaux et de débits augmente avec le nombre de jaugeages, augmentant les probabilités d'atteindre les conditions d'écoulement plus extrêmes tant en conditions d'étiage que de crues où la CT n'est plus représentative de la relation niveau-débit. Toutefois certaines séquences comportant un grand nombre de jaugeages sont également bien représentées par le modèle M1.

Tableau 8.2 - Nombre de séquences (pourcentages), nombres minimal, maximal et moyen de jaugeage par séquence selon le modèle d'incertitude sélectionné.

Modèle d'incertitude	Nombre de séquences (%)	Nombre minimal de jaugeages	Nombre maximal de jaugeages	Nombre moyen de jaugeages
N-M1	64 (21.5)	10	74	26.3
N-M2d	43 (14.4)	15	133	42.7
N-M2a	9 (3.0)	14	53	22.4
N-M3	5 (1.7)	23	53	37.2
<b>TOTAL</b>	<b>121 (40.6)</b>			
L-M1	127 (42.6)	10	97	26.8
L-M2d	48 (16.1)	11	127	38.3
L-M2a	0 (0.0)	-	-	-
L-M3	2 (0.7)	19	38	28.5
<b>TOTAL</b>	<b>177 (59.4)</b>			

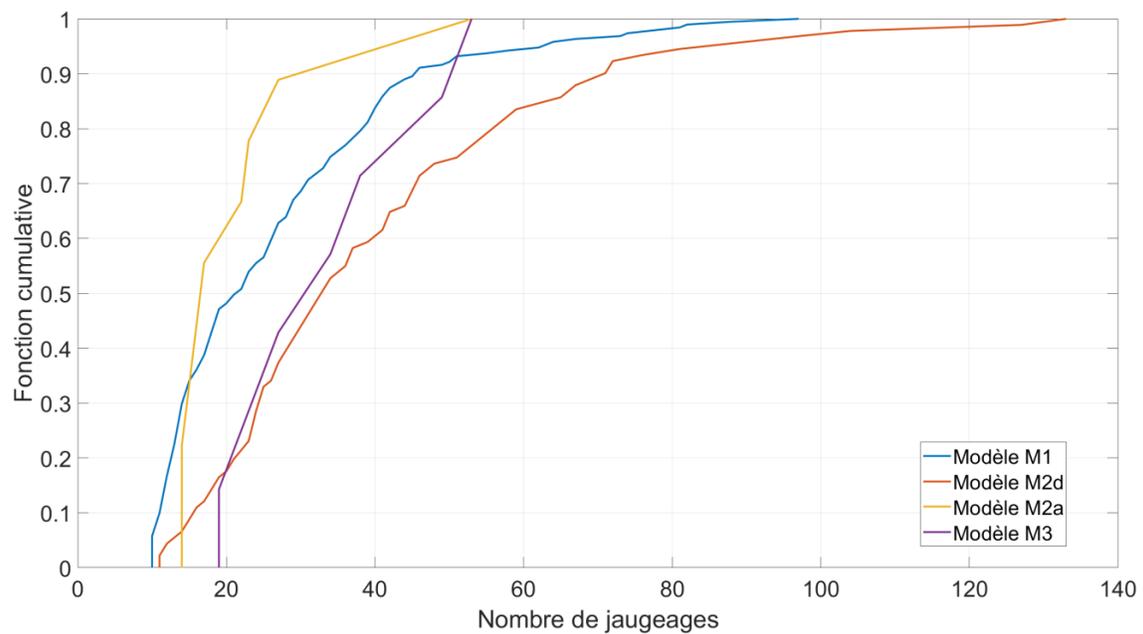


Figure 8.9 - Fonctions cumulatives du nombre de jaugeages des séquences associées aux modèles M1, M2d, M2a et M3.

### 8.4.1 Modèle d'incertitudes M1

Le modèle M1 suppose une distribution homoscédastique des RR et a été retenu pour 64.1% des séquences (voir le Tableau E.1 de l'Annexe E pour la liste des CT où ce modèle a été sélectionné de même que les valeurs des paramètres pour chaque CT).

Les modèles N-M1 et L-M1 ont donc été soumis au test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (seuil de 5%) afin de vérifier l'hypothèse que la distribution retenue représentait adéquatement la distribution empirique des RR de ces séquences. Le test de K-S rejette l'hypothèse que la distribution retenue, ici la distribution logistique dans tous les cas, représente la distribution empirique pour sept séquences indiquées par les cercles rouges à la Figure 8.7 (Tableau 8.3).

Un test afin de vérifier la normalité des distributions des RR (test de Shapiro-Wilk) a par ailleurs été appliqué aux 64 séquences où le modèle N-M1 a été sélectionné (seuil de significativité de 5%). Le test de normalité a été rejeté dans trois cas.

Les distributions des écart-types (ET) des modèles N-M1 et L-M1 se trouvent à la Figure 8.10. Pour les séquences où le modèle d'incertitude N-M1 a été sélectionné, l'ET moyen des RR est d'environ 5.5% et dans tous les cas l'ET est de moins de 14%. Dans le cas où le modèle L-M1 est retenu, les ET des RR sont plus élevés, en moyenne environ 6.5% et peuvent atteindre 25%. La Figure 8.11 montre finalement trois exemples de CT avec leurs intervalles 2.5% et 97.5%.

Tableau 8.3 - Séquences et SH où le test de K-S rejette l'hypothèse que la distribution empirique des RR correspond au modèle d'incertitude retenu au seuil de 5%. La distribution logistique a été retenue pour toutes ces séquences.

Numéro de la station hydrométrique	Nom de la station hydrométrique	Période	Nombre de jaugeages	Écart-type (%)
020404	York	1981-1992	32	9.7
030353	Yamaska	2015-2020	19	5.1
046709	du Chêne	2017-2020	15	11.2
050812	Aux Pommes	1987-1998	34	3.9
050812	Aux Pommes	1998-2007	29	6.0
052805	Du Loup	1966-2019	81	3.6
061909	Aux Saumons	1995-2006	14	9.3

## 8.4.2 Modèles d'incertitudes M2

Les modèles M2 reposent sur l'hypothèse que la distribution des RR peut être représentée par une distribution normale ou logistique hétéroscedastique avec un paramètre d'échelle décrit par les équations 8.3b ou 8.3c. Le modèle M2d, correspondant à des incertitudes relatives plus importantes pour les petits débits, a été sélectionné pour une vaste majorité de cas. La Figure 8.12 présente l'évolution des ET en fonction du niveau relatif normalisé des cas où le modèle M2d a été sélectionné alors que la Figure 8.13 présente les résultats pour le modèle M2a. Ces deux figures montrent clairement l'évolution des ET en fonctions des niveaux relatifs normalisés. Enfin la Figure 8.14 montre trois exemples de CT avec leurs intervalles d'incertitudes (2.5% - 97.5%) où les modèles N-M2d (Figure 8.14a), L-M2d avec une RH (Figure 8.14b), L-M2D avec deux RH (Figure 8.14c) et N-M2a (Figure 8.14d) ont été sélectionnés.

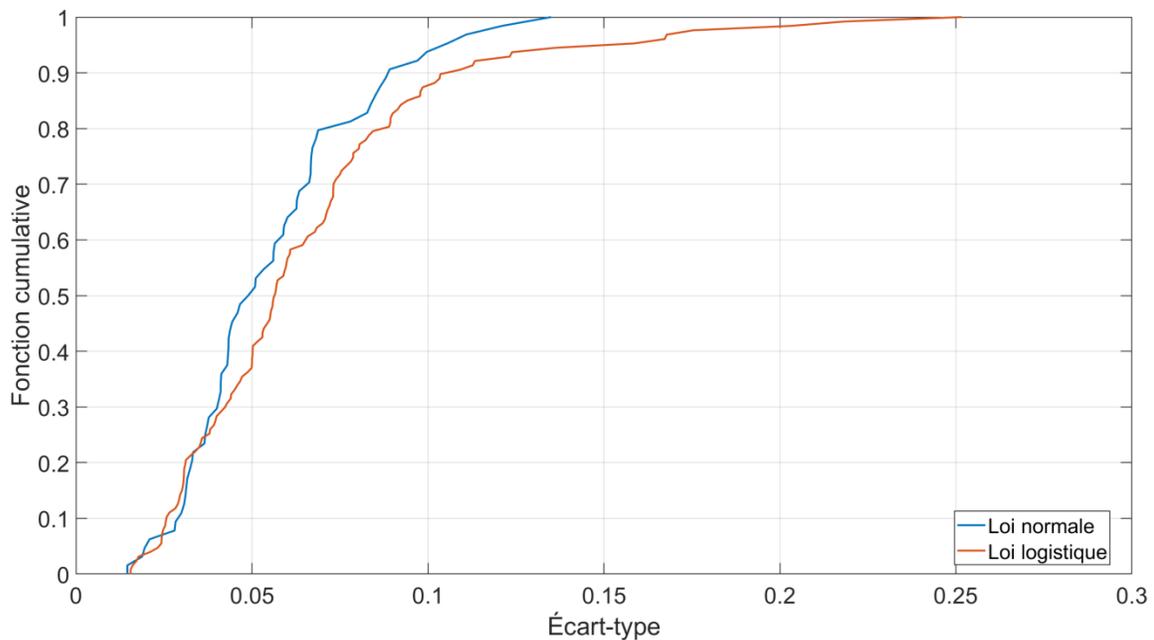


Figure 8.10 - Fonctions cumulatives des ET des distributions des RR pour les 64 séquences où le modèle N-M1 a été retenu (en bleu) et les 127 séquences où le modèle L-M1 a été retenu (en rouge).

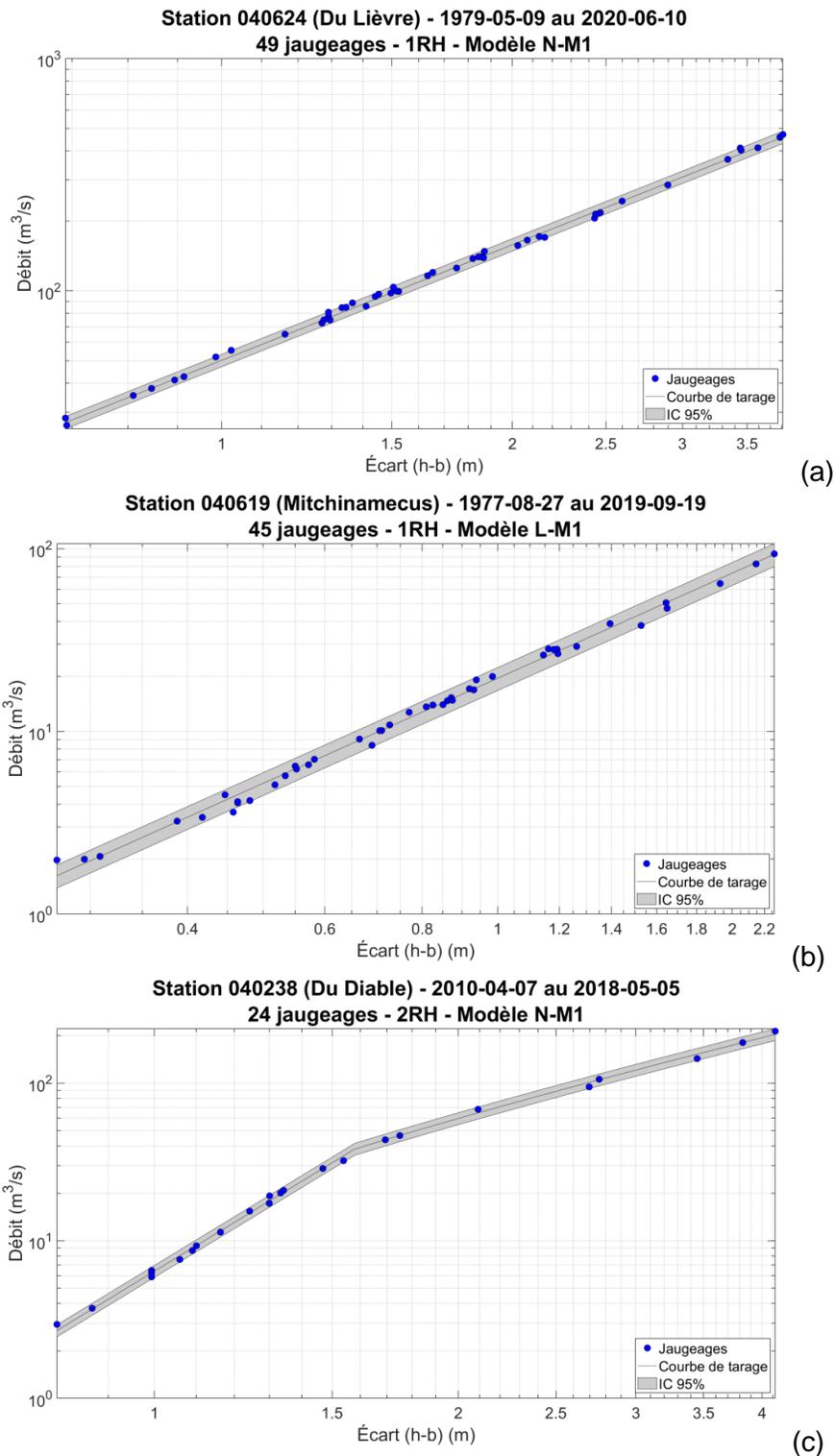


Figure 8.11 - CT et intervalles 2.5-97.5% des stations : a) Du Lièvre (040624) couvrant la période du 9 mai 1979 au 10 juin 2020 (49 jaugeages) et représentée par une RH et le modèle d'incertitude N-M1 (écart-type de 3.1%) ; b) Mitchicamecus (040619) couvrant la période du 27 août 1977 au 19 septembre 2019 (45 jaugeages) et représentée par une RH et le modèle d'incertitude L-M1 (écart-type de 3.9%) ; c) Du Diable (040238) couvrant la période du 7 avril 2010 au 5 mai 2018 (24 jaugeages) et représentée par deux RH et le modèle d'incertitude N-M1 (écart-type de 4.4%). A noter les échelles logarithmiques en ordonnée et en abscisse. Le niveau est exprimé en fonction de la différence entre le niveau et le niveau de référence  $b$  de la RH obtenue après ajustement de la CT.

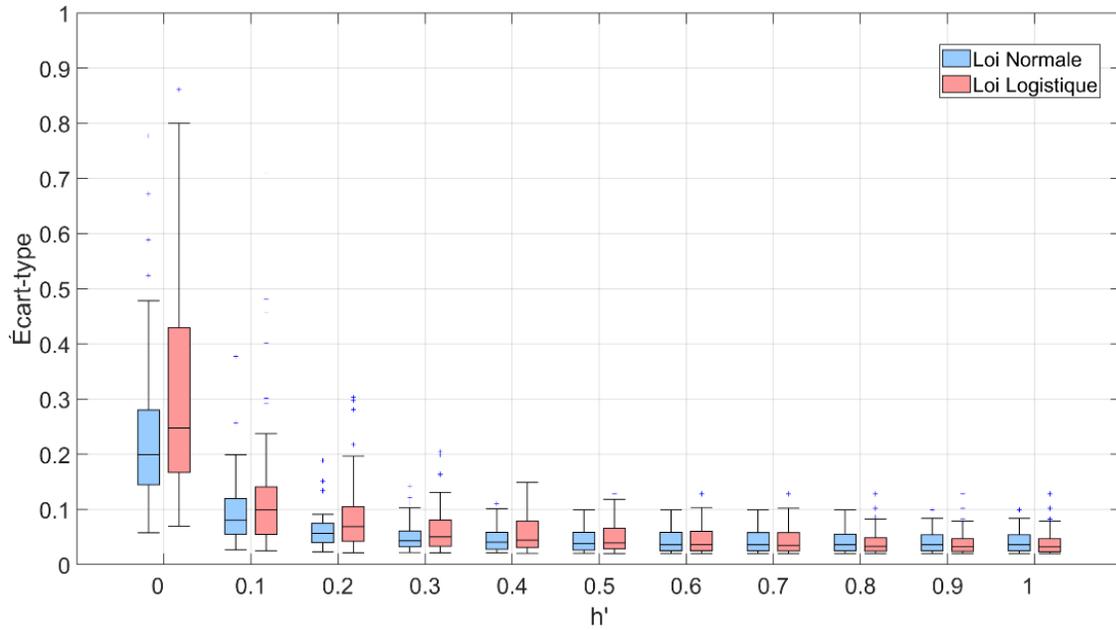


Figure 8.12 - Box plots des écarts-types des 43 séquences où le modèle N-M2d (en bleu) et des 48 séquences où le modèle L-M2d (en rose) ont été sélectionnés en fonction du niveau relatif normalisé  $h'$ .

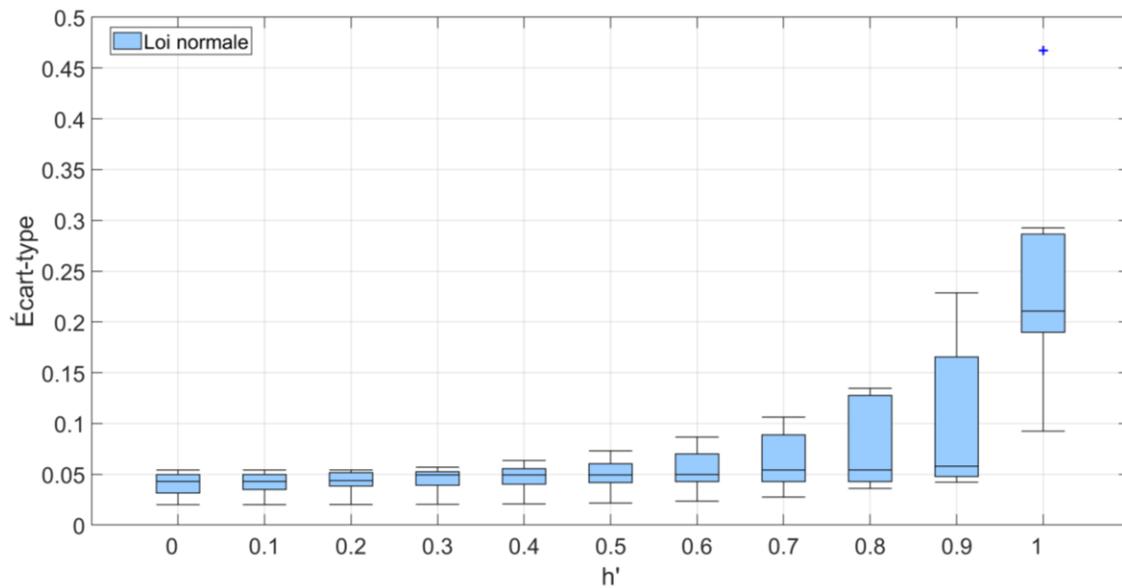
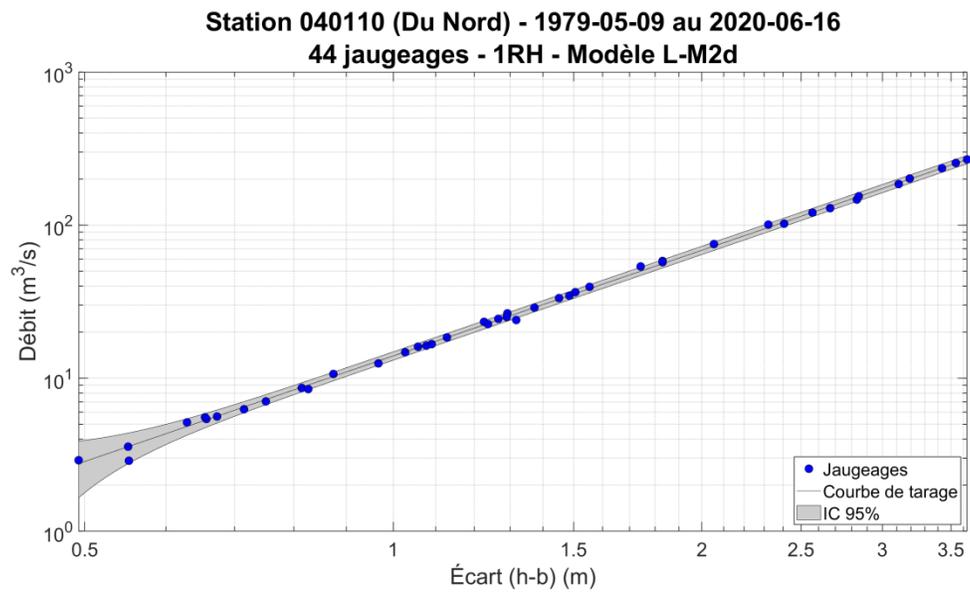
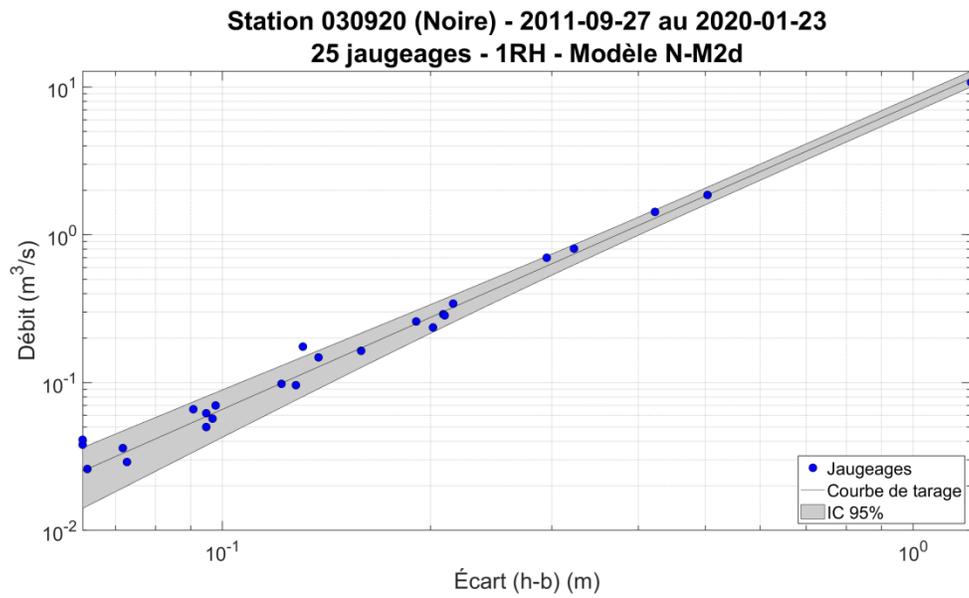


Figure 8.13 - Box plots des écarts-types des 9 séquences où le modèle N-M2a a été retenu en fonction du niveau relatif normalisé  $h'$ .



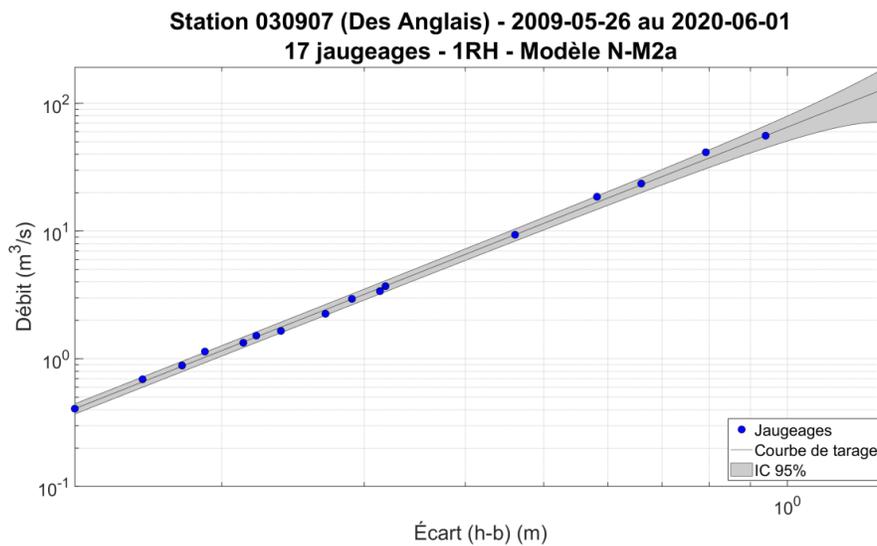
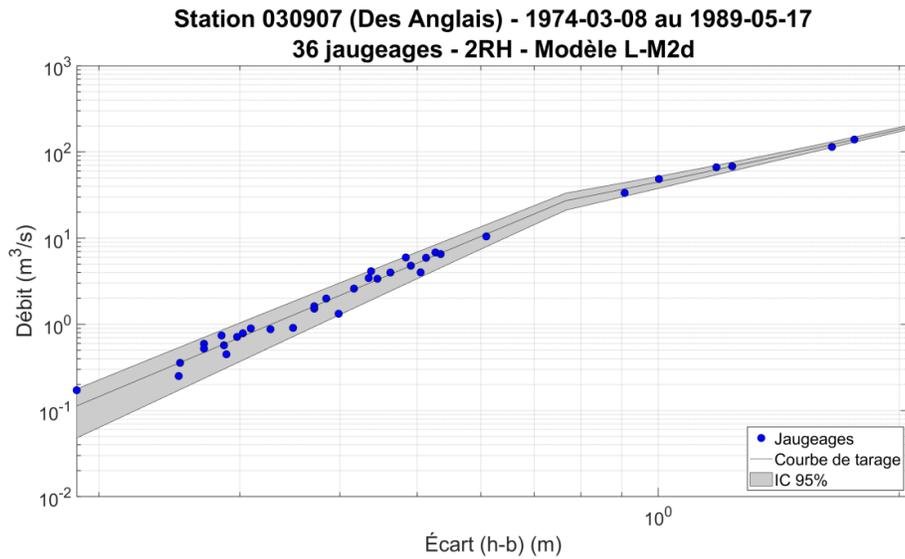


Figure 8.14 - CT et intervalles 2.5-97.5% des stations : a) Noire (030920) couvrant la période du 27 septembre 2011 au 23 janvier 2020 (25 jaugeages) et représentée par une RH et le modèle d'incertitude N-M2d (écart-type de 22.5% pour le PPNJ et de 6.3% pour le PGNJ) ; b) Du Nord (040110) couvrant la période du 9 mai 1979 au 16 juin 2020 (44 jaugeages) et représentée par une RH et le modèle d'incertitude L-M2d (écart-type de 19.9% pour le PPNJ et de 3.1% pour le PGNJ) ; c) Des Anglais (030907) couvrant la période du 8 mars 1974 au 17 mai 1989 (36 jaugeages) et représentée par deux RH et le modèle d'incertitude N-M2d (écart-type de 28.5% pour le PPNJ et de 2.8% pour le PGNJ) ; d) Des Anglais (030907) couvrant la période du 26 mai 2009 au 1 juin 2020 (17 jaugeages) et représentée par une RH et le modèle d'incertitude N-M2a (écart-type de 4.7% pour le PPNJ et de 23.4% pour le PGNJ). A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l'écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.

### 8.4.3 Modèles d'incertitudes M3

Le dernier modèle combine les deux modèles M2 et suppose des incertitudes relatives plus importantes pour les plus petits et les plus grands débits estimés. La Figure 8.15 présente l'évolution des ET en fonction du niveau relatif normalisé des sept séquences où ce modèle a été sélectionné. On constate que les ET peuvent être très importants dans certains cas, de l'ordre de 100% pour les petits débits alors que les ET pour la partie des forts débits sont de l'ordre de 20 à 60% pour plusieurs séquences.

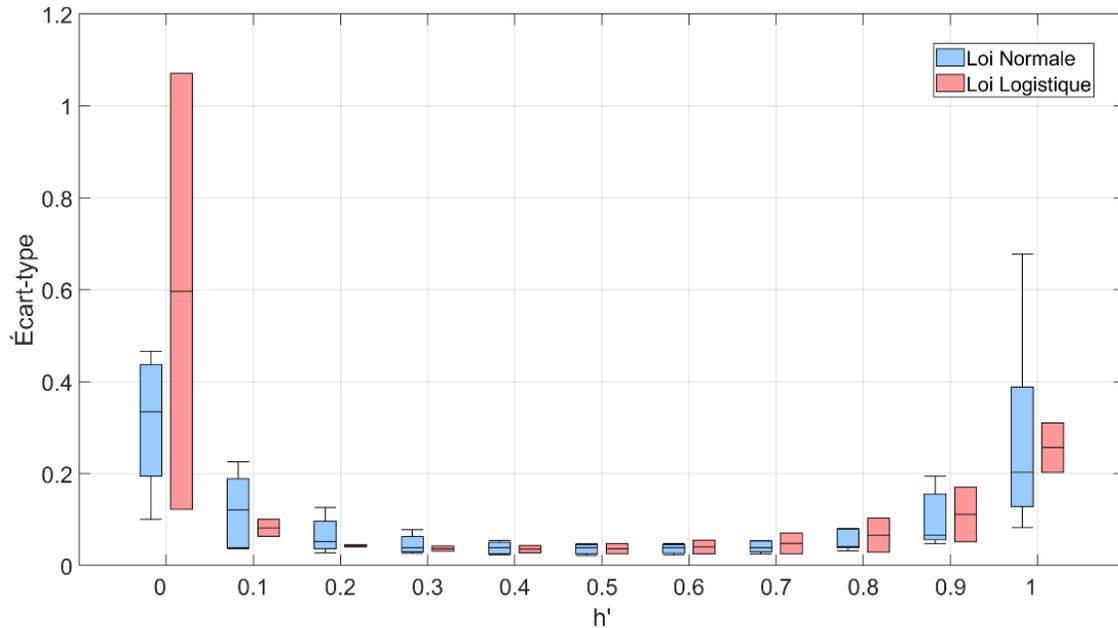


Figure 8.15 - Box plots des écarts-types des cinq séquences où le modèle N-M3 a été sélectionné (en bleu) et des deux séquences où le modèle L-M3 a été sélectionné (en rose) en fonction du niveau normalisé  $h'$ .

La Figure 8.16 montre deux exemples de CT où le modèle M3 a été sélectionné. On voit que la sélection du modèle M3 peut conduire à une augmentation des incertitudes relatives pour permettre un ajustement lorsque les incertitudes sur le PGNJ ou le PPNJ sont plus élevées comme pour la station Portneuf (Figure 8.16b). Plusieurs des séquences où le modèle M3 a été sélectionné présente ce type de comportement qui pourrait suggérer une modification de la CT et du type de contrôle près du PGNJ. Ces cas spécifiques sont présentés et discutés à la Section 8.4.4.

#### 8.4.4 Cas spéciaux

Un examen de toutes les CT et des incertitudes estimées a permis de recenser un certain nombre de cas, dont la liste apparaît au Tableau 8.4, pour lesquels les modèles d'incertitude sont apparemment problématiques. Les CT correspondantes sont présentées à l'Annexe G.

Comme l'indique le Tableau 8.4, tous les cas problématiques sont associés aux modèles M2 ou M3. Dans les cas où le modèle M3 est considéré (Bulstrode, Yamaska Nord, À l'Ours), les intervalles de confiance s'élargissent indûment pour les grands ou les petits niveaux afin d'augmenter la vraisemblance de jaugeages relativement éloignés de la CT.

Pour la CT de la station Bulstrode (030106), un jaugeage à un niveau très nettement inférieur aux autres niveaux jaugés ( $10^{-2}$  m vs  $10^{-1}$  m) explique ce 'décrochage'. D'autres jaugeages à faible niveau seraient donc nécessaires pour confirmer la forme de la CT pour les jaugeages de niveaux inférieurs à  $10^{-1}$  m. Autrement les incertitudes sont très bien réparties autour de la CT estimée et le modèle M1 serait sans doute approprié.

Tableau 8.4 - Stations et CT pour lesquelles le modèle d'incertitude est problématique.

Nom de la station	Numéro de la station	Période couverte par la CT	Nombre de jaugeages	Modèle d'incertitude retenu
Bulstrode	030106	19/04/1982 au 05/03/2004	38	L-M3
Yamaska Nord	030343	24/01/2006 au 24/10/2018	49	N-M3
Yamaska	030351	14/10/2005 au 26/09/2013	27	L-M2d
À l'Ours	030429	25/07/2006 au 25/06/2020	34	N-M3
Magpie	073503	04/10/1978 au 13/08/2019	26	L-M2d
Natashquan	074903	08/06/1980 au 18/08/2019	27	N-M2a

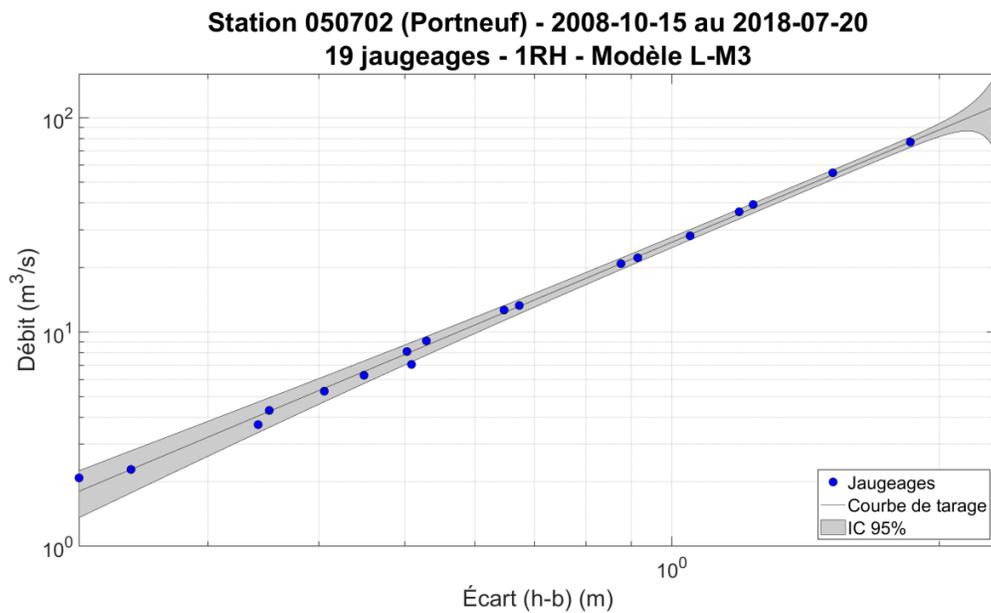
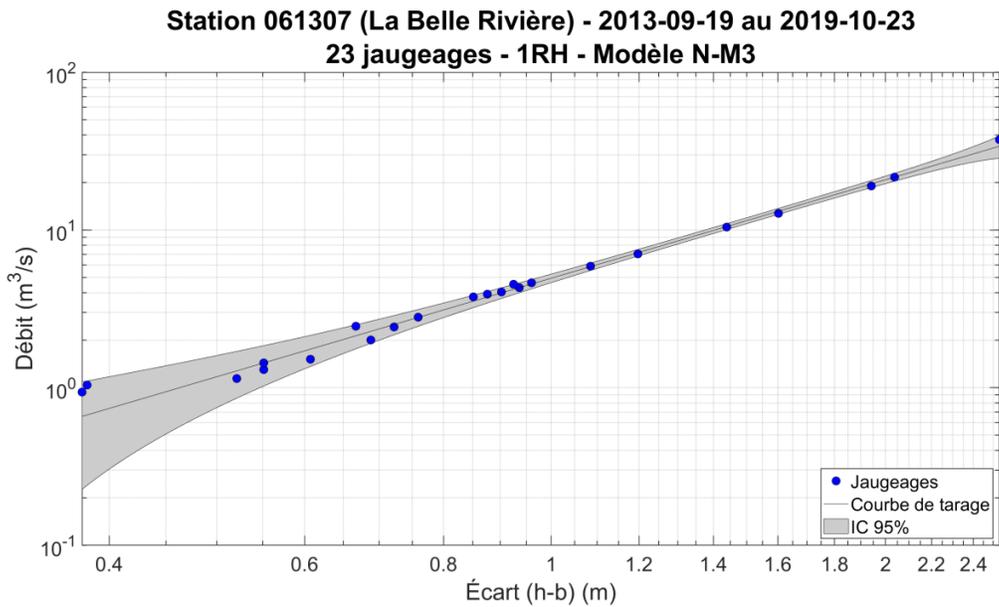


Figure 8.16 - CT et intervalles 5-95% pour les CT des stations : a) Belle Rivière (061307) couvrant la période du 19 septembre 2013 au 23 octobre 2019 (23 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d'incertitude N-M3 (écart-type de 33.4% pour le PPNJ et de 8.3% pour le PGNJ) ; b) Portneuf (050702) couvrant la période du 15 octobre 2008 au 20 juillet 2018 (19 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d'incertitude L-M3 (écart-type de 12.2% pour le PPNJ et de 20.3% pour le PGNJ). A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l'écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.

De même pour la station Yamaska Nord (030343) où cette fois un jaugeage au niveau d'environ  $4 \times 10^{-3}$  m s'écarte sensiblement de la CT. Un examen plus attentif de ce jaugeage devrait être mené par la DEH afin de voir s'il devrait être intégré à la courbe. L'élimination de ce jaugeage entraînerait une révision de la CT et du modèle d'incertitude. Il convient enfin de noter que les débits jaugés à cette station sont relativement petits (moins de  $10 \text{ m}^3/\text{sec}$ ).

Enfin pour le cas de la station À l'Ours, on note un apparent 'décrochage' de la CT pour les petits niveaux, 'décrochage' qui n'aurait pas été détecté par le 'run test' (p-value de 1) de même que pour le PGNJ qui se situe à un niveau nettement supérieur. D'autres jaugeages en conditions de faibles et de grands niveaux permettront sans doute de clarifier la forme de la CT sous ces conditions.

Deux des autres cas répertoriés au Tableau 8.4 concernent le modèle M2d (stations Yamaska et Magpie). Pour la station Yamaska (Figure G.3), un examen plus attentif de la série temporelle des RR montre clairement que les derniers jaugeages intégrés à cette CT se distinguent par des RR plus importants et négatifs (voir Figure 8.17). La p-value du test de Pettitt est dans ce cas de 0.057 expliquant pourquoi cette rupture n'a pas été détectée. Une analyse plus attentive de ces jaugeages et des séquences avant et après le point de rupture potentiel devrait donc être entreprise afin de décider des jaugeages qui devraient être considérés pour la construction des CT couvrant ces périodes.

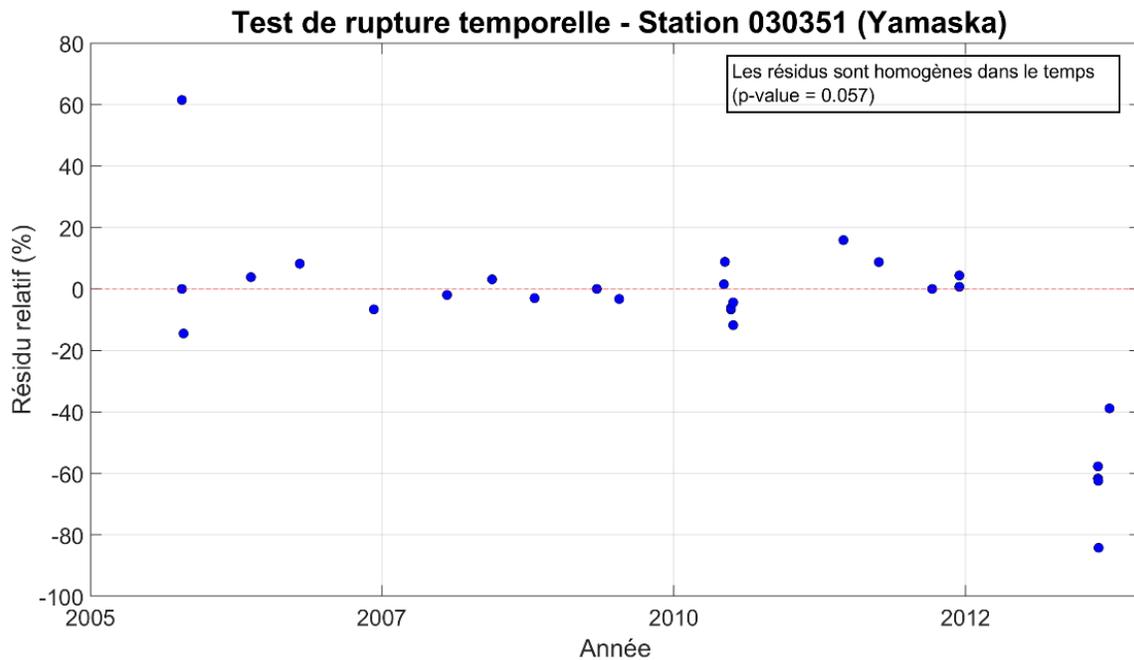


Figure 8.17 - Série temporelle des RR de la station Yamaska (030351).

L'examen de la CT de la station Magpie (Figure G.5) mets en évidence l'existence d'un décrochage important pour le PPNJ qui entraîne la sélection d'un modèle d'incertitude 'extrême' afin d'augmenter la vraisemblance de ce PPNJ. Un examen plus attentif de ce jaugeage devrait être entrepris afin de vérifier s'il y a toujours lieu de le considérer pour la construction de la CT. En effet le débit estimé pour ce PPNJ est supérieur au deuxième plus petit niveau jaugé. A noter que les débits à cette station sont relativement importants par rapport aux autres cas problématiques recensés au Tableau 8.4.

## 8.5 Incertitudes sur les courbes de tarage en interpolation et en extrapolation

La section précédente a permis d'estimer les RR, et donc les erreurs relatives, sur les débits estimés en considérant l'ensemble des jaugeages des séquences retenues. Ces erreurs relatives ne concernent toutefois que la partie interpolée de la CT, c.-à-d. les niveaux qui se trouvent entre le plus grand (PGNJ) et le plus petit niveau jaugé (PPNJ; Figure 8.18). On peut cependant s'interroger sur la représentativité de la CT et les incertitudes associées pour les valeurs extrapolées, c.-à-d. lorsque l'on veut estimer un débit associé à un niveau supérieur au PGNJ ou inférieur au PPNJ. Les analyses de la Section 5.5 ont par ailleurs montrées que les CT sont très souvent utilisées en mode 'extrapolation'. Ainsi dans plus de la moitié des cas, le PGNJ correspond au niveau mesuré de périodes de retour (PDR) 2 ans ou moins et dans seulement 11 des cas il correspond au niveau mesuré de PDR 25 ans ou plus.

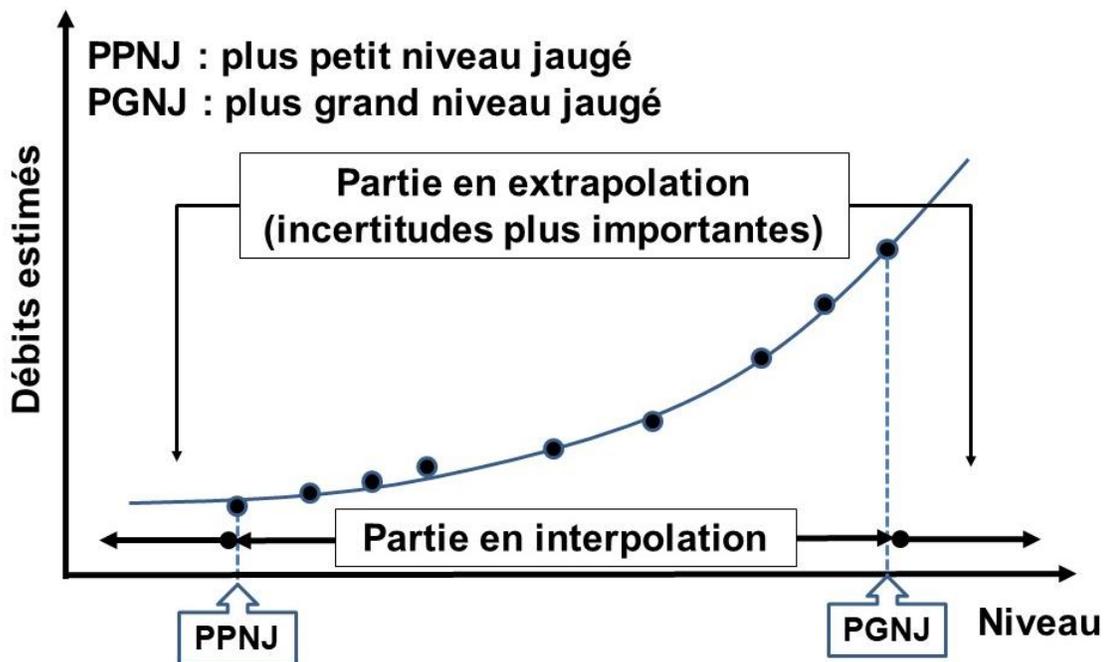


Figure 8.18 - Parties en interpolation et en extrapolation de la CT.

L'utilisation de la CT dans les parties extrapolées repose donc sur l'hypothèse que la relation niveau-débit de la partie interpolée peut être 'extrapolée' à ces gammes de niveau pour lesquels aucun jaugeage n'a été réalisé. A défaut d'information supplémentaire, il faut donc s'appuyer sur cette hypothèse pour l'estimation des débits associés à des niveaux supérieurs au PGNJ ou inférieurs au PPNJ qui seront déterminés à partir de la représentation de la CT disponible qu'elle soit issue de splines cubiques ou d'une RH.

Cette hypothèse pourra toutefois être mise à mal advenant un changement important de la forme de la section ou du type de contrôle (voir Figure 3.1). Il pourra dès lors s'avérer utile si l'on dispose d'une information même qualitative sur la section de contrôle, de pouvoir utiliser cette information pour mieux baliser l'utilisation de CT dans les parties extrapolées.

### 8.5.1 Niveaux critiques aux sections de contrôle

Les profils de 92 sections de contrôle ont ainsi été analysés. Les niveaux critiques (NC) à ces sections de contrôle, correspondant aux niveaux où surviennent des changements majeurs de la forme de ces profils, ont été identifiés. La Section 9.1 du Chapitre 9 décrit les données utilisées à cette fin et explique la procédure utilisée pour déterminer ces NC. Ces NC sont donc associés à toutes les CT d'une SH donnée.

Des 92 SH pour lesquels on dispose de profils, 90 ont été considérées dans les analyses suivantes. En effet, 7 des 93 SH initiales comptent une séquence qui, pour diverses raisons, n'ont pas été intégrées aux analyses précédentes et devront faire l'objet d'analyse ultérieure (voir Tableau 7.5 du Chapitre 7). Ces SH et ces séquences sont présentées au Tableau 8.5. De ces SH, deux ne comptent qu'une seule séquence (022507 et 030425) et ne seront donc pas analysées dans ce qui suit. Les séquences 'valides' aux 90 SH restantes seront considérées pour un nombre total de 189 séquences. Le nombre de jaugeages pour chacune de ces séquences varie de 7 à 133 jaugeages.

Tableau 8.5 - Liste des SH et des séquences (en gras) qui ne sont pas considérées dans les analyses sur les niveaux critiques.

Numéro de la station	Nom de la station	Nombre de jaugeages par séquence	Catégorie de la séquence éliminée
023429	Chaudière	[50; <b>29</b> ]	(A2, B3)
<b>030425</b>	<b>De la Roche</b>	<b>49</b>	(A2, B3)
<b>022507</b>	<b>Du Loup</b>	<b>90</b>	(A2, B5)
050807	Ontaritzi	[35; <b>15</b> ]	(A2, B5)
120201	Dauphine	[38;27;28; <b>44</b> ;53]	(A2, B5)
010802	Bonaventure	[29;10;24;17; <b>13</b> ;14]	(A3, B2)
030220	Massawippi	[44; <b>15</b> ;29]	(A3, B2)

Tableau 8.6 - Nombre de SH selon le nombre de NC et le nombre de séquences disponibles.

Nombre de NC	Nombre de séquences					TOTAL
	1	2	3	4	5 et plus	
1	12	1	3	4	2	22
2	18	9	2	4	4	37
3	17	9	2	2	2	32
TOTAL	47	19	7	10	8	91

Le Tableau 8.6 présente le nombre de SH selon le nombre de séquences et de NC disponibles. On constate que le nombre de NC aux stations varie de 1 à 3 et qu'une majorité de SH avec des NC ne compte qu'une ou deux séquences. Ainsi 47 des 92 SH où l'on dispose de NC ne comptent qu'une seule séquence.

Pour la suite des analyses, on désigne par NC1, NC2 et NC3 le 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> NC à une station donnée. Ces NC sont ordonnés par ordre croissant NC1 < NC2 < NC3. Les analyses qui suivent ne concernent toutefois que le premier niveau critique NC1.

Le NC1 normalisé, NCN1, est défini de la façon suivante :

$$NCN1 = \frac{(NC1 - PPNJ)}{(PGNJ - PPNJ)} \quad (8.4)$$

On a donc :

$$NCN1 \leq 0 \text{ si } NC1 \leq PPNJ \quad (8.5a)$$

$$0 < NCN1 \leq 1 \text{ si } PPNJ < NC1 \leq PGNJ \quad (8.5b)$$

$$1 < NCN1 \text{ si } PGNJ < NC1 \quad (8.5c)$$

### 8.5.2 Comparaison PPNJ, PGNJ et NC1

Le NC1 a été comparé aux PPNJ et au PGNJ de chaque séquence aux 90 SH retenues. Trois cas de figures sont possibles : 1) NC1 < PPNJ ; 2) PPNJ < NC1 < PGNJ; 3) PPNJ < NC1 (Figure 8.19). Deux séquences avec NC1 < PPNJ sont associées à la SH Du Moulin. Pour cette station, l'écart entre les PPNJ et le NC1 est très petits (Figure 8.20 et Tableau 8.7) et largement dans les incertitudes associées aux données LiDAR ou encore aux facteurs de corrections utilisés (voir Chapitre 9).

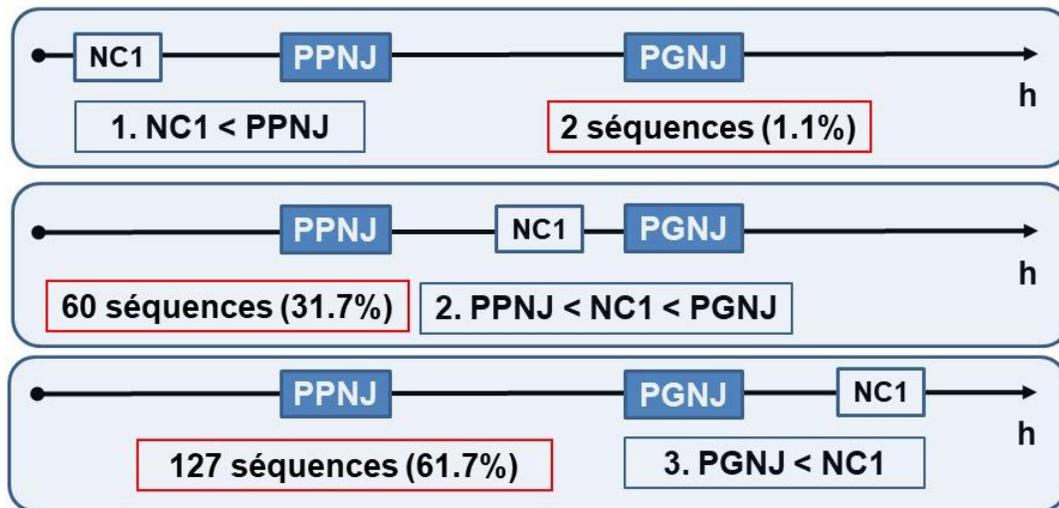


Figure 8.19 - Inégalités possibles entre PPNJ, PGNJ et NC1 : 1)  $NC1 < PPNJ$ ; 2)  $PPNJ < NC1 < PGNJ$ ; 3)  $PGNJ < NC1$ .

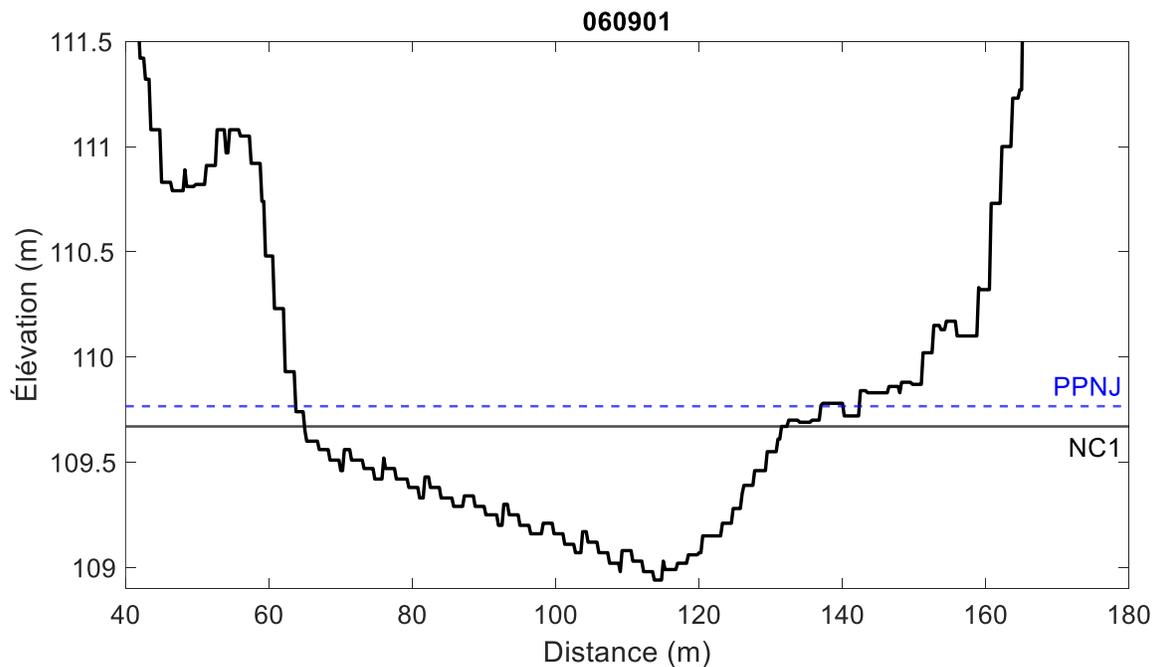


Figure 8.20 – Profil de la station 060901 (du Moulin) où le premier niveau critique (NC1) est inférieur au plus petit niveau jaugé (PPNJ).

Tableau 8.7 - Liste et caractéristiques des SH et des séquences où  $NC1 < PPNJ$ .

Numéro station	Nom station	Nombre de séquences	Nombre de jaugeages	NC1 (niveau et élévation, m)	PPNJ (niveau et élévation, m)	Écart PPNJ - NC1 (m)
060901	Du Moulin	2	15	49.098 (109.67)	49.207 (109.779)	0.109
			11	49.098 (109.67)	49.194 (109.766)	0.096

La Figure 8.21 présente la fonction de répartition des valeurs de  $NCN1$  aux 189 séquences retenues. Outre les deux séquences où le  $NC1$  est inférieur au  $PPNJ$  ( $NCN1 < 0$ ), on dénombre 60 séquences (31.7%) où le  $NC1$  est compris entre le  $PPNJ$  et le  $PGNJ$  ( $0 < NCN1 < 1$ ) et 127 séquences (67.2%) où le  $NC1$  est supérieur au  $PGNJ$  de la séquence ( $NCN1 > 1$ ). Ces résultats montrent que dans une majorité de cas, les jaugeages disponibles ne dépassent pas le premier niveau critique identifié et qu'advenant que des niveaux mesurés dépassent ce dernier niveau, les débits estimés à partir de la CT risque d'être incertains et influencés par le changement de profil. Qui plus est, pour 7.4% des séquences, l'écart entre le  $NC1$  et le  $PGNJ$  représente moins de 20% de l'écart entre  $PGNJ$  et le  $PPNG$  ( $1 < NCN1 < 1.2$ ).

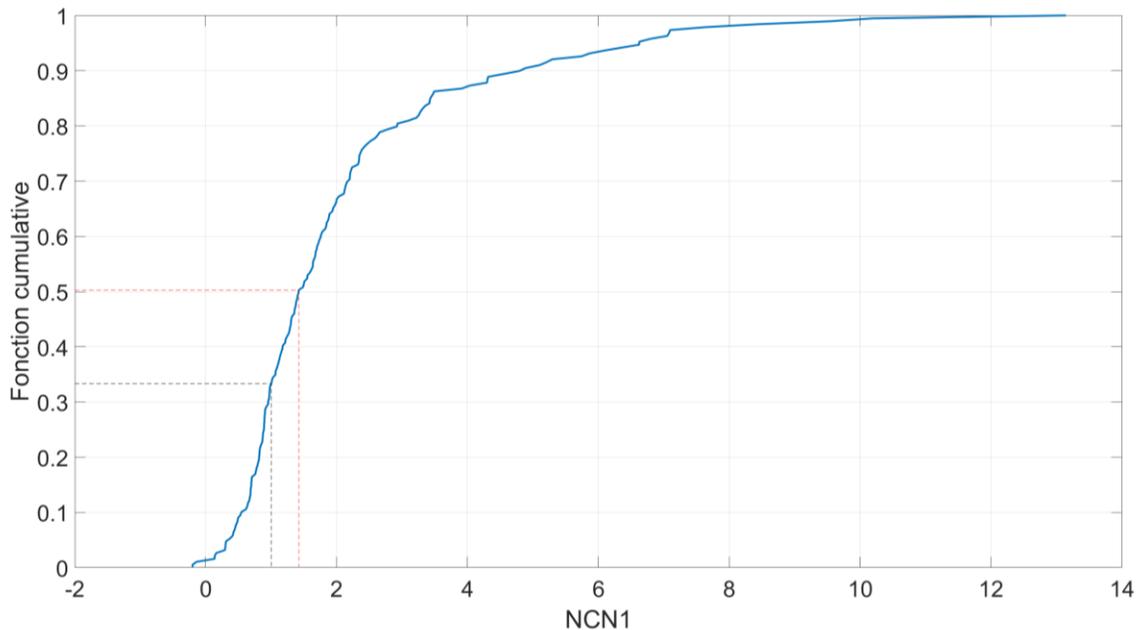


Figure 8.21 - Fonction cumulative des  $NCN1$  pour les 189 séquences disponibles. La ligne en tiret rouge correspond à la médiane et la ligne en tieret noir à  $NCN1 = 1$ .

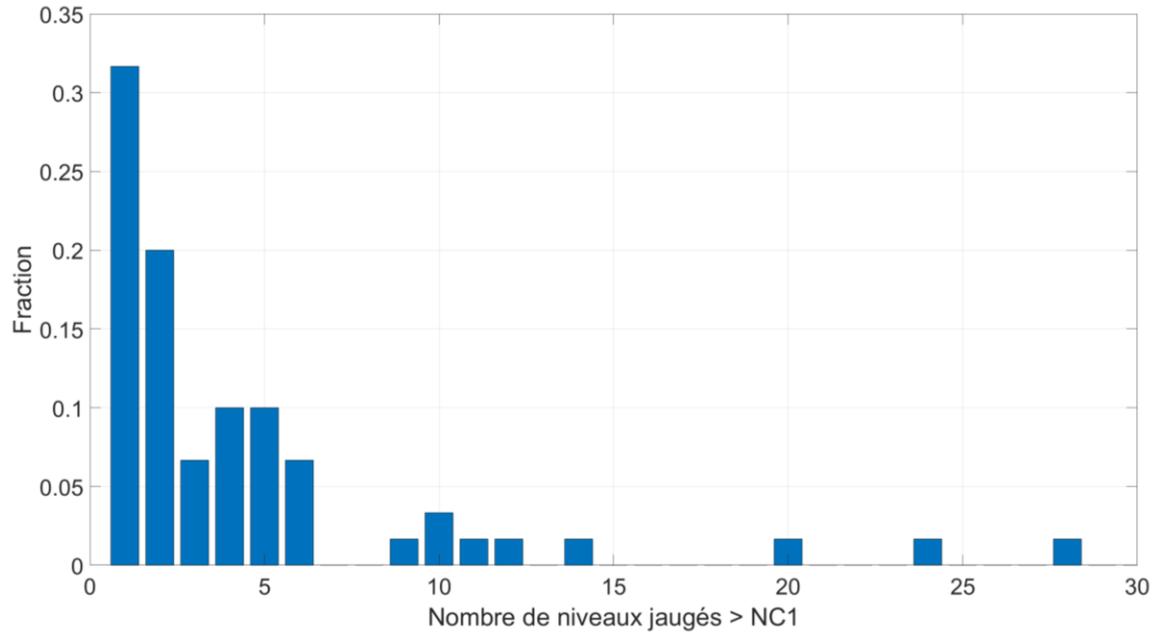


Figure 8.22 - Nombre de jaugeages supérieurs au NC1 pour les 60 séquences avec  $PPNJ < NC1 < PGNJ$  ( $0 < NCN1 < 1$ ).

Les 60 séquences avec  $PPNJ < NC1 < PGNJ$  ( $0 < NCN1 < 1$ ) ont ensuite été analysées. Le nombre de niveaux jaugés supérieurs au NC1 pour chaque séquence a été calculé et est présenté à la Figure 8.22. On observe que pour près de 78% des séquences de 1 à 5 niveaux jaugés dépassent le NC1 alors qu'environ 12% des séquences comptent de 5 à 10 jaugeages supérieurs à NC1. Ces chiffres indiquent encore une fois que, dans une grande majorité de cas, très peu de jaugeages sont disponibles au-delà du NC1 ce qui ne permet pas d'investiguer de façon probante les possibles impacts d'un changement de section sur la CT.

### 8.5.2 Comparaison PPNJ, PGNJ, NC1 et PGNM

Les PGNJ et les NC1 ont été ensuite comparés aux PGNM pour les séquences des SH où l'on dispose des NC1. Six situations possibles ont ainsi été examinées (Figure 8.23). Le nombre de séquences appartenant à chaque cas est présenté au Tableau 8.8. Les cas A, B et E se démarquent et représentent à eux seuls 98% des cas rencontrés. L'Annexe D indique pour chaque SH où le NC1 est disponible, le type de cas de la Figure 8.23 correspondant.

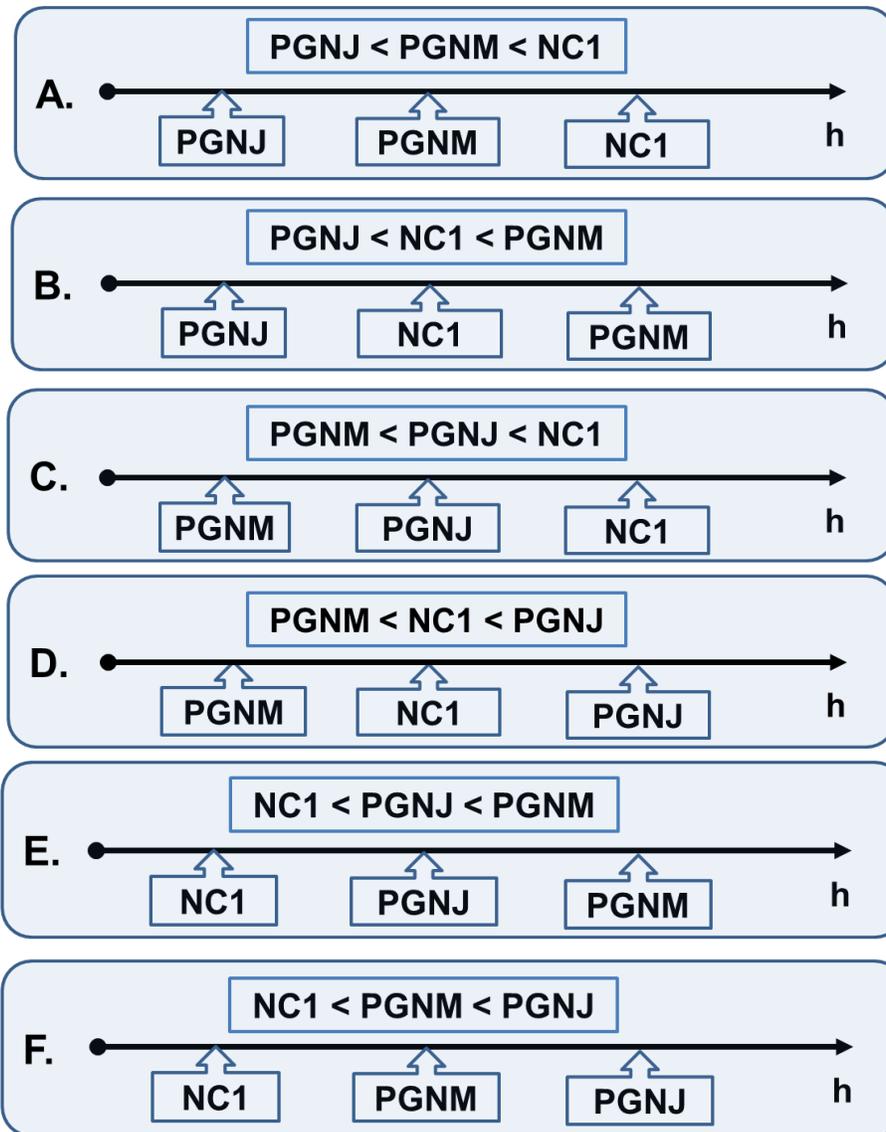


Figure 8.23 - Six inégalités possibles lorsque le PGNJ, le NC1 et plus grand niveau mesuré (PGNM) sont comparés pour les séquences aux SH où l'on dispose du NC1.

Tableau 8.8 - Nombre de séquences selon les différentes inégalités entre le PGNJ, le PGNM et le NC1 (voir Figure 8.23).

Cas	Nombre de séquences (%)	Nombre moyen de jaugeages par séquence	Nombre de séquences représentées par 2 RH
A. PGNJ < PGNM < NC1	69 (36.5)	30.8	6
B. PGNJ < NC1 < PGNM	55 (29.1)	21.8	2
C. PGNM < PGNJ < NC1	3 (1.6)	40.7	0
D. PGNM < NC1 < PGNJ	0 (0.0)	-	-
E. NC1 < PGNJ < PGNM	61 (32.3)	33.0	4
F. NC1 < PGNM < PGNJ	1 (0.5)	71.0	1

Les trois autres cas plus marginaux, C, D et F, se distinguent par le fait que  $PGNM < PGNJ$ . Il est étonnant de constater que certaines séquences satisfont ce critère puisqu'il semble logique de penser que la période couverte par les niveaux mesurés devrait inclure celle couverte par les jaugeages. Dès lors les niveaux mesurés devraient nécessairement à un moment ou à un autre dépasser le PGNJ. Il faut toutefois se rappeler que les données aux 15 minutes ne vont pas au-delà de 1997 même si certaines stations sont opérationnelles depuis beaucoup plus longtemps. Dès lors, des jaugeages antérieurs à 1997 peuvent avoir été réalisés et ces jaugeages peuvent correspondre à des niveaux supérieurs à ceux enregistrés depuis 1997 (voir Section 5.5).

Le cas A pour lequel  $PGNJ < PGNM < NC1$  est le plus fréquemment rencontré avec 36.5% des séquences (Tableau 8.8). Pour ces cas, aucun jaugeage et aucun niveau mesuré n'atteint le NC1. Afin de voir dans quelle mesure le PGNM se situe par rapport au PGNJ et au NC1, l'indice PGNMR, similaire au NCN1, a été calculé :

$$PGNMR = \frac{(PGNM - PGNJ)}{(NC1 - PGNJ)} \quad (8.6)$$

La fonction cumulative des valeurs de PGNMR aux 69 séquences avec  $PGNJ < PGNM < NC1$  est présentée à la Figure 8.24. Elle montre que le PGNM est généralement plus près du PGNJ que du NC1. Ainsi pour 50% des séquences le PGNM est situé dans le premier 25% de la distance NC1-PGNJ.

Les niveaux historiques mesurés suggèrent que, dans ces cas, le NC1 n'a pas été atteint et donc que les débits estimés à partir de la CT dans sa partie extrapolée pourraient être fiables. La Figure 8.25 présente un exemple de CT de ce groupe. Dans ce cas, bien que le PGNJ soit peu élevé (PDR 2 ans), le NC1 étant associé à une période de retour très élevée et nettement supérieure à celle du PGNM, l'utilisation de la CT pour estimer les débits semblent justifiée. On peut penser également que les incertitudes sur ces débits seront du même ordre que celles associées aux plus grands débits jaugés.

Le deuxième cas le plus fréquent, avec 32.3% des séquences, est celui pour lequel  $NC1 < PGNJ < PGNM$  (cas E), c.-à-d. que cette fois le NC1 est inférieur au PGNM et au PGNJ. C'est donc dire que l'on dispose dans ces cas de niveaux jaugés en période de crue qui permettent d'étendre la CT au-delà du NC1. L'examen de la position du deuxième NC, NC2, pourrait être utile dans ces cas afin de voir si les niveaux jaugés ont atteint ce niveau.

L'indice PGNJR a été calculé dans ce cas :

$$PGNJR = \frac{(PGNJ - NC1)}{(PGNM - NC1)} \quad (8.7)$$

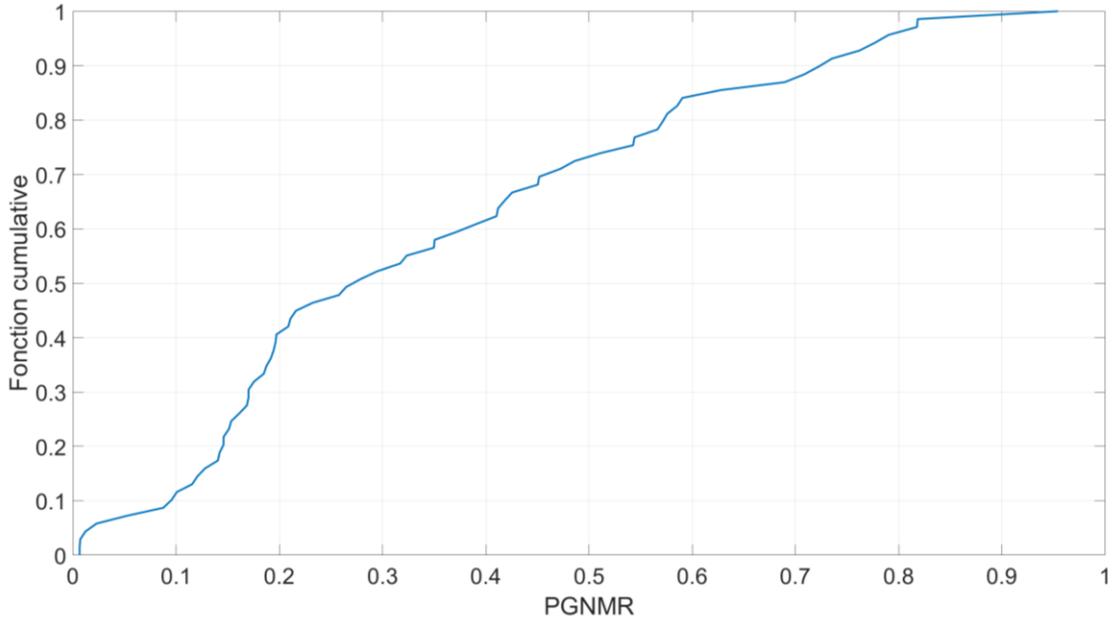


Figure 8.24 - Fonction cumulative des PGNMR (équation 8.6) des 69 séquences où  $PGNJ < PGNM < NC1$  (cas A).

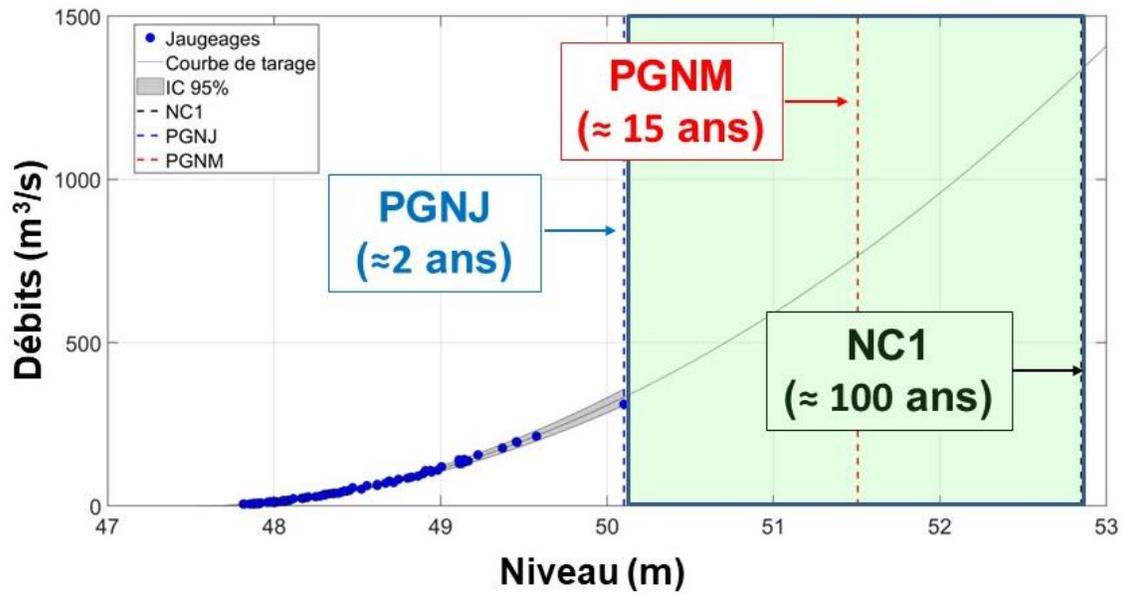


Figure 8.25 - CT de la station Petite Rivière Cascapédia (010902) couvrant la période 1981-2019 où  $PGNJ < PGNM < NC1$  (cas A). Le modèle d'incertitude N-M2d a été retenu.

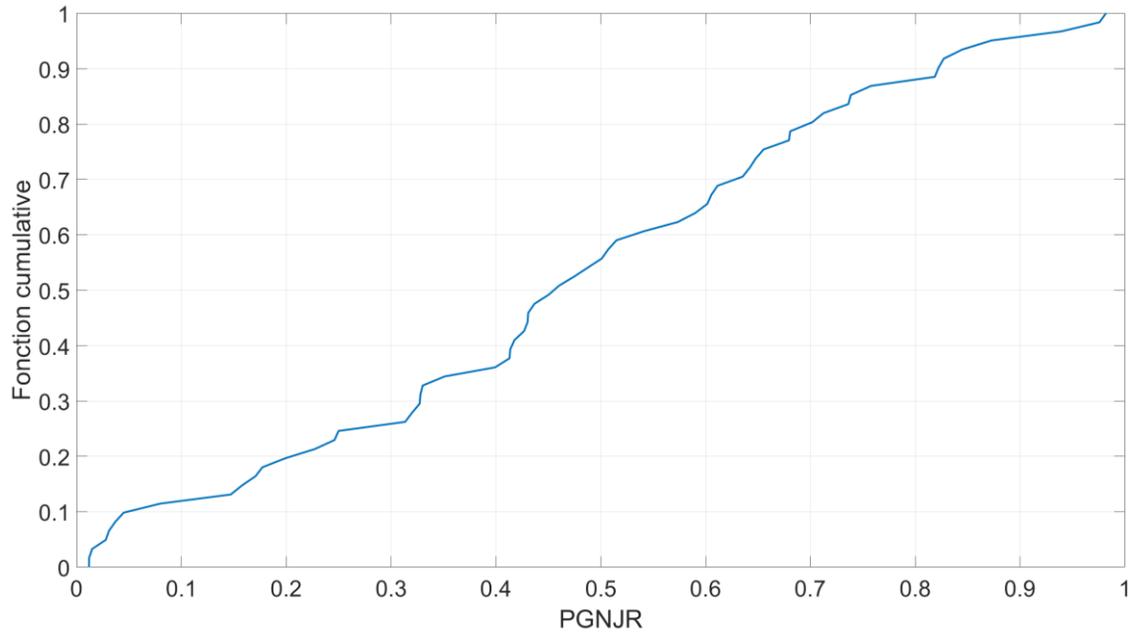


Figure 8.26 - Fonction cumulative des PGNJR (équation 8.7) des 62 séquences où  $NC1 < PGNJ < PGM$  (cas E).

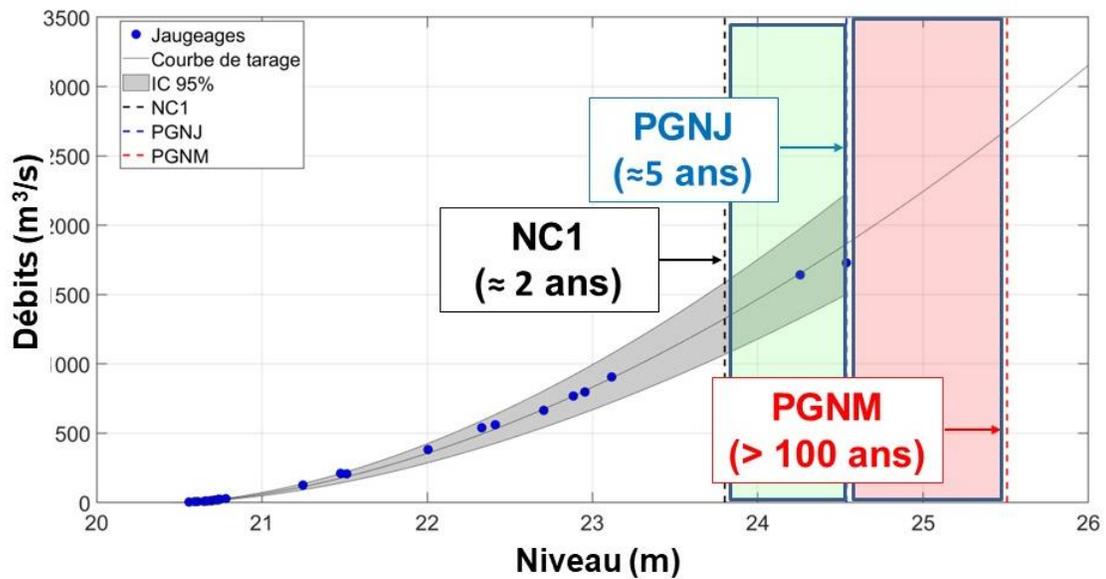


Figure 8.27 - CT de la station Chaudière (023402) couvrant la période 1968-1983 où  $NC1 < PGNJ < PGM$  (cas E). Le modèle d'incertitude N-M1 a été retenu.

Le PGNJR permet de relativiser la position du PGNJ par rapport au NC1 et au PGNM. La fonction cumulative des valeurs de PGNJ pour les 61 séquences avec  $NC1 < PGNJ < PGNM$  est présentée à la Figure 8.26. On constate que la distribution des valeurs du PGNJR est quasiment uniforme indiquant que le PGNJ se trouve *grosso modo* uniformément distribué entre NC1 et PGNM. Ce résultat est toutefois à rapprocher de celui de la Figure 8.23 qui indiquait que le nombre de jaugeage disponible au-delà du NC1 est petit pour plusieurs séquences et que donc l'estimation des débits dans la partie extrapolée pourrait s'avérer incertaine pour plusieurs séquences. Un exemple de CT appartenant à ce groupe est présenté à la Figure 8.27. La position respective du PGNJ et du PGNM de même que le faible nombre de jaugeages entre le PGNJ et le NC1 suggère que les débits estimés au-delà du PGNJ devraient être utilisés avec prudence.

Le troisième cas le plus fréquent, avec 29.1% des séquences, est celui pour lequel  $PGNJ < NC1 < PGNM$  (cas B), c.-à-d. que cette fois le NC1 se trouve entre le PGNJ et le PGNM. Les CT associées à ces cas doivent donc être utilisées avec prudence puisque plusieurs niveaux historiques mesurés se trouvent dans la gamme de niveaux supérieurs au NC1 qui se trouve lui-même au-delà de la partie jaugée de la CT. L'indice NC1R a été calculé dans ce cas :

$$NC1R = \frac{(NC1 - PGNJ)}{(PGNM - PGNJ)} \quad (8.8)$$

NC1R permet de relativiser la position du NC1 par rapport au PGNM et au PGNJ. La Figure 8.28 montre la fonction cumulative des NC1R des 55 séquences de ce type. Le NC1 semble donc uniformément distribué entre le PGNM et le PGNJ. Un exemple de CT avec  $PGNJ < NC1 < PGNM$  est présenté à la Figure 8.29. Dans ce cas, les débits associés à des niveaux de PDR d'environ 13 ans et plus pourraient être plus incertains.

### 8.5.3 Travaux exploratoires : analyse des incertitudes des parties extrapolées des courbes de tarage

Les travaux présentés dans cette section demeurent exploratoires. Ils sont présentés à titre indicatifs et présentent selon les auteurs de cette étude une perspective de recherche intéressante à explorer éventuellement.

Afin de distinguer et d'analyser les écarts relatifs pour la partie 'interpolée' et 'extrapolée' de la CT, la procédure suivante a été utilisée. Soient  $(h_j, Q_j)$  les  $N_s$  jaugeages de la séquence avec  $1 \leq j \leq N_s$ . Les étapes de cette procédure sont les suivantes :

1. On fixe le nombre de jaugeage  $m$  des échantillons générés aléatoirement. Seules les séquences avec un nombre de jaugeages égal ou supérieur à  $m$  sont considérées ( $N_s \geq m$ ).
2. Pour chaque séquence avec  $N_s \geq m$ , on génère aléatoirement un échantillon (sans remplacement) de  $m$  jaugeages à partir des  $N_s$  jaugeages de la séquence.

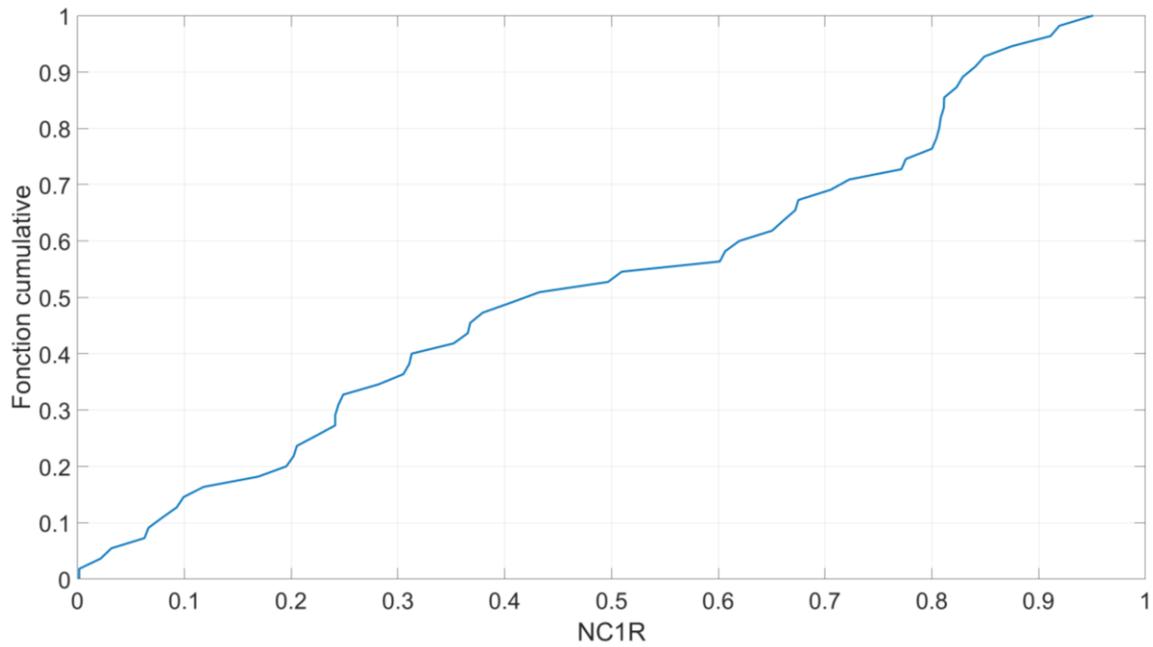


Figure 8.28 - Fonction cumulative des NC1R (équation 8.8) des 55 séquences où  $PGNJ < NC1 < PGNM$  (cas B).

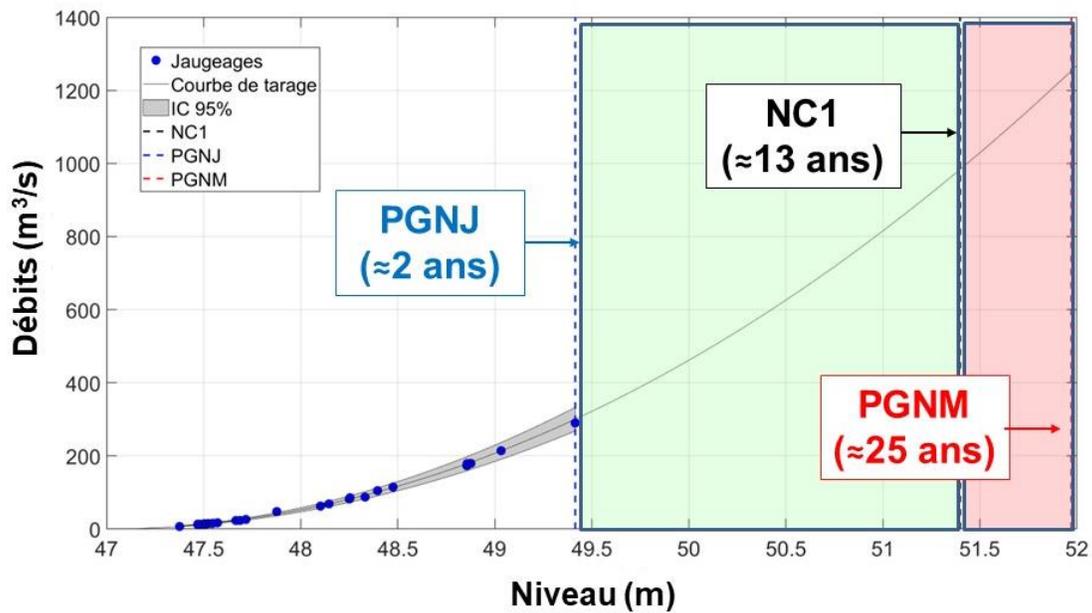


Figure 8.29 - CT de la station Bonaventure (010802) couvrant la période 1981-1990 où  $PGNJ < NC1 < PGNM$  (cas B). Le modèle d'incertitude L-M1 a été retenu.

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 :

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

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 :

$$h'_j \leq 0 \quad \text{si } h_j \leq h_{\min}$$

$$0 \leq h'_j \leq 1 \quad \text{si } h_{\min} \leq h_j \leq h_{\max}$$

$$h'_j \geq 1 \quad \text{si } h_j \geq h_{\max}$$

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  $m$  couples de valeurs ( $h'_j, ER_j$ ) pour chaque séquence.
8. On répète les étapes 2 à 7  $N_e$  fois.
9. On combine tous les résultats des  $N_e$  échantillons aléatoires pour obtenir  $N_T$  ( $= m \times N_e$ ) couples de valeurs ( $h'_j, ER_j$ ).

Le Tableau 8.9 présente les valeurs du nombre de jaugeages des séquences aléatoires, le nombre de séquences considérées et le nombre moyen de jaugeages des séquences considérées. Seules les séquences avec un nombre plus grand ou égal au nombre de jaugeages des séquences aléatoires et représentées par une seule RH sont considérées. Ainsi on dispose de 278 séquences avec plus de 10 jaugeages alors que ce nombre diminue lorsque pour atteindre 31 pour les séquences avec plus de 50 jaugeages.

Il est important de mentionner que la procédure précédente ne prévoit aucune application des tests de rupture ou du *run test*. On suppose donc que le rééchantillonnage des séquences résultera en des séries de jaugeages sans rupture des séries temporelles des résidus et que les résidus seront aléatoirement distribués. Une alternative à cette approche serait d'appliquer ces deux tests et d'éliminer les séries avec rupture de la série temporelle des résidus ou avec des résidus non-aléatoires. Cette approche n'a pas été retenue dans un premier temps.

Tableau 8.9 - Nombre de séquences disponibles avec un nombre minimal de jaugeages et nombre moyen de jaugeages par séquence correspondant. Seules les 305 séquences représentées par 1 RH sont considérées.

Nombre minimal de jaugeages par séquence	Nombre de séquences	Nombre moyen de jaugeages par séquence
10	278	29.3
20	166	39.5
30	105	47.9
40	64	56.7
50	31	70.6

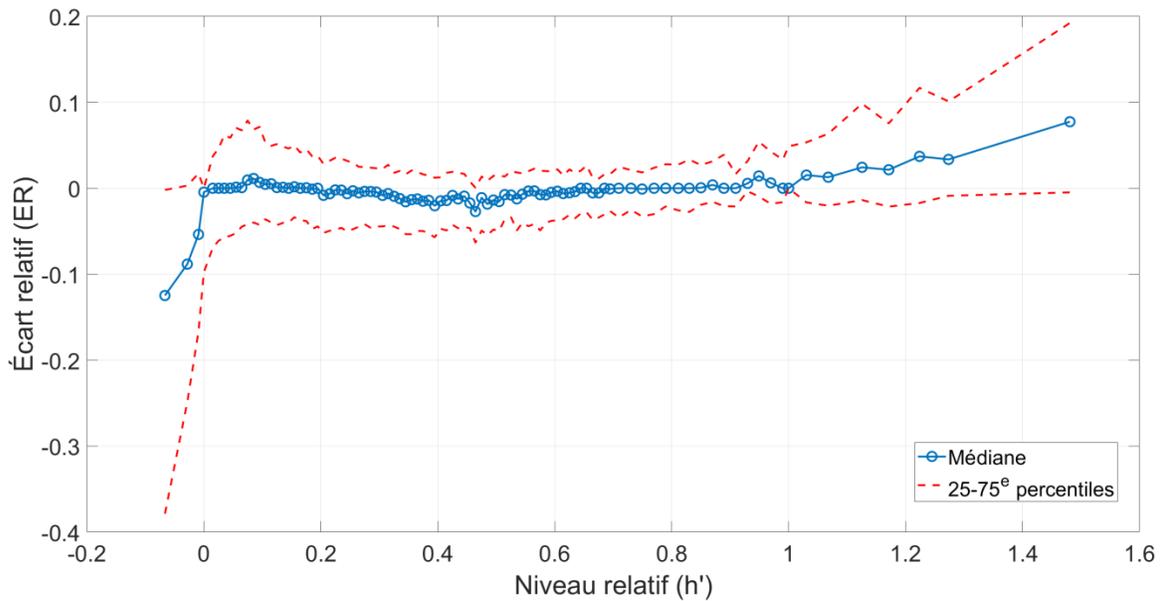


Figure 8.30 - Médianes et écarts interquartiles des distributions des écarts relatifs entre débits jaugés et débits estimés à partir de la RH (ER) en fonction du niveau relatif ( $h'$ ) pour le cas d'échantillon aléatoire de 20 jaugeages. Tous les jaugeages avec plus de 20 jaugeages et une RH, soit 166 séquences, ont été considérées.

La Figure 8.30 présente les résultats pour les échantillons comportant plus de 20 jaugeages ( $m = 20$ ) où un total de 166 séquences a été considéré. Cette figure montre que les ER pour la partie interpolée ( $0 \leq h'_j \leq 1$ ) sont du même ordre que celles rapportés précédemment pour les différentes CT à savoir des écarts interquartiles de l'ordre de  $\pm 5\%$ . On constate toutefois une augmentation sensible de ces incertitudes et un biais important dans les parties extrapolées et notamment pour les niveaux inférieurs au PPNJ. Dans ce dernier cas, les CT ont tendance à fortement sous-estimer les débits jaugés. Pour la partie des CT au-delà du PGNJ, le biais est moins prononcé et se traduit par une propension des CT à surestimer les débits jaugés. Ce dernier résultat pourrait suggérer que, globalement, les écoulements à fort débits correspondant à la partie des CT au-delà du PGNJ, surviennent dans des conditions où la CT n'est plus valide, où les vitesses

d'écoulement diminuent malgré des sections d'écoulement plus importantes. Ce changement pourrait être associé dans plusieurs cas à une transition vers un écoulement en plaine inondable. La procédure précédente a été reprise en considérant des échantillons avec un échantillon égal aux valeurs du Tableau 8.9. Ces résultats ne sont toutefois pas présentés.

Ces résultats semblent prometteurs et pourraient aider à quantifier les incertitudes dans les parties extrapolées des CT. Ils montrent que l'estimation des débits utilisant les parties extrapolées des CT, que ce soit pour les petits ou les grands niveaux, doit se faire avec prudence. Les débits ainsi estimés, à défaut s'avoir une valeur d'incertitudes spécifiques, devrait à tout le moins être identifiés comme tels. Ainsi l'utilisateur de ces débits pourrait prendre en considération cet aspect dans ses analyses.

## 8.6 Synthèse et livrables

Les travaux présentés à ce chapitre ont permis d'estimer les incertitudes de chacune des CT retenues. Rappelons que les CT des 298 séquences de jaugeage avec plus de 10 jaugeages faisant partie des catégories (A1, B1), (A2, B2) et (A2, B4) ont été considérées, c.-à-d. les 24 séquences comportant de 10 et 11 jaugeages représentées par une seule RH (catégorie A1, B1), les 254 séquences de 12 jaugeages ou plus représentées par une seule RH (catégorie A2, B2) et les 20 séquences de 12 jaugeages ou plus représentées par deux RH (catégorie A2, B4). Les 11 séquences des autres catégories n'ont pas été considérées.

Les incertitudes sur ces CT ont été établies à partir d'une analyse des RR entre les débits jaugés et les débits estimés à partir des CT. Un examen préliminaire a permis de montrer que la distribution des RR pouvait être représentée par deux distributions à savoir la distribution normale (N) et logistique (L). La seconde se distingue de la première par un kurtosis plus élevé qui se traduit par une distribution avec un poids relatif plus important des queues de la distribution par rapport à sa partie centrale. Ces deux distributions sont par ailleurs symétriques.

La même analyse a également montré que si souvent les RR ne dépendaient pas du niveau (erreurs homoscedastiques) il pouvait en être autrement dans plusieurs cas. Diverses représentations des incertitudes, appelées modèle d'incertitude, ont donc été proposées pour refléter cette diversité : M1 : modèle où les incertitudes ne dépendent pas du niveau ; M2d : modèle où les incertitudes sont plus importantes pour les petits niveaux ; M2a : modèle où les incertitudes sont plus importantes pour les grands niveaux ; M3 : modèle où les incertitudes sont plus importantes pour les petits et les plus grands niveaux.

Le modèle d'incertitude représentant le mieux les distributions des RR de chaque CT a ainsi pu être identifié. Au terme de cette analyse, un modèle d'incertitude a été attribué à chacune des 298 séquences et CT correspondantes. Le nom et les paramètres décrivant ces modèles sont regroupés à l'Annexe F. Il convient de noter que certaines CT

demanderaient à être examinées plus attentivement puisque le modèle d'incertitude sélectionné ne représente pas adéquatement les RR dans ces cas.

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

Cet aspect a été examiné dans le cadre de la présente étude en identifiant divers niveaux critiques (NC) correspondant à des changements majeurs des profils des sections de contrôles à certaines SH. Ces profils et NC ont été établis sur la base de données LiDAR (voir Chapitre 9). Seul le premier niveau critique (NC1) a été considéré et a été comparé au plus grand niveau jaugé (PGNJ) et au plus grand niveau mesuré (PGNM; l'Annexe H regroupe l'ensemble de ces niveaux pour chaque SH). Divers cas types ont ainsi été identifiés en fonction des positions relatives du NC1, du PGNJ et du PGNM de chaque CT. Les cas-types les plus fréquemment rencontrés sont : A :  $PGNJ < PGNM < NC1$  (36.5% des CT); E :  $NC1 < PGNJ < PGNM$  (32.3%); B :  $PGNJ < NC1 < PGNM$  (29.1%). Le cas-type auquel chaque CT appartient est indiqué à l'Annexe D.

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

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



## **CHAPITRE 9. CONSIDÉRATIONS HYDRAULIQUES SUR LES SECTIONS DE CONTRÔLE ET LES CT**

Dans le cadre de ce projet, les profils des sections de contrôle de certaines stations ont été examinés afin de comparer les niveaux critiques (NC) identifiés à ces profils aux plus grands niveaux jaugés (PGNJ) et aux plus grands niveaux mesurés (PGNM). Une telle comparaison permet de voir dans quelle mesure les niveaux jaugés, et donc les CT produites, couvrent les gammes de niveaux où des changements majeurs du profil de la section de contrôle sont susceptibles de se produire. Ces travaux ont été présentés à la Section 8.5 du Chapitre 8. La première section du présent chapitre (Section 9.1) explique comment ces niveaux critiques ont été déterminés et quelles données ont été utilisées.

La Section 9.2 présente les résultats d'une analyse où les résultats de simulations hydrauliques à certains tronçons sont comparés aux relations h-Q estimés aux stations hydrométriques localisées sur ces mêmes tronçons. L'objectif est de voir si les CT estimés à ces stations sont cohérentes avec celles simulés par les modèles hydrauliques et de voir si les résultats de ces simulations hydrauliques ne pourraient pas être utilisés pour le développement des CT notamment en conditions de crues où les jaugeages sont difficiles et peu nombreux.

### **9.1 Estimation des niveaux critiques**

Les profils des sections de contrôle ont été tracés pour 104 stations hydrométriques géoréférencées (SHG). Il est important d'abord de préciser certains éléments concernant le système de référence altimétrique utilisé :

- Pour 100 de ces stations, un facteur de correction à appliquer au niveau de référence arbitraire, qui correspond à la position de l'orifice de la tubulure (voir Section 2.2.1), a été fourni par les intervenants de la DEH (Tableau H.1 de l'Annexe H).
- Ce facteur permet d'associer une altitude géodésique à l'orifice de la tubulure par rapport au niveau moyen de la mer. L'altitude géodésique provient du Système canadien de référence altimétrique de 1928 (CGVD28), dont l'incertitude peut atteindre quelques dizaines de centimètres pour certaines régions (Thériault, 2010; RNC, 2020).
- Pour quatre des 104 stations, le niveau de référence n'est pas arbitraire et est déjà lié au CGVD28 (030101, 030106, 030343 et 040132).

Le profil de la section de contrôle a été construit aux 104 SHG en procédant selon les étapes suivantes :

1. Un transect perpendiculaire à l'écoulement des eaux a été tracé près de la localisation de la SHG. La Figure 9.1 montre trois cas (A, B et D) où le transect passe par la SHG. Le cas C, de la Figure 9.1 montre un transect un peu en amont

de la station en raison de la présence d'un pont en aval. En effet, le transect a été placé légèrement en amont du pont afin que celui-ci n'influence pas le profil d'écoulement de la rivière au transect.

2. Il est important de noter toutefois que l'emplacement de l'orifice de la tubulure n'est pas connu, pas plus que la localisation exacte des transects où sont réalisés les jaugeages. Ainsi, rien ne permet de dire si le transect passe ou pas par l'orifice de la tubulure ou par l'un des transects de jaugeages. Le profil de la section de contrôle obtenu n'est donc pas exactement le même que le profil qui serait obtenu si ces dernières données étaient disponibles. On suppose donc que les profils obtenus sont assez similaires et que le transect obtenu est représentatif de la section de contrôle.

Finalement, le transect a été prolongé au-delà des berges du lit majeur afin d'inclure en partie ou en totalité la plaine inondable.

3. Le transect a été divisé en segments de 0.25 m et la valeur d'altitude provenant d'un LiDAR a été retenue pour chaque segment. L'ensemble de ces valeurs le long du transect permet d'obtenir l'élévation du lit du cours d'eau.
4. Les LiDAR utilisés sont ceux du Ministère des Forêt, de la Faune et des Parcs (MFFP)<sup>5</sup>. Les principales caractéristiques des LiDAR sont les suivantes :
  - a. Système de coordonnées géographiques : NAD 1983 CSRS MTM;
  - b. Résolution : 1 mètre;
  - c. Datum altimétrique : CGVD28;
  - d. Précision altimétrique :  $\pm 0.15$  mètre.
5. Un examen des profils de section de contrôle a permis d'identifier 14 SH où le facteur de correction est incorrect. Dans ces cas, l'ajustement du profil, après application du facteur de correction aux données d'élévation LiDAR est impossible puisque des écarts majeurs entre les deux sont observés. Ces cas ont par la suite été examinés par les intervenants de la DEH et classés comme problématiques. Ces 14 SH ont été éliminées des analyses sur les incertitudes (Section 8.5). Les SH en question sont les suivantes : 022003, 022301, 040409, 048603, 061307, 061801, 061901, 061909, 062102, 062114, 062701, 062803, 064101, 070204.
6. Les NC ont par la suite été identifiés manuellement. Considérant la résolution des LiDAR (1 m), seuls les NC majeurs ont été identifiés (Figure 9.2). Il s'agit donc de NC qui peuvent potentiellement exercer une influence sur la relation h-Q. La Figure 9.2 montre deux exemples de NC. Dans certains cas, par exemple la station 030204 (Figure 9.2-A), le profil d'écoulement est relativement uniforme jusqu'à l'atteinte de la plaine inondable. Pour d'autres cas (Figure 9.2-B), le lit du cours d'eau est beaucoup plus variable et laisse croire que la relation h-Q peut changer

---

<sup>5</sup> LiDAR : <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/produits-derives-de-base-du-lidar>

à plusieurs reprises en fonction du niveau. Les deux cas de la Figure 9.2 sont représentatifs des autres SHG, c.-à-d. que :

- a. Dans plusieurs cas, les plus grands NC ont une période de retour qui va au-delà de 100 ans ce qui laisse penser que l'on a alors un écoulement en plaine inondable.
- b. Généralement, les plus grands NC sont plus élevés que les PGNM et PGNJ ce qui permet notamment d'identifier des sections potentielles où la relation  $h-Q$  pourrait changer de manière marquée dans les zones d'extrapolation des CT (voir Chapitre 8).

Le Tableau H.1 de l'Annexe H indique les différents NC pour chaque SHG ainsi que les PGNJ, PGNJ, PPNM et PGNM.

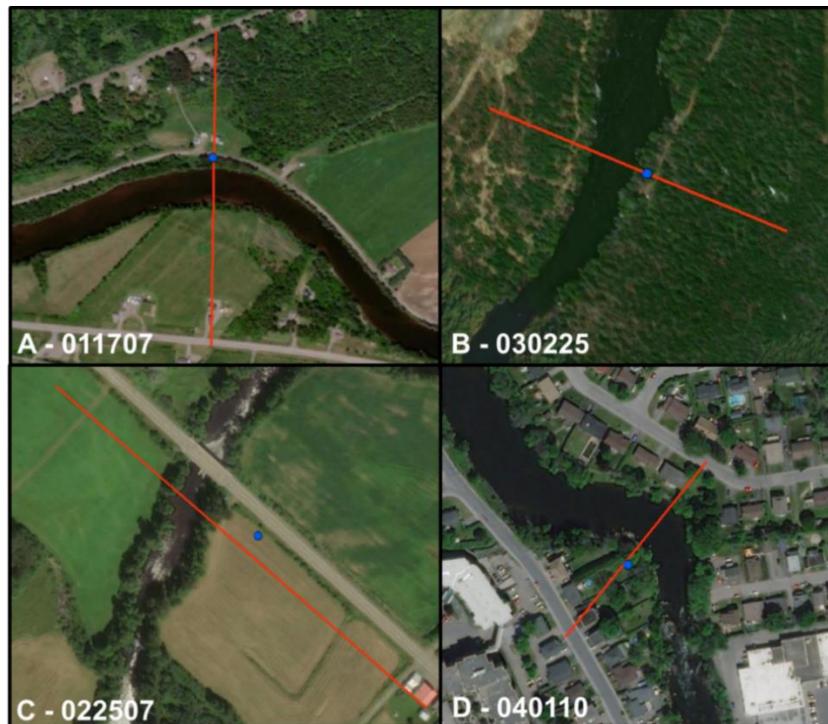
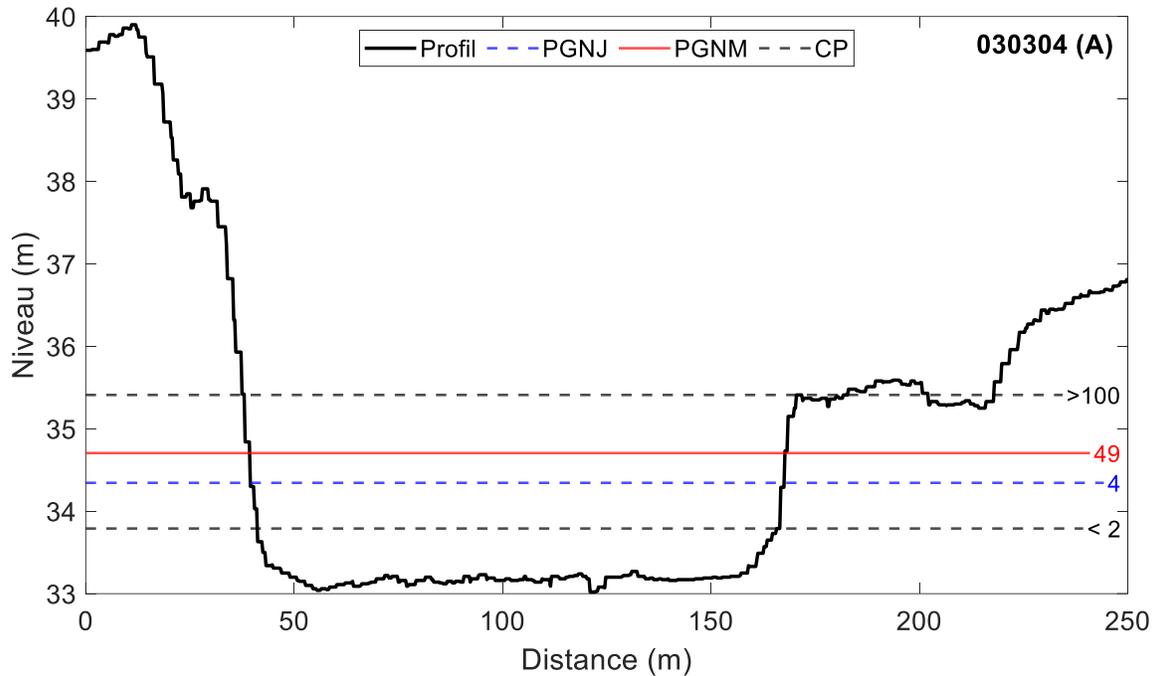
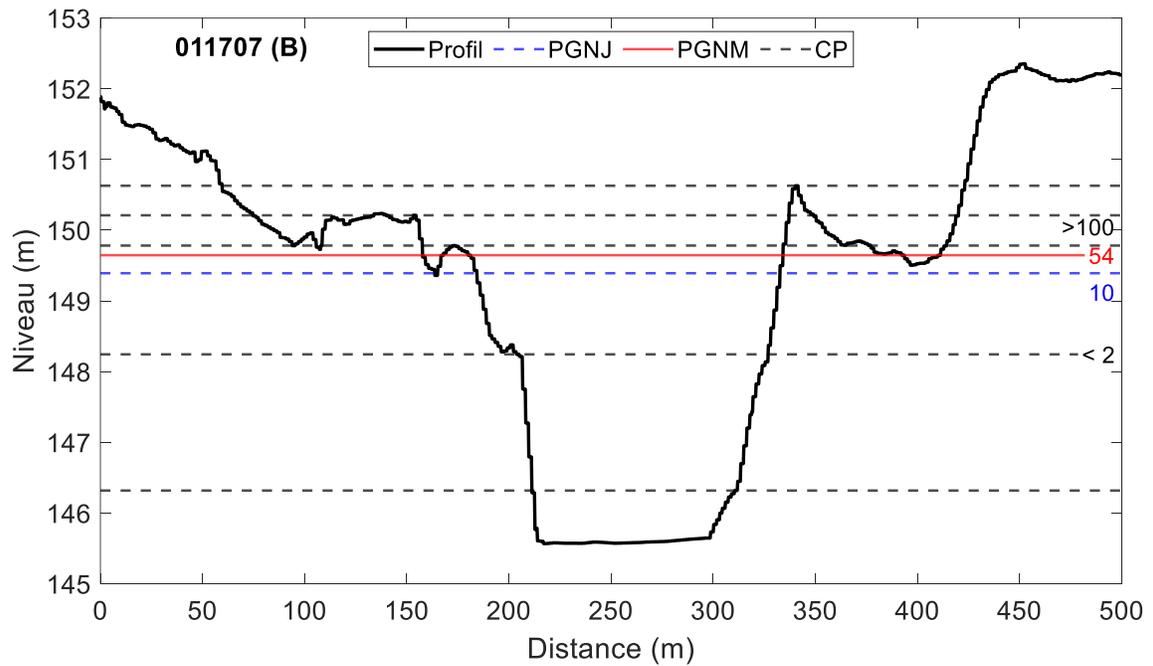


Figure 9.1 – Exemple de transects (lignes rouges) pour quatre stations hydrométriques géoréférencées (points bleus).



(A)



(B)

Figure 9.2 – Exemple d'identification des niveaux critiques (NC, lignes noires en tiret) à la section de contrôle pour les SHG : A) 030304 ; B) 011707. La ligne rouge indique le PGNM (postérieurs à 1997) et la ligne bleue en tiret indique le PGNJ. Les valeurs affichées correspondent aux périodes de retour estimées pour chacun de ces niveaux.

### **9.1.1 Exemple de la station hydrométrique géoréférencée 011707**

Le profil de la SH 011707 (Madawaska) apparaissant à la Figure 9.1-A est présenté à la Figure 9.3. Cette figure montre les principaux NC de la section de contrôle (Figure 9.3-A). La localisation des NC sur le terrain est présentée à la Figure 9.4. Cinq NC ont été identifiés pour la station 011707. Pour deux de ces NC, les niveaux correspondants sont associés à des périodes de retour inférieures à 2 ans. Pour les trois autres, les périodes de retour sont supérieures à 100 ans. La Figure 9.3-B montre les PPNJ, PGNJ, PPNM et PGNM avec les périodes de retour correspondantes.

Ainsi, on observe que le PGNJ est très près du PGNM et que ce dernier n'a jamais dépassé le troisième NC qui se trouve au niveau de la rue (Figure 9.4). Pour le PPNJ et le PPNM, on constate qu'ils sont inférieurs à l'altitude minimale obtenue avec les LiDAR. Cette situation survient pour la majorité des SHG et met en lumière une limite importante de l'approche proposée. Il va sans dire que cette approche d'identification des NC n'est pas applicable en conditions de faibles débits. Cet aspect sera discuté plus en détail à la section suivante.

### **9.1.2 Identification des niveaux critiques en conditions de faibles débits**

La Figure 9.2 a permis de mettre en lumière une limite importante dans des conditions de faibles débits. Cette limite est associée aux données LiDAR en présence de plan d'eau. Afin d'améliorer les profils des sections de contrôle, une combinaison des données LiDAR aux relevés bathymétriques réalisés par la DEH pourrait être envisagée. Pour un peu plus de 9 500 sections de rivières, des relevés bathymétriques ont été réalisés en prévision de la modélisation hydraulique HEC-RAS prévue dans le cadre du projet INFO-Crue (2020-2025). Certains de ces relevés se trouvent près des SHG et pourraient être utilisés en complément des données LiDAR.

Il est important de mentionner que les deux sources d'informations sont complémentaires. Tel que mentionné au paragraphe précédent, il n'est pas possible d'obtenir une bathymétrie pour les plus faibles débits avec les LiDAR disponibles. D'un autre côté, les relevés bathymétriques de la DEH se prolongent rarement jusqu'à la plaine inondable. La Figure 9.5 compare l'étendue des bathymétries obtenues avec le LiDAR à celle des relevés bathymétriques de la DEH pour deux SHG et montre notamment l'utilité du LiDAR pour compléter les relevés bathymétriques de la DEH.

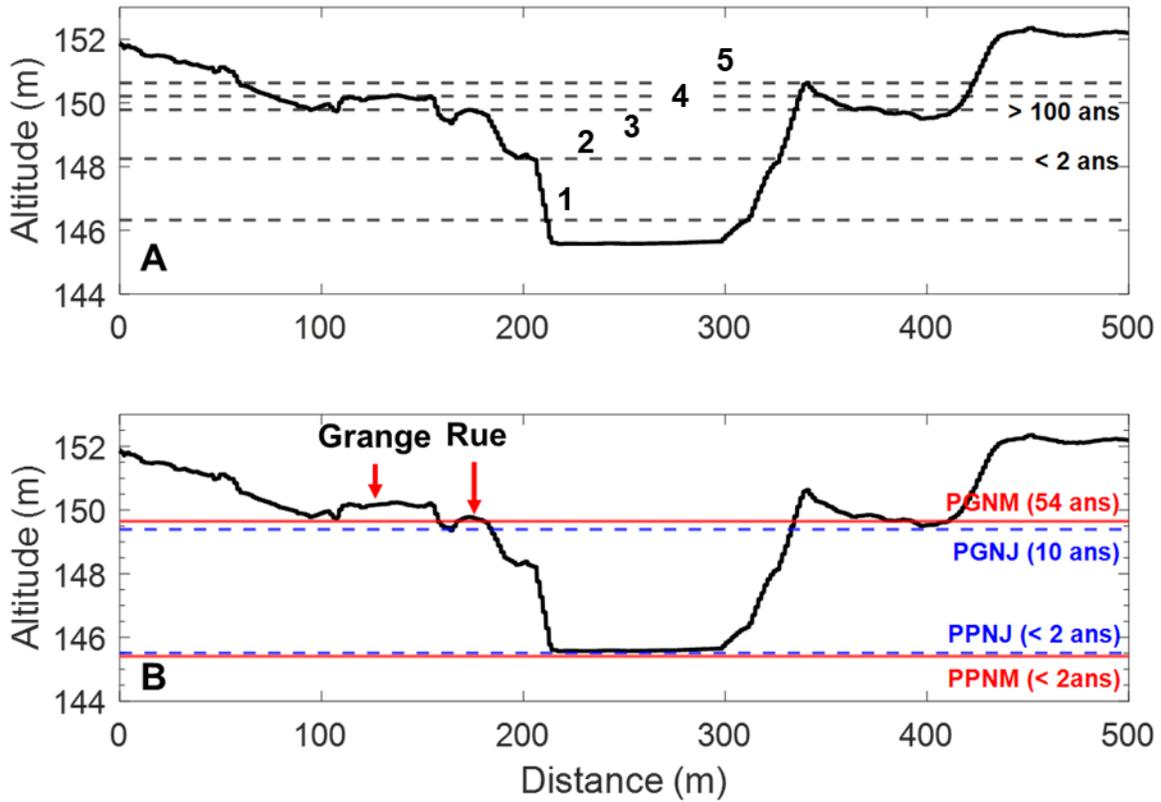


Figure 9.3 – Profil de la section de contrôle de la SHG 011707 : A) principaux NC avec numérotation d'un à cinq (voir Figure 9.4) et périodes de retour associées; B) identification sur le profil PPNM, du PPNJ, du PGNJ et du PGNM et les périodes de retour associées.

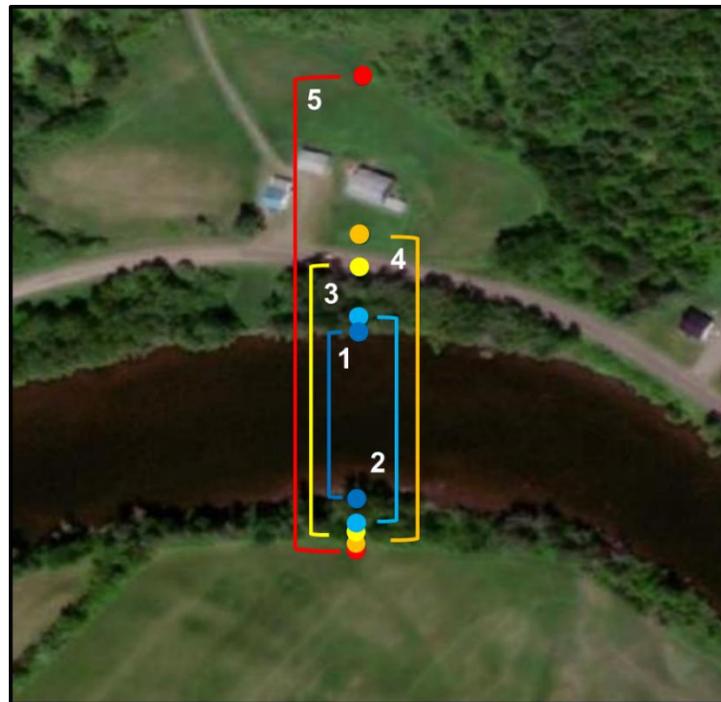


Figure 9.4 – Localisation des NC pour la SHG 011707. La numérotation des changements de profils est la même que celle de la Figure 9.3 (A).

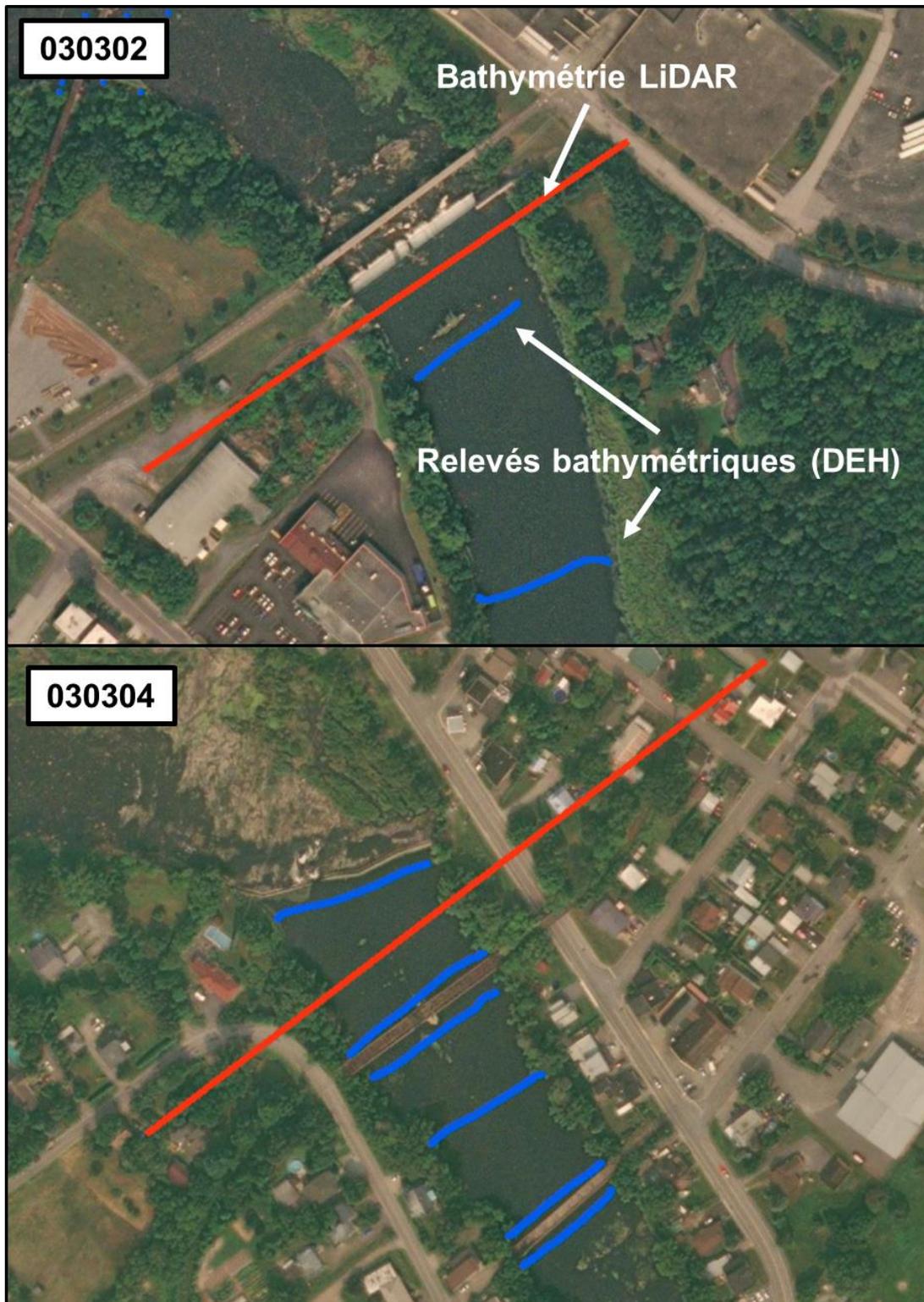


Figure 9.5 – Comparaison de l'étendu des bathymétries obtenues avec les LiDAR (lignes rouges) et les relevés bathymétriques de la DEH pour deux SHG.

## 9.2 Modélisation hydraulique et comparaison avec les courbes de tarage

Les résultats présentés dans le cadre de cette section sont basés sur les travaux réalisés par l'équipe de Mme Audrey Lavoie (DEH, MELCC) et de Mme Mélanie Trudel de l'Université de Sherbrooke qui visaient à mettre en place un modèle hydraulique (MH) en l'occurrence HEC-RAS, sur différents tronçons de cours d'eau du Québec. Dans le premier cas, ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet INFO-Crue alors que dans le second cas, ils s'inscrivent dans un projet de cartographie des zones inondables dans un contexte de changements climatiques sur le territoire de la Ville de Sherbrooke et des MRC de Coaticook et du Haut-Saint-François.

L'objectif ici est d'utiliser les résultats des simulations hydrauliques pour des sections de cours d'eau où se trouve une SH et de comparer les débits simulés aux débits estimés avec les CT des SH en question. Ces analyses ont été réalisées sur cinq SH, deux couvertes par l'équipe de la DEH et trois par l'Université de Sherbrooke (Tableau 9.1).

Pour les stations 061029 et 023303, plusieurs profils de profondeurs ont été fournis. Ces profils diffèrent entre eux par leurs étendues et les profondeurs qui varient en fonction des débits associés. Tous ces profils de profondeurs ont une résolution de 1 m x 1 m et couvrent largement la section de contrôle. Parallèlement, des données LiDAR de même résolution ont également été fournis par les intervenants de la DEH.

Une méthodologie permettant de rapporter les profondeurs des différents profils à un niveau associé à un jaugeage dont le débit est similaire a été développée pour les SH 061029 et 023303. La méthodologie complète est détaillée à l'Annexe H (Section H.1). Pour les stations 030208, 030282 et 030284, des élévations par rapport au niveau moyen de la mer associées à des débits, ont été fournies. En jumelant l'un de ces débits à un jaugeage dont le débit estimé est similaire, il a été possible de rapporter l'élévation par rapport au niveau de la mer au niveau de ce jaugeage. Cette procédure est également décrite à l'Annexe H (Section H.2).

Tableau 9.1 - Information sur les SH ayant fait l'objet d'une modélisation hydraulique et retenues pour une comparative avec les CT.

Équipe	Nom de la station	Numéro de la station	Municipalité	Ouverture	Superficie (km <sup>2</sup> )
DEH	Aux Sables	061029	Saguenay	2008	3400
	Etchemin	023303	Saint-Henri	1980	1152
U. Sherbrooke	St-François	030208	Sherbrooke	1990	7930
	Saumon	030282	Lingwick	1975	769
	St-François	030284	Weedon	1979	2934

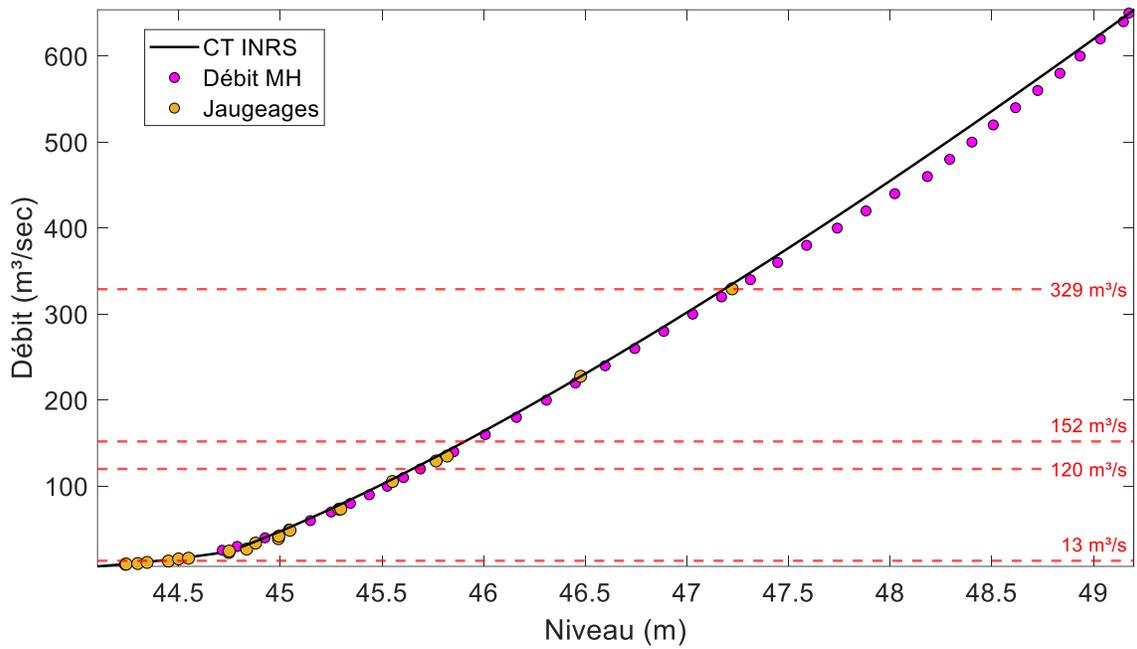
### 9.2.1 Résultats

La Figure 9.6A compare les débits simulés issus du MH (Débit MH) pour la station 061029 à une CT basée sur une relation hydraulique (CT INRS, voir Chapitre 7). Les principaux constats qui se dégagent de l'examen de cette figure sont :

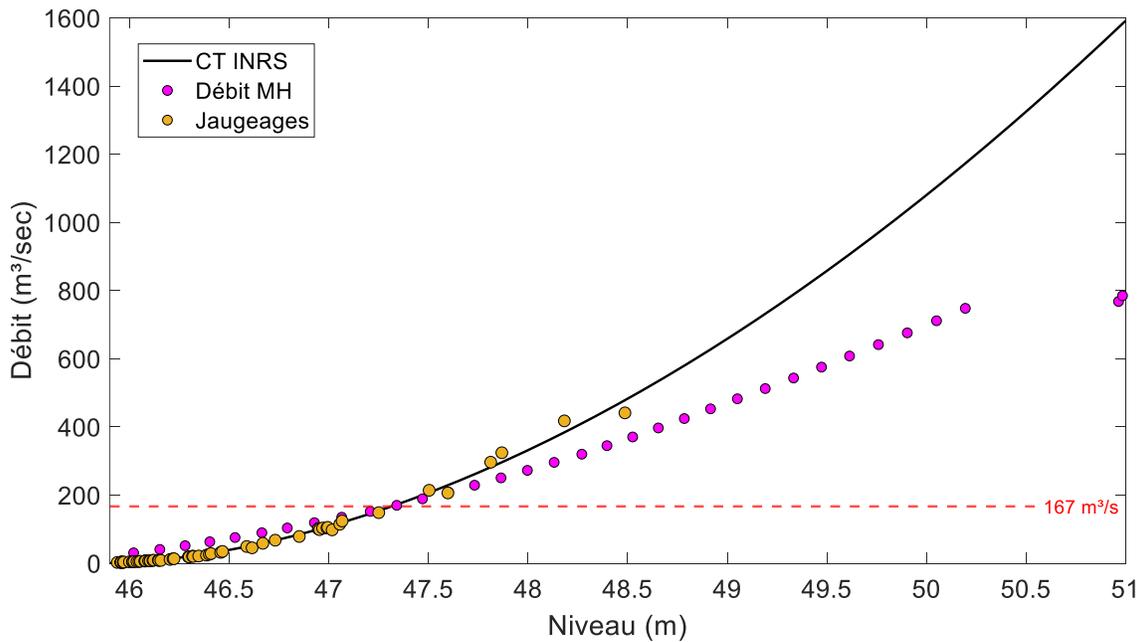
- Dans la zone comprise entre le PPNJ et PGNJ, zone similaire à celle entre le plus petit et plus grand relevé hydrométrique (lignes rouges sur la Figure 9.6A), l'accord entre la CT et les débits simulés est relativement bon. Les écarts relatifs dans cette zone (débits inférieurs à 330 m<sup>3</sup>/s) sont inférieurs à 5%.
- Dans la zone d'extrapolation (débit supérieur à 330 m<sup>3</sup>/s), des écarts relatifs plus importants sont observés. Globalement, le MH semble suggérer une augmentation moins rapide des débits particulièrement pour les débits compris entre 330 et 460 m<sup>3</sup>/s. Pour les débits supérieurs à 460 m<sup>3</sup>/s, les écarts relatifs se stabilisent. Ces résultats suggèrent que dans la zone d'extrapolation une surestimation des débits est envisageable avec l'utilisation de la CT INRS. On peut penser que le MH contient davantage d'informations pouvant influencer la relation h-Q que la CT INRS et que dès lors les résultats obtenus avec le MH sont plus près de la réalité. Il faut toutefois être prudent avec cette affirmation puisque les écarts sont dans l'ensemble mineurs (inférieurs à 8%) et il est bien de rappeler qu'au-delà de 360 m<sup>3</sup>/s, le MH est également en extrapolation puisque qu'aucun jaugeage n'a été réalisé pour calibrer le modèle.

La Figure 9.6B compare les débits simulés issus du MH (Débit MH) pour la station 023303 à une CT basée sur une relation hydraulique (CT INRS). Les principaux constats qui se dégagent de cette figure sont :

- La concordance entre la CT et les débits simulés est médiocre sur l'ensemble des débits. Pour les plus faibles débits, la CT INRS sous-estime considérablement les débits alors que la situation s'inverse au-delà du débit correspondant au seul relevé hydrométrique utilisé pour la calibration du MH. Les écarts relatifs sont très élevés et peuvent atteindre  $\pm 100$  %.
- Les jaugeages sur la Figure 9.6B suggèrent que la CR INRS est beaucoup plus près de la réalité que le MH tant pour les faibles débits que les débits plus élevés. Deux éléments peuvent expliquer la piètre performance du MH dans ce cas. D'abord, le MH est calibré sur un seul événement de crue. De plus, cet événement de crue est caractérisé par la présence de glace à la section de contrôle pouvant affecter considérablement la relation niveau-débit.

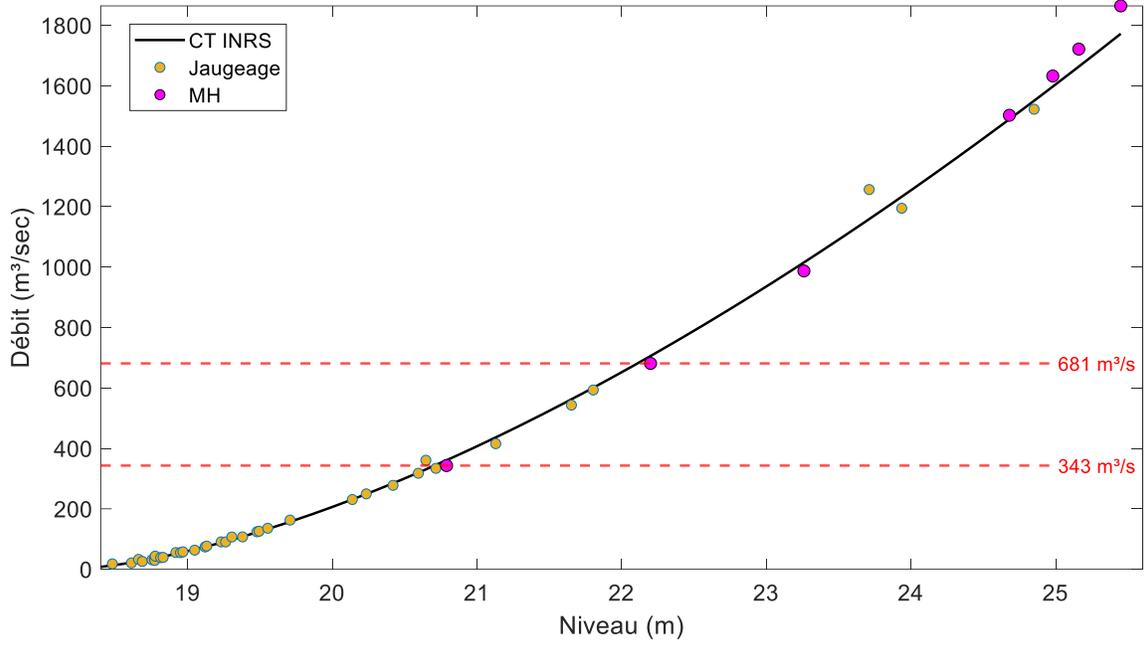


(A)

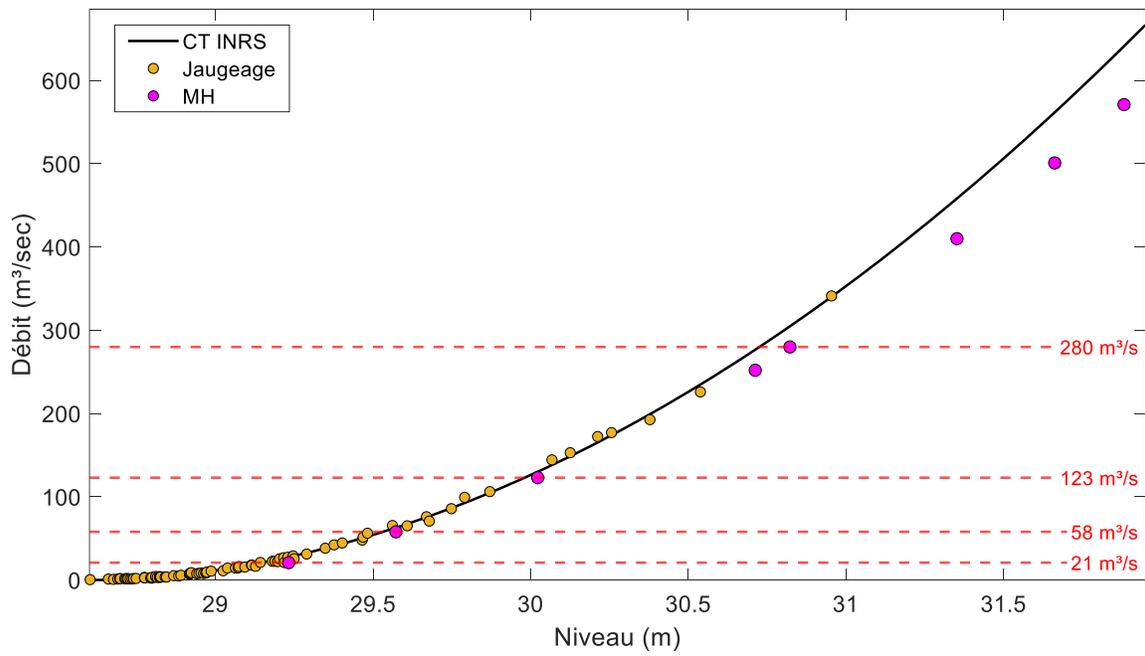


(B)

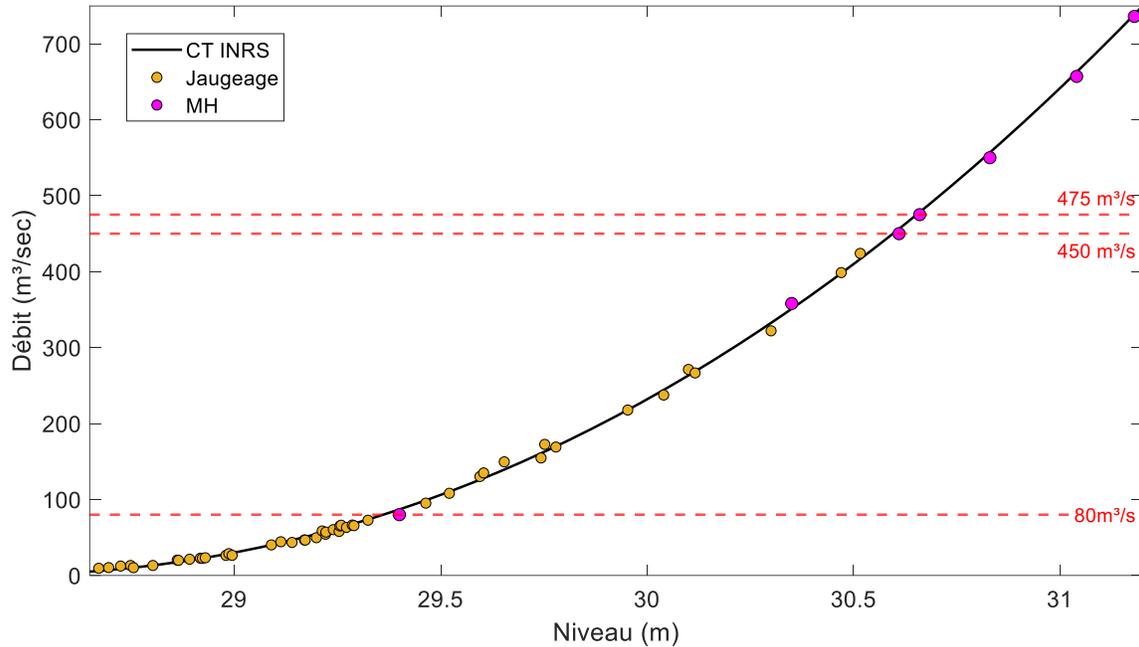
Figure 9.6 - Comparaison de la CT de l'INRS (CT INRS, ligne noire) et des débits simulés issus du MH (Débit MH, lignes mauve) pour : A) la station Aux Sables (061029); B) la station Etchemin (023303). Les cercles orange indiquent les jaugeages à ces stations et les lignes rouges affichent les débits associés aux relevés hydrométriques utilisés pour la calibration du modèle hydraulique.



(A)



(B)



vérifier la cohérence des simulations hydrauliques et de la CT. Dans une situation où les débits simulés par le MH et la CT présentent des écarts importants, une analyse plus approfondie des résultats pourra s'avérer nécessaire. Ces analyses pourraient consister en un examen du profil de la section de contrôle ou du type de contrôle à partir de données LiDAR afin d'identifier des NC pouvant expliquer ces écarts ou encore en la réalisation de relevés bathymétriques sur le terrain.

Il est important de mentionner que les travaux actuels n'ont porté que sur cinq SH et qu'ils sont exploratoires. C'est dans ce contexte que des efforts supplémentaires ont été mis de l'avant afin de compiler d'autres modélisations hydrauliques réalisées par d'autres équipes. Plusieurs modélisations hydrauliques de divers tronçons devaient être complétées sous peu pour plusieurs BV sous peu dans le cadre d'Info-Crue. Il serait intéressant de considérer ces simulations et de les intégrer à une analyse similaire à celle menée dans le cadre de la présente étude. En effet, les résultats présentés dans ce rapport suggèrent que la modélisation hydraulique pourrait être très certainement mise à profit pour améliorer les CT et ainsi obtenir des estimations des débits, notamment en condition de crue, plus justes et moins incertaines. Le développement d'une approche en ce sens exige toutefois de disposer d'un nombre conséquent de tronçons et de simulations hydrauliques.



## CHAPITRE 10. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le présent rapport donne une description complète de l'ensemble des procédures développées dans le cadre du projet *Évaluation des incertitudes sur les débits estimés aux stations hydrométriques du Québec méridional*. Une application de ces procédures à l'ensemble des stations hydrométriques (SH) actuellement en opération a été complétée. Ainsi une ou plusieurs courbes de tarage (CT) basées sur l'utilisation de régressions hydrauliques (RH) ont été produites pour chaque SH. Chaque CT est élaborée à partir des jaugeages réalisés pendant une période donnée et est considérée représentative de la relation niveau-débit (h-Q) pendant cette période. Toutes les données relatives à ces CT sont présentées dans les annexes du présent rapport. De même les incertitudes pour chacune de ces CT ont été estimées et les informations relatives à ces incertitudes regroupées en annexe. Un fichier Excel et un document explicatif ont également été produit et transmis à la Direction de l'Expertise Hydrique (DEH). Ces fichiers contiennent toutes les données produites dans le cadre du présent projet.

Une contribution importante du projet, initialement méconnue et sous-estimée, a été de mieux documenter les pratiques et procédures actuelles de la DEH. Ainsi la procédure de mise à jour des CT et les hypothèses concernant la représentation des CT par des splines cubiques ont pu être détaillées au bénéfice même de la DEH qui n'avait pas été en mesure de le faire jusqu'ici. Le Chapitre 4 du présent rapport rend compte de ce travail.

Une des pierres angulaires de la présente étude est l'utilisation de la RH pour représenter la relation niveau-débit (h-Q) et construire les CT. Cette approche diffère de celle utilisée actuellement par la DEH qui repose sur l'utilisation de fonctions interpolatrices nommément les splines cubiques. La mise en place de ce type d'approche repose sur l'identification de 'points pivots'. Ces derniers sont fixés de façon arbitraire par les hydrologues de la DEH et les splines cubiques ajustés de façon à passer par ces points pivots. Qui plus est, il est nécessaire de positionner l'un de ces points au-delà du plus grand niveau jaugé (PGNJ) et un autre en deçà du plus petit niveau jaugé (PPNJ). Si le positionnement des points pivots compris entre le PGNJ et le PPNJ peut, dans la plupart des cas, avoir peu d'incidence sur la forme de la CT, il en va autrement du positionnement de ces deux derniers points qui conditionnent la forme de la CT au-delà du PGNJ et en deçà du PPNJ donc dans les parties 'extrapolées' de la CT. Sachant que dans plusieurs cas, le PGNJ ne correspond pas à des conditions de crue particulièrement importantes, il s'en suit que l'estimation des débits de crue se feront très souvent dans cette partie extrapolée des CT.

Cet arbitraire dans le choix des points pivots constitue la principale raison justifiant l'utilisation des RH dans le cadre du présent projet. Même si cette dernière approche n'est pas sans défaut (pour une critique de cette approche, voir Fenton 2018), elle présente plusieurs avantages et repose sur des assises techniques plus solides. Cela dit, son utilisation sans discernement est risquée. L'application à grande échelle dans le cadre de la présente étude a montré que dans plusieurs cas, les résultats obtenus devaient faire

l'objet d'un examen minutieux. Il nous semble très important de souligner ce point. L'importance de la connaissance terrain est incommensurable et toute approche aussi séduisante intellectuellement que scientifiquement soit-elle, ne peut être appliquée sans ce regard et cette expertise de l'hydrologue et du personnel technique responsables des jaugeages et de l'entretien des SH.

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

L'extrapolation de la CT basée sur l'utilisation de fonctions d'interpolation, les splines cubiques pour la DEH, repose sur l'aptitude (ce terme est utilisé à défaut de mieux) de l'hydrologue à positionner des points pivot au-delà du PGNJ ou en deçà du PPNJ. L'exercice en est donc un d'interpolation 'visuelle' sans égard pour les considérations hydrauliques. Ce type d'approche permet donc de bien reproduire la relation niveau-débit pour l'ensemble des jaugeages et ce très simplement. Son extrapolation au-delà du PGNJ ou en-deçà du PPNJ reste toutefois discutable voire hasardeuse.

Ces considérations soulèvent également des questions relativement à la représentation des incertitudes et leurs estimations dans les parties interpolées et encore plus dans les parties extrapolées des CT. L'approche actuelle de la DEH ne permet pas vraiment d'intégrer les incertitudes sur les couples niveau-débit des jaugeages puisque les positions des points pivots sont déterminées de façon arbitraire. Ce faisant il réalise un 'arbitrage' entre les différents jaugeages et détermine la 'meilleure' position selon lui où devrait transiter la CT. Cette approche, bien que sensée, demeure qualitative et difficile à 'formaliser' en termes d'incertitudes.

Les travaux de la présente étude laissent entrevoir plusieurs avenues futures de recherches prometteuses. La plus importante est sans doute liée à l'intégration de considérations hydrauliques dans le développement des CT. Des travaux préliminaires ont permis d'identifier des niveaux critiques aux sections de contrôle. Ces niveaux

critiques sont associés à des changements majeurs dans le profil de la section ou du tronçon de contrôle (p. ex. transition en plaines inondables). Ces niveaux ont été utilisés, dans un premier temps de façon qualitative, pour conférer un niveau de fiabilité aux débits estimés à partir des CT selon la position relative du PGNJ, du niveau critique et du niveau mesuré pour lequel on veut estimer le débit. Ainsi un niveau mesuré dans une partie de la CT non jaugée mais possiblement près du niveau critique sera plus incertain qu'un autre dans la partie jaugée ou pour une CT où la partie jaugée recoupe le niveau critique. Un travail exploratoire a été entrepris pour en arriver à une appréciation plus quantitative des incertitudes dans les parties extrapolées des CT. Les résultats semblent prometteurs mais des analyses supplémentaires, similaires à celles présentées à la Section 8.5.3 seraient nécessaires.

Une autre voie prometteuse consiste à utiliser les résultats de simulations hydrauliques afin d'améliorer les CT disponibles aux sections de contrôle. La modélisation hydraulique permet d'obtenir plus d'informations sur les parties de la CT en conditions de crue, toujours beaucoup plus difficiles à jauger. Une analyse des résultats de simulations hydrauliques sur certains tronçons, gracieusement fournis à l'équipe de recherche, a permis d'apprécier la valeur ajoutée de ce type d'information. Le faible nombre de tronçons modélisés n'a toutefois pas permis une analyse en profondeur. Plusieurs tronçons étant actuellement en voie d'être modélisés dans le cadre du projet INFO-Crue, une étude à plus grande échelle sur plusieurs tronçons où se trouvent des SH sera bientôt possible.

Finalement, il convient de mentionner qu'un aspect important des CT n'a pas été analysé dans le cadre de ce projet. Il s'agit des décalages temporaires des CT induits, par exemple, par la croissance des plantes dans les cours d'eau ou encore à une modification progressive des CT pour diverses raisons notamment une sédimentation importante (Rainville *et al.*, 2016). Cet aspect devrait être considéré dans le cadre de travaux ultérieurs puisqu'il a une incidence sur les incertitudes des débits estimés à partir des CT.



## BIBLIOGRAPHIE

Coles, S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer Series in Statistic, Springer, 208 p.

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.

Fenton J.D. (2018). On the generation of stream rating curves. *J. Hydrol.* 564, 748-757, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.07.025.

Green, J. (2005). Comparison of blockage factors in modelling the resistance of 1030 channels containing submerged macrophytes. *Rivers Research and Applications*, 21;(6), 671-686, DOI: 10.1002/rra.854.

Hamilton, A.S., Moore, R.D. (2012) Quantifying uncertainty in streamflow records. *Can. Water Resour. J.*, 37;(1), 3-21, DOI: 10.4296/cwrj3701865.

Herschy, R.W. (2002). The uncertainty in a current meter measurement. *Flow Meas. Instrum.*, 13;(5-6), 281–284, DOI: 10.1016/S0955-5986(02)00047-X.

Horner, I., Renard, B., Le Coz, J., Branger, F., McMillan, H.K., Pierrefeu, G. (2018). Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty. *Water Resour. Res.*, 54, 1952–1976, DOI: 10.1002/2017WR022039.

Hoskin, J.R.M., Wallis, J.R. (1997). Regional frequency analysis – an approach based on L-Moments. Cambridge University Press, DOI: 10.1017/CBO9780511529443.

Hrafinkelsson, 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.

Kennedy, E.J. (1990). Levels at streamflow gaging stations. Chapter A19, Techniques of water-resources investigations of the United States Geological Survey, book 3, 26 p. En ligne: [https://pubs.usgs.gov/twri/twri3-A19/pdf/twri\\_3-A19\\_a.pdf](https://pubs.usgs.gov/twri/twri3-A19/pdf/twri_3-A19_a.pdf), consulté le 20 juin 2022.

Kenney, T.A. (2010). Levels at gaging stations. Chapter 19 of Section A, Surface-water techniques Book 3, Applications of Hydraulics, U.S. Geological Survey Techniques and Methods. 3-A19, 60 p. En ligne: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/tm3A19>, consulté le 20 juin 2022.

Kiang, J. E., Gazorian, C., McMillan, H., Coxon, G., Le Coz, J., Westerberg, I. K. et al. (2018). A comparison of methods for streamflow uncertainty estimation. *Water Resour. Res.*, 54, 7149–7176 DOI: 10.1029/2018WR022708.

Lang, M., Pobanz, K. Renard, B., Renouf, E., Sauquet, E. (2010). Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis, *Hydrolog. Sci. J.*, 55;(6), 883-898, DOI: 10.1080/02626667.2010.504186.

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.

Le Coz J., Chaleon C., Bonnifait L., Le Boursicaud R., Renard B., Branger F., Diribarne J., Valente M. (2013). Analyse bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes : la méthode BaRatin. *La Houille Blanche*, 6, 31-41, DOI :10.1051/lhb/2013048.

Le Coz, J., Camenen, B., Dramais, G., Ribot-Bruno, J., Ferry, M., Rosique, J.-L. (2011). Contrôle des débits réglementaires : Application de l'article L. 214-18 du Code de l'environnement. Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), 128 p. En ligne : [http://www.fomodo.fr/files/ONEMA\\_controle-debits-reglementaires\\_11-2011.153.pdf](http://www.fomodo.fr/files/ONEMA_controle-debits-reglementaires_11-2011.153.pdf), consulté le 20 juin 2022.

Mailhot, A., Bolduc, S., Jalbert, J. Talbot, G., Jebali, R. (2021). Évaluation des incertitudes sur les débits de crues maximales estimés à partir des données hydrométriques pour les bassins du Québec méridional. Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, Polytechnique Montréal, Consortium Ouranos, Ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques, 102 p.

Mansanarez, V., Renard, B., Le Coz, J., Lang, M., Darienzo, M. (2019a). Shift happens! Adjusting stage-discharge rating curves to morphological changes at known times. *Water Resour. Res.*, 55;(4), 2876-2899, DOI: 10.1029/2018WR023389.

Mansanarez, V., Westerberg, I.K., Lam, N., Lyon, S.W. (2019b). Rapid stage-discharge rating curve assessment using hydraulic modeling in an uncertainty framework. *Water Resour. Res.*, 55;(11), 9765-9787, DOI: 10.1029/2018WR024176.

McMahon, A., Peel, M. C. (2019). Uncertainty in stage–discharge rating curves: application to Australian hydrologic reference stations data. *Hydrolog. Sci. J.*, 64;(3), 255-275, DOI: 10.1080/02626667.2019.1577555.

McMillan, H., Seibert, J., Petersen-Overleir, A., Lang, M., White, P., Snelder, T., Rutherford, K., Krueger, T., Mason, R., Kiang J. (2017). How uncertainty analysis of

streamflow data can reduce costs and promote robust decisions in water management applications. *Water Resour. Res.*, 53, 5220–5228, DOI: 10.1002/2016WR020328.

McMillan H & Westerberg, I.K. (2015). Rating curve estimation under epistemic uncertainty. *Hydrol. Process.*, Wiley Online Library, 29:1873–1882.

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.

McMillan, H., Freer, J., Pappenberger, F., Krueger, T., Clark, M. (2010). Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions. *Hydrol. Process.*, 24;(10), 1270-1284, DOI: 10.1002/hyp.7587.

Morlot T, Perret C, Favre AC & Jalbert J (2014). Dynamic rating curve assessment for hydrometric stations and computation of the associated uncertainties: quality and station management indicators. *J. Hydrol.*, 517:173–186, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.007.

Mueller, D.S., Wagner, C.R. (2009). Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 3–A22, 72 p. En ligne: [https://pubs.usgs.gov/tm/3a22/pdf/tm3a22\\_lowres.pdf](https://pubs.usgs.gov/tm/3a22/pdf/tm3a22_lowres.pdf), consulté le 20 juin 2022.

Mueller, D.S., Wagner, C.R., Rehmel, M.S., Oberg, K.A., Rainville, F. (2013). Measuring discharge with acoustic doppler current profilers from a moving boat. Chapter 22 of Section A, Surface-Water Techniques, Book 3, Applications of hydraulics, Techniques and methods 3-A22, Version 2.0, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 95 p.

Oberg, K.A., Morlock, S.E., Caldwell, W.S. (2005). Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Acoustic Doppler Current Profilers. Scientific investigations report 2005-5183, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 35 p. En ligne: <https://pubs.usgs.gov/sir/2005/5183/>, consulté le 20 juin 2022.

Oberg, K.A. Mueller, D.S. (2007). Validation of streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers. *J. Hydraul. Eng.*, 133;(12), 1421–1432, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:12(1421).

Pelletier, P.M. (1988). Uncertainties in the determination of river discharge: A literature review. *Can. J. Civil Eng.*, 15;(5), 834–850, DOI: 10.1139/l88-109.

Perret, E., Renard, B., Le Coz. J., (2021). A rating curve model accounting for cyclic stage discharge shifts due to seasonal aquatic vegetation. *Water Resour. Res.*, 57;(3), pp.28, DOI: 10.1029/2020WR027745.

Pettitt A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *J. R. Stat. Soc. Series C (Appl. Stat.)*, 28;(2):126–135.

Puechberty, R., Perret, C., Pitsch, S., P., Battaglia, P., Belleville, A., Bompard, P., Chauvel, G., Cousseau, J., Dramais, G., Glaziou, G. (2017). Charte qualité de l'hydrométrie : Guide de bonnes pratiques. Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, France, p.83.

Rainville F., Hutchinson D., Stead A., Moncur D., Elliott D. (2016). Hydrometric manual—Data computations, stage-discharge model development and maintenance, Water Survey of Canada, Environment and Climate Change Canada, 40 p.

Rantz, S.E. (1982). Measurement and computation of streamflow; Volume 1. Measurement of stage and discharge. Geological survey water-supply Paper 2175, USGS, En ligne: <https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2175/wsp2175.pdf>, consulté le 20 juin 2022.

RNC (2020). Modernisation du système de référence altimétrique. Ressources naturelles Canada. Version 2.0 (2020-10-21). LGC2020-002. 27 p. En ligne : [https://www.rncan.gc.ca/sites/nrcan/files/files/pdf/Height\\_reference\\_system\\_modernization\\_\(FR\).pdf](https://www.rncan.gc.ca/sites/nrcan/files/files/pdf/Height_reference_system_modernization_(FR).pdf), consulté le 21 juin 2022.

Sauer, V.B., Turnipseed, P. (2010). Stage measurement at gaging stations. Techniques and methods, 3-A7, Chapter 7 of Book 3, Section A, U.S. Department of the interior, U.S Geological survey, 45 p. En ligne: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/tm3A7>, consulté le 20 juin 2022.

Simpson, M.R. (2002). Discharge measurements using a broad-band acoustic doppler current profiler. United States Geological Survey, Open-file report 01-1, 123 p. En ligne: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr011>, consulté le 20 juin 2022.

SonTeck/Xylem Inc. (2019). FlowTracker2 User's manual 1.6. Firmware version 1.3, Software version 1.6, 9940 Summers Ridge Road, San Diego, CA 92121-3091 USA, 307 p.

Théoret, R. (1968). Ajustement mathématique d'une courbe de tarage par juxtaposition de cubiques : Méthode des points pivots. Ministère des richesses naturelles du Québec, Service de l'hydrométrie, 44 p.

Thériault. Y. (2010). Guide sur les référentiels géodésiques et altimétriques au Québec. Gouvernement du Québec. Ministère des ressources naturelles et de la Faune. 91 p., En ligne : [https://mern.gouv.qc.ca/documents/territoire/guide\\_sur\\_les\\_referentiels.pdf](https://mern.gouv.qc.ca/documents/territoire/guide_sur_les_referentiels.pdf).

Turnipseed, P., Sauer, V. B. (2010). Discharge measurements at gaging stations. Techniques and methods, 3-A8, Chapter 8 of Book 3, Section A, U.S. Department of the

interior, U.S Geological survey, 87 p. En ligne: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/tm3A8>, consulté le 20 juin 2022.

Wald A., Wolfowitz J. (1940). On a test whether two samples are from the same population, *Ann. Math Statist.*, 11, 147-162.

WMO (2010a). Manual on stream gauging. Volume I – Fieldwork. World meteorological organization, QMO-No 1044, En ligne: [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=540#.YCPy82hKg2w](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=540#.YCPy82hKg2w), consulté le 20 juin 2022.

WMO (2010b). Manual on stream gauging. Volume II – Computation of discharge. World meteorological organization, QMO-No 1044, En ligne: [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=538#.YCPzWmhKg2w](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=538#.YCPzWmhKg2w), consulté le 20 juin 2022.

Young, K.B. (1950). A comparative study of mean-section and mid-section methods for computation of discharge measurements. United States Department of the Interior, Geological survey, *Water Resources Division*, 52 p.



## ANNEXE A. CARACTÉRISTIQUES DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES RETENUES POUR LES ANALYSES

Tableau A.1 – Caractéristiques géographiques des stations hydrométriques, types de données et de régime d'écoulement

Numéro	Nom station	Superficie (km <sup>2</sup> )	Coordonnées géographiques		Type de données	Régime
			Latitude	Longitude		
010802	Bonaventure	1906	48.187	-65.559	Débit	Naturel
010902	Petite rivière Cascapédia	1340	48.232	-65.733	Débit	Naturel
011003	Cascapédia	1690	48.629	-66.166	Débit	Naturel
011204	Nouvelle	1139	48.159	-66.349	Débit	Naturel
011508	Décharge du lac Matapédia	555	48.492	-67.449	Débit	Naturel
011509	Matapédia	2753	48.108	-67.130	Débit	Naturel
011707	Madawaska	2708	47.538	-68.600	Débit	Influencé mois
020404	York	647	48.807	-64.917	Débit	Naturel
020602	Dartmouth	626	48.978	-64.700	Débit	Naturel
021407	Sainte-Anne	772	49.044	-66.476	Débit	Naturel
021601	Matane	1655	48.774	-67.540	Débit	Influencé jour
021702	Blanche	223	48.767	-67.666	Débit	Influencé jour
021916	Petite rivière Neigette	98.6	48.420	-68.356	Débit	Naturel
022003	Rimouski	1615	48.413	-68.555	Débit	Influencé jour
022301	Des Trois-Pistoles	930	48.089	-69.195	Débit	Influencé jour
022505	Fourchue	267	47.651	-69.512	Débit	Influencé mois
022507	Du Loup	515	47.612	-69.645	Débit	Naturel
022513	Du Loup	1042	47.822	-69.517	Débit	Influencé mois
022601	Kamouraska	213	47.533	-69.849	Débit	Naturel
022704	Ouelle	796	47.381	-69.954	Débit	Naturel
023002	Boyer Sud	61	46.708	-70.961	Débit	Naturel
023004	Boyer	191	46.816	-70.901	Débit	Naturel

Numéro	Nom station	Superficie (km <sup>2</sup> )	Coordonnées géographiques		Type de données	Régime
			Latitude	Longitude		
023106	Du Sud	821	46.820	-70.756	Débit	Influencé jour
023303	Etchemin	1152	46.691	-71.068	Débit	Naturel
023401	Beaurivage	708	46.657	-71.289	Débit	Naturel
023402	Chaudière	5820	46.587	-71.214	Débit	Influencé jour
023422	Famine	696	46.167	-70.639	Débit	Naturel
023427	Chaudière	781	45.573	-70.880	Débit	Influencé mois
023429	Chaudière	3085	46.096	-70.654	Débit	Influencé mois
023432	Bras d'Henri	154	46.540	-71.340	Débit	Naturel
023445	Bras d'Henri	46.3	46.507	-71.212	Débit	Naturel
023448	Chaudière	2009	45.948	-70.657	Débit	Influencé mois
023702	Petite rivière du Chêne	385	46.541	-72.093	Débit	Naturel
024003	Bécancour	914	46.306	-71.451	Débit	Naturel
024014	Bécancour	2163	46.199	-72.098	Débit	Naturel
024015	Bourbon	48.1	46.184	-71.754	Débit	Naturel
024016	Osgood	74.2	46.224	-71.383	Débit	Naturel
030101	Nicolet Sud-Ouest	562	45.792	-71.968	Débit	Influencé jour
030103	Nicolet	1550	46.060	-72.313	Débit	Naturel
030106	Bulstrode	344	46.071	-71.978	Débit	Influencé
030208	Saint-François	7930	45.406	-71.889	Débit	Influencé
030215	Coaticook	514	45.284	-71.901	Débit	Influencé jour
030220	Massawippi	610	45.284	-71.963	Débit	Influencé mois
030225	Saint-François	1218	45.943	-71.279	Débit	Influencé
030234	Eaton	646	45.468	-71.655	Débit	Naturel
030278	Saint-François	1719	45.760	-71.408	Débit	Influencé mois
030282	Au Saumon	769	45.580	-71.385	Débit	Naturel
030284	Saint-François	2934	45.658	-71.468	Débit	Influencé mois

Numéro	Nom station	Superficie (km <sup>2</sup> )	Coordonnées géographiques		Type de données	Régime
			Latitude	Longitude		
030299	St-Germain	273	45.897	-72.505	Débit	Naturel
030302	Yamaska	1231	45.283	-72.966	Débit	Influencé mois
030304	Noire	1505	45.500	-72.906	Débit	Influencé jour
030309	Yamaska Nord	131	45.418	-72.615	Débit	Influencé mois
030314	Yamaska Sud-Est	214	45.206	-72.748	Débit	Influencé
030316	David	323	45.954	-72.860	Débit	Naturel
030340	Yamaska Nord	235	45.360	-72.780	Débit	Influencé jour
030343	Yamaska Nord	31.2	45.350	-72.515	Débit	Influencé jour
030345	Yamaska	3334	45.629	-72.939	Débit	Influencé jour
030348	Runnels	102	45.591	-72.639	Débit	Influencé
030351	Yamaska	184	45.283	-72.509	Débit	Influencé
030353	Yamaska	230.9	45.302	-72.594	Débit	Influencé jour
030415	Des Hurons	308	45.491	-73.186	Débit	Naturel
030421	L'Acadie	367	45.390	-73.371	Débit	Naturel
030423	Morpions	94.1	45.198	-73.033	Débit	Naturel
030424	Aux Brochets	584	45.159	-73.051	Débit	Naturel
030425	De la Roche	72.6	45.022	-73.016	Débit	Naturel
030426	Ewing	26.3	45.125	-73.077	Débit	Naturel
030429	À l'Ours	35.1	45.522	-73.123	Débit	Naturel
030430	Richelieu	21453	45.077	-73.326	Niveau	Influencé
030905	Châteauguay	2492	45.330	-73.762	Débit	Influencé jour
030907	Des Anglais	642	45.158	-73.825	Débit	Naturel
030919	Châteauguay	1051	45.087	-74.172	Débit	Influencé jour
030920	Noire	46.5	45.077	-73.850	Débit	Naturel
030921	Des Anglais	246	45.100	-73.762	Débit	Naturel
040110	Du Nord	1163	45.795	-74.013	Débit	Influencé mois

Numéro	Nom station	Superficie (km <sup>2</sup> )	Coordonnées géographiques		Type de données	Régime
			Latitude	Longitude		
040122	Du Nord	311	46.046	-74.253	Débit	Influencé mois
040129	Doncaster	106	46.096	-74.121	Débit	Naturel
040132	Décharge du lac Ludger	40.3	46.119	-74.276	Débit	Influencé mois
040204	Rouge	5479	45.738	-74.689	Débit	Influencé jour
040212	Saint-Louis	40	46.374	-74.505	Débit	Naturel
040238	Du Diable	1160	46.115	-74.602	Débit	Influencé
040406	De la Petite Nation	1331	45.791	-75.089	Débit	Influencé
040409	Suffolk	62.6	45.884	-75.022	Débit	Naturel
040619	Mitchinamecus	1053	47.184	-75.148	Débit	Influencé mois
040624	Du Lièvre	4560	46.785	-75.312	Débit	Influencé mois
040627	Kiamika	879	46.650	-75.247	Débit	Influencé mois
040830	Gatineau	6768	47.083	-75.754	Débit	Naturel
040840	Picanoc	1277	46.078	-76.069	Débit	Naturel
040841	Désert	1646	46.590	-76.041	Débit	Naturel
041902	Dumoine	3756	46.346	-77.816	Débit	Naturel
042610	Kipawa	5977	47.042	-79.273	Débit	Influencé mois
043003	Des Outaouais	10308	47.844	-77.549	Débit	Influencé mois
043012	Kinojévis	2594	48.366	-78.854	Débit	Naturel
043030	Capitachouane	1090	47.729	-76.715	Débit	Naturel
043301	Des Prairies	146920	45.522	-73.846	Débit	Influencé mois
046709	du Chêne	196	45.560	-73.975	Débit	Naturel
048603	Gordon	6032	46.767	-79.028	Débit	Influencé mois
050119	Matawin	1387	46.684	-73.915	Débit	Naturel
050135	Croche	1563	47.769	-72.735	Débit	Naturel
050144	Vermillon	2662	47.677	-73.041	Débit	Influencé jour
050304	Batiscan	4504	46.586	-72.405	Débit	Naturel

Numéro	Nom station	Superficie (km <sup>2</sup> )	Coordonnées géographiques		Type de données	Régime
			Latitude	Longitude		
050408	Sainte-Anne	1546	46.852	-71.875	Débit	Influencé jour
050409	Bras du Nord	646	46.977	-71.847	Débit	Naturel
050501	La Chevrotière	19.4	46.737	-72.001	Débit	Naturel
050702	Portneuf	328	46.728	-71.841	Débit	Naturel
050801	Jacques-Cartier	1997	46.893	-71.526	Débit	Influencé jour
050807	Ontaritz	223	46.868	-71.637	Débit	Influencé mois
050812	Aux Pommes	97.8	46.696	-71.688	Débit	Naturel
050813	Décharge du lac Clair	2.2	46.966	-71.664	Débit	Naturel
050904	Saint-Charles	365	46.816	-71.320	Débit	Influencé
050915	Nelson	58.4	46.868	-71.425	Débit	Naturel
050916	Des Hurons	75.5	47.003	-71.362	Débit	Naturel
051001	Montmorency	1107	46.896	-71.152	Débit	Influencé jour
051002	Des Eaux Volées	3.8	47.272	-71.162	Débit	Naturel
051003	Des Eaux Volées	9.1	47.271	-71.137	Débit	Naturel
051004	Des Aulnaies	1.1	47.290	-71.162	Débit	Naturel
051005	Montmorency	267	47.260	-71.137	Débit	Naturel
051007	Des Aulnaies	3.7	47.272	-71.160	Débit	Naturel
051502	Malbaie	1707	47.694	-70.218	Débit	Influencé jour
052212	Ouareau	1263	46.031	-73.705	Débit	Influencé jour
052219	L'Assomption	1286.3	46.013	-73.429	Débit	Influencé jour
052228	Noire	188	46.341	-73.654	Débit	Naturel
052233	De l'Achigan	632.4	45.846	-73.493	Débit	Naturel
052235	Saint-Pierre	27.8	45.977	-73.440	Débit	Naturel
052401	Bayonne	194	46.157	-73.391	Débit	Naturel
052601	Maskinongé	1017	46.301	-73.096	Débit	Influencé jour
052605	Maskinongé	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Numéro	Nom station	Superficie (km <sup>2</sup> )	Coordonnées géographiques		Type de données	Régime
			Latitude	Longitude		
052606	Mastigouche	205	46.4416667	-73.461889	Débit	Influencé jour
052805	Du Loup	769	46.6005	-73.186083	Débit	Influencé jour
052810	Du Loup	1419	46.2969083	-72.911908	Débit	Naturel
054001	Beauport	23.9	46.8640528	-71.206169	Débit	Naturel
060102	Petit Saguenay	433	48.0917778	-70.029611	Débit	Naturel
060704	À Mars	446	48.2049722	-70.997917	Débit	Naturel
060901	Du Moulin	358	48.3944444	-71.042361	Débit	Naturel
061004	Chicoutimi	3444	48.30775	-71.211194	Débit	Influencé mois
061020	Aux Écorces	1115	48.1826944	-71.644833	Débit	Naturel
061022	Pikauba	490	47.9418611	-71.382222	Débit	Naturel
061024	Cyriac	350	48.2359444	-71.288472	Débit	Naturel
061028	Pikauba	2639	48.3053889	-71.440806	Débit	Naturel
061029	Aux Sables	3400	48.3723889	-71.286083	Débit	Influencé mois
061307	La Belle Rivière	306	48.4118333	-71.703472	Débit	Naturel
061502	Métabetchouane	2212	48.3754167	-71.996694	Débit	Naturel
061602	Ouiatchouan	576	48.20375	-72.240111	Débit	Influencé mois
061801	Petite rivière Péribonka	1020	48.81475	-72.046361	Débit	Naturel
061901	Ashuapmushuan	15515	48.6856111	-72.487667	Débit	Naturel
061909	Aux Saumons	591	48.6838889	-72.512694	Débit	Naturel
062002	Rouge	26.8	48.8037778	-72.492056	Débit	Naturel
062102	Mistassini	9631	48.8886667	-72.272389	Débit	Naturel
062114	Mistassibi	8643.9	48.9425278	-72.172556	Débit	Naturel
062701	Valin	768	48.4879444	-70.972194	Débit	Naturel
062803	Sainte-Marguerite Nord-Est	1097	48.268025	-69.9092	Débit	Naturel
064101	Aux Iroquois	177	48.58315	-72.379039	Débit	Naturel
070204	Des Escoumins	768	48.3713889	-69.473611	Débit	Influencé jour

Numéro	Nom station	Superficie (km <sup>2</sup> )	Coordonnées géographiques		Type de données	Régime
			Latitude	Longitude		
071203	Aux Anglais	431	49.3227778	-68.157194	Débit	Influencé
071401	Godbout	1577	49.33075	-67.654583	Débit	Naturel
071801	Riverin	219.5	49.8186083	-67.164114	Débit	Naturel
072301	Moisie	19012	50.3525	-66.186667	Débit	Naturel
073503	Magpie	7201	50.6855556	-64.578611	Débit	Naturel
074903	Natashquan	15693	50.4275	-61.712222	Débit	Naturel
075705	Du Petit Mécatina	19191	50.6808333	-59.601944	Débit	Naturel
076601	Saint-Paul	5504	51.7708333	-57.601111	Débit	Naturel
080101	Harricana	3724	48.59775	-78.110222	Débit	Naturel
080106	Bourlamaque	365	48.0894444	-77.670414	Débit	Naturel
080707	Bell	22275	49.7546111	-77.617028	Débit	Naturel
080718	Waswanipi	31964	49.8575	-77.187222	Débit	Naturel
080809	Broadback	9855	50.7458056	-76.387194	Débit	Naturel
081101	Pontax	5970	51.533467	-78.096482	Débit	Naturel
089907	Bellefeuille	222	48.7440889	-78.861844	Débit	Naturel
093801	Grande rivière de la Baleine	32469	55.2378889	-76.984778	Débit	Naturel
095003	Lac des Loups Marins	9176	56.454527	-74.231472	Débit	Naturel
102706	Aux Feuilles	33700	58.2777778	-71.311667	Débit	Naturel
103605	Aux Mélèzes	40429	57.6797	-69.6171	Débit	Naturel
103702	Caniapiscau	48903	57.4169167	-69.245556	Débit	Naturel
104001	À la Baleine	29878	57.8885556	-67.600083	Débit	Naturel
104803	George	24098	56.783	-64.86811	Débit	Naturel
120201	Dauphine	26.6	46.9666944	-70.855694	Débit	Naturel

Tableau A.2 - Caractéristiques sur les opérations des stations hydrométriques et les jaugeages disponibles

Numéro	État	Disponibilité des données		Nombre de d'année disponibles	Jaugeage				
		Début	Fin		Premier	Dernier	Période couverte (année)	Total	Eau libre
010802	Ouvert	1981	2020	40	1981-05-11	2020-09-22	39	117	108
010902	Ouvert	1981	2019	39	1981-05-10	2019-10-08	38	96	96
011003	Ouvert	1984	2018	35	1984-05-27	2018-11-07	34	104	82
011204	Ouvert	2002	2020	19	2017-05-10	2020-09-23	3	69	67
011508	Ouvert	1982	2019	38	1982-06-01	2019-10-10	37	90	86
011509	Ouvert	1996	2020	25	1996-11-07	2020-09-23	24	55	55
011707	Ouvert	2003	2020	18	2003-05-07	2020-10-01	17	31	31
020404	Ouvert	1981	2020	40	1981-05-16	2020-07-07	39	115	107
020602	Ouvert	1970	2020	51	1970-05-05	2020-09-16	50	110	100
021407	Ouvert	1978	2020	43	1978-05-29	2020-07-06	42	136	120
021601	Ouvert	1979	2020	42	1979-05-01	2020-09-14	41	81	80
021702	Ouvert	1979	2020	42	1979-05-02	2020-09-24	41	79	75
021916	Ouvert	1997	2020	24	1997-08-19	2020-09-21	23	58	58
022003	Ouvert	1968	2018	51	1997-04-23	2018-06-12	21	58	54
022301	Ouvert	1939	2020	82	1939-05-08	2020-10-01	81	73	71
022505	Ouvert	1969	2020	52	1978-05-10	2020-06-08	42	48	45
022507	Ouvert	1978	2020	43	1986-10-23	2020-09-30	34	116	112
022513	Ouvert	1961	2018	58	1961-06-22	2018-05-16	57	103	101
022601	Ouvert	2008	2020	13	2008-06-16	2020-05-05	12	30	30
022704	Ouvert	1982	2020	39	1991-05-15	2020-08-20	29	80	73
023002	Ouvert	1995	2019	25	1995-04-25	2019-08-27	24	105	105
023004	Ouvert	1996	2017	22	1996-05-30	2017-08-16	21	62	58
023106	Ouvert	1966	2019	54	1966-09-14	2019-08-27	53	106	103

Numéro	État	Disponibilité des données		Nombre de d'année disponibles	Jaugeage				
		Début	Fin		Premier	Dernier	Période couverte (année)	Total	Eau libre
023303	Ouvert	1980	2020	41	1980-04-11	2020-06-25	40	63	61
023401	Ouvert	1929	2020	92	1929-04-30	2020-06-25	91	59	54
023402	Ouvert	1923	2019	97	1968-04-02	2019-10-03	52	86	84
023422	Ouvert	1964	2017	54	1964-08-13	2017-10-02	53	133	130
023427	Ouvert	1982	2019	38	2001-04-30	2019-10-28	19	62	60
023429	Ouvert	1980	2017	38	1980-04-12	2017-10-02	37	79	75
023432	Ouvert	1972	2020	49	1988-11-03	2020-06-30	32	91	91
023445	Fermé	2006	2013	8	2006-06-13	2013-06-12	7	30	29
023448	Ouvert	2012	2020	9	2012-05-10	2020-06-23	8	23	23
023702	Ouvert	2006	2020	15	2006-05-12	2020-06-26	14	41	41
024003	Ouvert	1967	2020	54	1967-04-13	2020-06-30	53	100	95
024014	Ouvert	2000	2018	19	2000-04-18	2018-05-04	18	27	26
024015	Ouvert	2006	2020	15	2006-07-24	2020-06-29	14	38	38
024016	Ouvert	2011	2020	10	2016-03-01	2020-06-30	4	56	54
030101	Ouvert	1970	2020	51	1970-07-17	2020-06-26	50	82	79
030103	Ouvert	1967	2020	54	1967-04-17	2020-06-22	53	95	88
030106	Ouvert	1982	2020	39	1982-04-19	2020-10-07	38	63	59
030208	Ouvert	1990	2018	29	1990-05-07	2018-09-14	28	37	37
030215	Ouvert	1961	2019	59	1961-05-04	2019-09-24	58	82	78
030220	Ouvert	1956	2020	65	1956-05-05	2020-06-22	64	89	85
030225	Ouvert	1972	2019	48	1972-06-07	2019-09-30	47	65	65
030234	Ouvert	1969	2017	49	1969-04-12	2017-06-27	48	69	62
030278	Ouvert	1978	2019	42	1978-09-13	2019-09-30	41	54	51
030282	Ouvert	1975	2018	44	1975-04-23	2018-04-27	43	87	80
030284	Ouvert	1979	2018	40	1979-03-20	2018-09-27	40	48	47
030299	Ouvert	2014	2019	6	2014-06-19	2019-09-25	5	31	31

Numéro	État	Disponibilité des données		Nombre de d'année disponibles	Jaugeage				
		Début	Fin		Premier	Dernier	Période couverte (année)	Total	Eau libre
030302	Ouvert	1966	2019	54	1966-03-27	2019-04-26	53	85	83
030304	Ouvert	1966	2018	53	2011-07-20	2018-10-23	7	108	106
030309	Ouvert	1977	2020	44	1977-09-01	2020-06-04	43	82	80
030314	Ouvert	1968	2019	52	1997-11-12	2019-02-14	21	140	137
030316	Ouvert	1969	2019	51	1969-04-12	2019-04-15	50	133	126
030340	Ouvert	1983	2019	37	1983-11-04	2019-04-16	35	88	85
030343	Ouvert	1981	2018	38	1990-10-25	2018-10-24	28	116	112
030345	Ouvert	1994	2018	25	1994-10-26	2018-10-22	24	67	67
030348	Ouvert	2000	2020	21	2000-06-14	2020-06-25	20	68	66
030351	Fermé	2005	2013	9	2005-10-14	2013-09-26	8	27	27
030353	Ouvert	2014	2020	7	2014-09-11	2020-06-04	6	29	29
030415	Ouvert	1974	2019	46	1974-03-07	2019-09-19	46	120	118
030421	Ouvert	1979	2020	42	2006-05-08	2020-05-12	14	115	113
030423	Ouvert	1999	2020	22	2005-04-21	2020-06-04	15	64	64
030424	Ouvert	2002	2020	19	2002-04-09	2020-06-03	18	39	39
030425	Ouvert	2002	2020	19	2002-04-09	2020-07-31	18	60	49
030426	Ouvert	2002	2020	19	2002-04-09	2020-07-31	18	42	42
030429	Ouvert	2006	2020	15	2006-07-25	2020-06-25	14	34	34
030430	Ouvert	2011	2014	4	2011-11-22	2014-09-24	3	6	6
030905	Ouvert	1970	2019	50	1970-04-16	2019-09-16	49	95	94
030907	Ouvert	1974	2020	47	1974-03-08	2020-06-01	46	87	85
030919	Ouvert	2004	2020	17	2004-09-22	2020-06-24	16	33	33
030920	Ouvert	2005	2020	16	2005-07-07	2020-01-23	15	43	43
030921	Ouvert	2005	2020	16	2005-07-07	2020-06-01	15	35	34
040110	Ouvert	1960	2020	61	1960-04-20	2020-06-16	60	69	68
040122	Ouvert	1970	2018	49	1970-10-29	2018-06-11	48	90	88

Numéro	État	Disponibilité des données		Nombre de d'année disponibles	Jaugeage				
		Début	Fin		Premier	Dernier	Période couverte (année)	Total	Eau libre
040129	Ouvert	1974	2019	46	1974-10-31	2019-10-10	45	82	82
040132	Ouvert	1983	2019	37	1983-10-05	2019-05-22	36	72	65
040204	Ouvert	1962	2020	59	1962-04-21	2020-06-08	58	109	106
040212	Ouvert	1968	2019	52	1968-08-20	2019-10-08	51	103	102
040238	Ouvert	2010	2018	9	2010-04-07	2018-05-05	8	24	24
040406	Ouvert	1972	2020	49	1972-05-03	2020-06-09	48	72	67
040409	Ouvert	1976	2019	44	1976-05-21	2019-10-03	43	94	93
040619	Ouvert	1977	2019	43	1977-08-27	2019-09-19	42	45	43
040624	Ouvert	1979	2020	42	1979-05-09	2020-06-10	41	49	47
040627	Ouvert	1990	2018	29	1990-08-15	2018-06-15	28	29	29
040830	Ouvert	1974	2019	46	1974-11-13	2019-09-17	45	57	55
040840	Ouvert	2004	2020	17	2004-11-18	2020-06-11	16	29	29
040841	Ouvert	2005	2019	15	2005-04-30	2019-10-01	14	36	36
041902	Ouvert	1965	2019	55	1965-06-30	2019-09-30	54	58	54
042610	Ouvert	2008	2019	12	2008-10-14	2019-09-28	11	13	13
043003	Ouvert	1977	2018	42	1977-09-16	2018-09-26	41	41	41
043012	Ouvert	1965	2020	56	1965-04-30	2020-06-17	55	73	72
043030	Ouvert	2005	2020	16	2005-11-02	2020-06-16	15	19	19
043301	Ouvert	1968	2020	53	1968-10-17	2020-06-16	52	40	40
046709	Ouvert	2010	2020	11	2010-04-07	2020-10-05	11	43	41
048603	Ouvert	2008	2019	12	2008-10-15	2019-09-29	11	9	9
050119	Ouvert	1969	2018	50	1977-09-13	2018-05-04	41	111	106
050135	Ouvert	1965	2019	55	1965-05-05	2017-10-03	52	113	108
050144	Ouvert	1983	2020	38	1983-06-01	2020-09-14	37	53	53
050304	Ouvert	1967	2020	54	1967-04-28	2020-06-09	53	70	70
050408	Ouvert	1965	2020	56	1965-05-13	2020-05-31	55	74	72

Numéro	État	Disponibilité des données		Nombre de d'année disponibles	Jaugeage				
		Début	Fin		Premier	Dernier	Période couverte (année)	Total	Eau libre
050409	Ouvert	1965	2020	56	1965-05-14	2020-10-01	55	89	87
050501	Ouvert	2006	2020	15	2015-04-23	2020-10-07	5	49	47
050702	Ouvert	2002	2018	17	2002-04-22	2018-07-20	16	33	33
050801	Ouvert	1925	2018	94	1925-05-21	2018-09-25	93	63	60
050807	Ouvert	1976	2019	44	1976-10-13	2019-04-02	42	55	50
050812	Ouvert	1987	2019	33	1987-06-01	2019-10-18	32	98	98
050813	Ouvert	1990	2019	30	1995-07-18	2019-09-17	24	61	54
050904	Ouvert	1968	2020	53	1968-04-25	2020-10-01	52	108	108
050915	Ouvert	2006	2020	15	2006-06-14	2020-06-12	14	87	78
050916	Ouvert	2007	2019	13	2007-11-19	2019-09-19	12	81	56
051001	Ouvert	1966	2020	55	1966-05-25	2020-10-02	54	65	61
051002	Ouvert	1966	2018	53	1966-05-27	2018-07-12	52	33	33
051003	Ouvert	1968	2019	52	1968-06-21	2019-06-25	51	24	24
051004	Ouvert	1968	2018	51	1968-06-21	2018-07-12	50	27	27
051005	Ouvert	1966	2017	52	1997-06-19	2017-10-31	20	74	73
051007	Ouvert	1972	2018	47	1998-06-08	2018-07-12	20	93	92
051502	Ouvert	1968	2019	52	1996-11-08	2019-10-25	23	113	108
052212	Ouvert	1965	2020	56	1965-05-29	2020-06-24	55	96	94
052219	Ouvert	1962	2018	57	1962-05-10	2018-10-15	56	81	80
052228	Ouvert	1974	2019	46	1974-10-30	2019-05-24	45	96	95
052233	Ouvert	1979	2017	39	1979-09-04	2017-10-25	38	83	78
052235	Ouvert	2000	2019	20	2000-07-18	2019-04-20	19	67	67
052401	Ouvert	2009	2018	10	2015-04-24	2018-07-19	3	32	32
052601	Ouvert	1935	2020	86	1935-05-03	2020-10-05	85	94	91
052605		1999	2018	20	1999-11-26	2018-07-18	19	14	14
052606	Ouvert	1995	2019	25	1995-06-21	2019-10-16	24	57	56

Numéro	État	Disponibilité des données		Nombre de d'année disponibles	Jaugeage				
		Début	Fin		Premier	Dernier	Période couverte (année)	Total	Eau libre
052805	Ouvert	1966	2019	54	1966-04-14	2019-10-16	54	86	80
052810	Fermé	2009	2015	7	2013-06-17	2015-08-27	2	28	28
054001	Ouvert	2006	2020	15	2006-06-14	2020-10-15	14	67	67
060102	Ouvert	1999	2017	19	1999-05-17	2017-05-10	18	38	38
060704	Ouvert	2009	2020	12	2009-04-27	2020-07-06	11	29	29
060901	Ouvert	2008	2018	11	2008-04-28	2018-10-17	10	29	26
061004	Ouvert	1963	2020	58	1963-08-29	2020-07-07	57	65	62
061020	Ouvert	1970	2019	50	1970-05-10	2019-10-21	49	68	64
061022	Ouvert	1970	2019	50	1970-05-11	2019-10-21	49	88	84
061024	Ouvert	1996	2020	25	1996-11-15	2020-06-07	24	42	42
061028	Ouvert	2000	2016	17	2000-08-26	2016-07-05	16	11	11
061029	Ouvert	2009	2019	11	2009-09-17	2019-06-17	10	21	21
061307	Ouvert	1996	2019	24	1996-11-13	2019-10-23	23	63	63
061502	Ouvert	1977	2020	44	1977-10-24	2020-09-23	43	51	51
061602	Ouvert	1967	2020	54	1984-10-30	2020-09-15	36	85	80
061801	Ouvert	1975	2020	46	1975-05-19	2020-09-16	45	65	65
061901	Ouvert	1953	2019	67	1953-07-10	2019-10-16	66	82	81
061909	Ouvert	1982	2020	39	1982-09-24	2020-06-10	38	77	76
062002	Ouvert	2009	2020	12	2009-04-29	2020-09-17	11	35	35
062102	Ouvert	1957	2020	64	1957-08-13	2020-09-17	63	74	74
062114	Ouvert	2003	2020	18	2003-09-15	2020-09-16	17	27	27
062701	Ouvert	1975	2020	46	1975-05-12	2020-09-22	45	46	46
062803	Ouvert	1997	2020	24	1997-05-20	2020-08-11	23	39	39
064101	Ouvert	2011	2020	10	2011-10-17	2020-06-09	9	26	26
070204	Ouvert	1992	2018	27	1992-11-03	2018-10-02	26	39	39
071203	Ouvert	2009	2019	11	2009-05-05	2019-10-23	10	23	23

Numéro	État	Disponibilité des données		Nombre de d'année disponibles	Jaugeage				
		Début	Fin		Premier	Dernier	Période couverte (année)	Total	Eau libre
071401	Ouvert	1974	2019	46	1974-09-25	2019-10-23	45	68	54
071801	Ouvert	2014	2019	6	2014-06-09	2019-10-23	5	14	14
072301	Ouvert	1962	2019	58	1962-07-17	2019-08-13	57	27	25
073503	Ouvert	1978	2019	42	1978-10-04	2019-08-13	41	29	26
074903	Ouvert	1980	2019	40	1980-06-08	2019-08-18	39	28	27
075705	Ouvert	1983	2019	37	1983-05-25	2019-08-15	36	46	16
076601	Ouvert	1967	2019	53	1967-08-01	2019-08-14	52	41	34
080101	Ouvert	1944	2019	76	1944-05-19	2019-06-18	75	82	71
080106	Ouvert	2010	2019	10	2010-07-12	2019-06-18	9	23	23
080707	Ouvert	1962	2019	58	1962-05-22	2019-07-10	57	43	39
080718	Ouvert	1966	2019	54	1966-05-31	2019-07-09	53	45	27
080809	Ouvert	1972	2019	48	1972-06-16	2019-07-09	47	27	26
081101	Ouvert	1975	2019	45	1975-05-28	2019-08-29	44	36	32
089907	Ouvert	2010	2020	11	2010-07-11	2020-09-24	10	24	24
093801	Ouvert	1961	2019	59	1961-08-31	2019-07-04	58	34	26
095003	Ouvert	1985	2017	33	1985-07-22	2017-09-15	32	37	17
102706	Ouvert	1987	2018	32	1987-09-17	2018-08-15	31	14	14
103605	Ouvert	1965	2018	54	1965-08-26	2018-08-15	53	34	32
103702	Ouvert	1962	2018	57	1962-08-15	2018-08-16	56	26	26
104001	Ouvert	1962	2018	57	1962-07-09	2018-08-14	56	34	34
104803	Ouvert	1975	2018	44	1975-08-06	2018-08-14	43	23	23
120201	Ouvert	1970	2020	51	1970-10-13	2020-10-15	50	191	184

## ANNEXE B. PARAMÈTRES DE LA DISTRIBUTION GEV ET QUANTILES NMAXA AUX STATIONS

Tableau B.1 – Paramètres des distributions GEV et quantiles des niveaux maximums annuels (NMaxA) aux différentes stations avec des séries NMaxA stationnaires pour les périodes de retour 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans.

Station	Nb NMaxA <sup>1</sup>	NMaxA moyen (m)	Écart-type NMaxA (m)	Paramètres GEV			Borne <sup>2</sup> supérieure GEV	NMaxA normalisés selon diverses périodes de retour (ans)					
				Position	Échelle	Forme		2	5	10	25	50	100
010802	16	50.2	0.95	-0.49	0.83	0.011		-0.18	0.77	1.40	2.02	2.82	3.43
010902	10	50.1	0.76	-0.50	0.82	0.035		-0.20	0.76	1.41	2.06	2.92	3.58
011003	10	49.5	1.06	-0.53	0.72	0.137		-0.26	0.67	1.36	2.10	3.18	4.07
011508	12	49.6	0.37	-0.44	0.94	-0.117	7.57	-0.11	0.85	1.41	1.91	2.49	2.89
011707	15	50.5	0.68	-0.42	0.98	-0.176	5.14	-0.07	0.87	1.40	1.85	2.35	2.67
021407	11	28.7	0.34	-0.43	0.96	-0.148	6.05	-0.09	0.86	1.41	1.88	2.42	2.78
021601	12	27.6	0.45	-0.36	0.99	-0.271	3.31	-0.01	0.87	1.31	1.67	2.03	2.25
021702	10	30.4	0.21	-0.50	0.68	0.142		-0.25	0.63	1.30	2.00	3.03	3.89
022003	19	30.3	0.62	-0.49	0.78	0.049		-0.20	0.73	1.37	2.01	2.87	3.54
022301	11	29.4	0.25	-0.43	0.92	-0.119	7.33	-0.10	0.83	1.39	1.87	2.45	2.84
022505	21	29.6	0.19	-0.47	0.84	-0.016	50.52	-0.16	0.77	1.38	1.95	2.69	3.24
022507	14	27.4	0.69	-0.29	1.11	-0.431	2.28	0.08	0.93	1.30	1.57	1.80	1.93
022513	13	30.9	0.32	-0.45	0.92	-0.097	9.00	-0.12	0.83	1.41	1.92	2.54	2.96
023106	18	30.9	0.52	-0.44	0.74	0.024		-0.17	0.68	1.26	1.82	2.57	3.14
023303	17	48.0	0.39	-0.47	0.87	-0.048	17.85	-0.15	0.80	1.40	1.96	2.65	3.15
023401	18	28.4	0.53	-0.44	0.86	-0.065	12.82	-0.13	0.79	1.36	1.88	2.52	2.98
023402	23	24.1	0.51	-0.34	1.05	-0.325	2.88	0.02	0.90	1.33	1.65	1.97	2.16
023422	19	29.2	0.31	-0.47	0.82	0.001		-0.17	0.76	1.37	1.96	2.73	3.30
023427	24	48.2	0.39	-0.39	0.97	-0.206	4.32	-0.05	0.86	1.35	1.76	2.21	2.49
023429	21	32.0	0.46	-0.42	0.90	-0.124	6.80	-0.10	0.81	1.34	1.81	2.36	2.72

Station	Nb NMaxA <sup>1</sup>	NMaxA moyen (m)	Écart-type NMaxA (m)	Paramètres GEV			Borne <sup>2</sup> supérieure GEV	NMaxA normalisés selon diverses périodes de retour (ans)					
				Position	Échelle	Forme		2	5	10	25	50	100
023432	12	49.1	0.53	-0.11	1.13	-0.779	1.35	0.25	0.90	1.10	1.20	1.28	1.31
023702	12	49.2	0.54	-0.42	0.86	-0.106	7.74	-0.11	0.78	1.31	1.78	2.34	2.72
024003	19	31.1	0.58	-0.45	0.89	-0.084	10.14	-0.12	0.81	1.38	1.90	2.52	2.96
024014	18	50.1	1.17	-0.43	0.42	0.311		-0.27	0.38	0.95	1.64	2.80	3.92
024015	11	46.9	0.21	-0.48	0.87	-0.031	27.28	-0.16	0.80	1.42	1.99	2.72	3.26
030101	20	157.3	0.46	-0.50	0.71	0.107		-0.23	0.67	1.32	2.00	2.96	3.75
030103	20	27.7	0.35	-0.44	0.90	-0.096	9.00	-0.12	0.82	1.38	1.89	2.50	2.92
030106	20	127.0	0.60	-0.47	0.83	-0.015	55.39	-0.16	0.77	1.37	1.95	2.68	3.23
030208	20	23.8	0.98	-0.45	0.85	-0.054	15.19	-0.14	0.78	1.35	1.89	2.54	3.01
030215	21	29.4	0.71	-0.47	0.61	0.157		-0.24	0.57	1.19	1.86	2.84	3.68
030220	21	30.2	0.34	-0.48	0.82	0.003		-0.17	0.76	1.38	1.97	2.74	3.32
030225	16	50.0	0.41	-0.47	0.80	0.014		-0.18	0.74	1.36	1.96	2.74	3.33
030234	19	27.5	0.37	-0.45	0.88	-0.068	12.47	-0.13	0.80	1.38	1.92	2.56	3.02
030278	22	44.6	0.26	-0.42	0.86	-0.094	8.73	-0.11	0.78	1.32	1.80	2.38	2.79
030282	21	30.7	0.35	-0.43	0.94	-0.135	6.53	-0.09	0.84	1.39	1.86	2.41	2.78
030284	21	30.5	0.26	-0.47	0.86	-0.035	23.88	-0.15	0.79	1.39	1.95	2.66	3.18
030302	21	33.4	0.23	-0.46	0.87	-0.053	16.01	-0.14	0.79	1.38	1.93	2.60	3.09
030304	22	29.5	0.19	-0.28	1.09	-0.448	2.16	0.09	0.92	1.27	1.52	1.74	1.85
030309	20	31.2	0.26	-0.50	0.69	0.134		-0.24	0.64	1.31	2.02	3.04	3.89
030314	22	31.5	0.26	-0.49	0.74	0.079		-0.22	0.69	1.34	2.00	2.91	3.64
030316	18	29.7	0.39	-0.43	0.93	-0.135	6.50	-0.09	0.84	1.38	1.86	2.40	2.77
030340	13	95.1	0.26	-0.51	0.75	0.089		-0.23	0.70	1.37	2.06	3.01	3.78
030343	21	205.7	0.08	-0.38	1.00	-0.250	3.63	-0.02	0.88	1.35	1.73	2.12	2.36
030345	16	29.4	0.55	-0.18	1.15	-0.639	1.62	0.19	0.93	1.19	1.35	1.47	1.52
030348	19	46.6	0.24	-0.46	0.78	0.012		-0.17	0.72	1.31	1.89	2.65	3.22
030415	21	26.1	0.43	-0.29	1.04	-0.404	2.29	0.06	0.88	1.25	1.51	1.76	1.89

Station	Nb NMaxA <sup>1</sup>	NMaxA moyen (m)	Écart-type NMaxA (m)	Paramètres GEV			Borne <sup>2</sup> supérieure GEV	NMaxA normalisés selon diverses périodes de retour (ans)					
				Position	Échelle	Forme		2	5	10	25	50	100
030421	20	29.3	0.38	-0.46	0.82	-0.020	40.68	-0.16	0.75	1.35	1.90	2.62	3.14
030423	12	48.7	0.35	-0.43	0.96	-0.152	5.88	-0.08	0.86	1.40	1.86	2.39	2.74
030424	17	51.6	0.33	-0.41	0.89	-0.127	6.59	-0.09	0.80	1.33	1.79	2.33	2.69
030425	16	49.1	0.22	-0.45	0.91	-0.086	10.13	-0.13	0.83	1.41	1.93	2.56	3.00
030426	14	47.5	0.29	-0.30	1.09	-0.407	2.37	0.07	0.92	1.30	1.57	1.83	1.96
030429	11	47.0	0.34	-0.38	1.02	-0.254	3.65	-0.02	0.90	1.37	1.75	2.15	2.40
030905	24	32.0	0.72	-0.47	0.66	0.121		-0.22	0.62	1.24	1.89	2.83	3.60
030907	20	31.5	0.30	-0.46	0.78	0.016		-0.18	0.72	1.32	1.91	2.68	3.26
030919	15	30.4	0.13	-0.05	1.13	-0.905	1.20	0.31	0.88	1.04	1.12	1.17	1.18
030920	13	47.2	0.36	-0.41	0.95	-0.176	4.98	-0.07	0.85	1.36	1.79	2.28	2.59
030921	14	47.2	0.32	-0.32	1.08	-0.381	2.53	0.05	0.92	1.32	1.61	1.88	2.03
040110	21	8.8	0.33	-0.31	1.07	-0.381	2.50	0.05	0.91	1.31	1.59	1.86	2.01
040122	21	29.6	0.24	-0.40	0.95	-0.185	4.75	-0.06	0.85	1.35	1.78	2.25	2.55
040132	22	374.5	0.07	-0.21	1.13	-0.578	1.75	0.16	0.92	1.21	1.39	1.54	1.61
040204	19	30.0	0.41	-0.37	0.99	-0.245	3.68	-0.03	0.87	1.34	1.72	2.12	2.36
040406	21	29.2	0.59	-0.46	0.83	-0.022	36.65	-0.16	0.76	1.36	1.92	2.63	3.16
040409	19	31.7	0.22	-0.33	1.05	-0.354	2.65	0.04	0.90	1.31	1.61	1.90	2.07
040624	19	30.3	0.45	-0.44	0.89	-0.086	9.88	-0.12	0.81	1.38	1.89	2.51	2.94
040627	22	48.0	0.15	-0.42	0.92	-0.136	6.35	-0.09	0.83	1.36	1.83	2.37	2.73
040830	19	28.9	0.55	-0.41	0.92	-0.154	5.56	-0.08	0.82	1.34	1.78	2.28	2.62
040840	14	45.0	0.38	-0.24	1.10	-0.514	1.90	0.13	0.91	1.23	1.44	1.62	1.70
040841	13	49.6	0.34	-0.35	1.04	-0.303	3.07	0.01	0.90	1.34	1.68	2.02	2.22
041902	16	29.2	0.39	-0.32	1.03	-0.350	2.63	0.03	0.88	1.29	1.59	1.88	2.04
042610	11	49.6	0.52	-0.34	1.02	-0.305	2.99	0.01	0.88	1.31	1.64	1.98	2.17
043301	20	49.0	0.53	-0.45	0.79	-0.008	95.93	-0.16	0.72	1.30	1.86	2.57	3.10
046709	10	50.6	0.62	-0.56	0.54	0.313		-0.34	0.49	1.22	2.12	3.61	5.05

Station	Nb NMaxA <sup>1</sup>	NMaxA moyen (m)	Écart-type NMaxA (m)	Paramètres GEV			Borne <sup>2</sup> supérieure GEV	NMaxA normalisés selon diverses périodes de retour (ans)					
				Position	Échelle	Forme		2	5	10	25	50	100
048603	11	47.4	0.03	-0.41	1.01	-0.204	4.55	-0.05	0.90	1.41	1.84	2.31	2.61
050119	13	28.4	0.32	-0.43	0.90	-0.110	7.74	-0.11	0.81	1.36	1.85	2.42	2.81
050304	18	28.9	0.32	-0.40	0.98	-0.195	4.61	-0.06	0.87	1.38	1.80	2.26	2.56
050408	19	29.7	0.61	-0.48	0.79	0.025		-0.19	0.73	1.35	1.96	2.76	3.38
050409	17	30.0	0.28	-0.50	0.77	0.073		-0.22	0.72	1.38	2.05	2.97	3.70
050501	11	29.8	0.20	-0.21	1.12	-0.574	1.74	0.16	0.91	1.20	1.38	1.53	1.60
050702	11	50.0	0.38	-0.30	1.12	-0.423	2.34	0.08	0.94	1.32	1.59	1.84	1.97
050801	17	32.2	0.73	-0.43	0.94	-0.139	6.34	-0.09	0.85	1.39	1.86	2.41	2.77
050807	22	47.5	0.22	-0.29	1.09	-0.432	2.24	0.08	0.92	1.28	1.54	1.77	1.89
050812	14	49.1	0.22	-0.39	0.99	-0.224	4.03	-0.04	0.87	1.36	1.76	2.19	2.46
050813	20	48.3	0.15	-0.51	0.67	0.153		-0.25	0.63	1.30	2.03	3.09	3.99
050904	19	28.5	0.20	-0.37	1.04	-0.282	3.31	-0.01	0.90	1.36	1.72	2.09	2.31
050915	11	47.2	0.39	-0.28	1.13	-0.462	2.16	0.10	0.94	1.30	1.54	1.76	1.87
051001	20	29.2	0.28	-0.34	1.01	-0.305	2.96	0.01	0.87	1.30	1.63	1.96	2.15
051002	21	30.0	0.20	-0.40	0.98	-0.197	4.55	-0.06	0.87	1.37	1.79	2.26	2.55
051003	18	29.5	0.25	-0.34	1.06	-0.337	2.79	0.03	0.91	1.33	1.65	1.96	2.13
051004	14	29.9	0.31	-0.51	0.78	0.068		-0.22	0.73	1.39	2.06	2.98	3.71
051007	11	30.2	0.10	-0.52	0.73	0.122		-0.25	0.68	1.37	2.10	3.14	4.00
051502	22	24.9	0.39	-0.35	0.97	-0.277	3.16	-0.01	0.84	1.28	1.62	1.97	2.18
052212	19	30.4	0.35	-0.37	1.00	-0.252	3.58	-0.02	0.87	1.34	1.71	2.11	2.34
052219	20	21.8	0.35	-0.16	1.15	-0.686	1.51	0.21	0.92	1.16	1.30	1.40	1.44
052228	17	28.3	0.24	-0.48	0.82	0.005		-0.18	0.75	1.37	1.97	2.74	3.32
052233	17	30.9	0.24	-0.42	0.96	-0.166	5.34	-0.08	0.85	1.38	1.83	2.33	2.66
052235	14	49.6	0.16	-0.48	0.84	-0.008	102.29	-0.17	0.77	1.39	1.98	2.74	3.31
052606	22	30.5	0.12	-0.29	1.09	-0.437	2.22	0.08	0.92	1.28	1.53	1.76	1.88
052805	15	29.5	0.43	-0.39	1.00	-0.232	3.91	-0.03	0.88	1.36	1.76	2.18	2.43

Station	Nb NMaxA <sup>1</sup>	NMaxA moyen (m)	Écart-type NMaxA (m)	Paramètres GEV			Borne <sup>2</sup> supérieure GEV	NMaxA normalisés selon diverses périodes de retour (ans)					
				Position	Échelle	Forme		2	5	10	25	50	100
054001	12	45.2	0.13	-0.54	0.64	0.209		-0.29	0.60	1.31	2.11	3.33	4.42
061004	22	22.9	0.26	-0.12	1.09	-0.746	1.35	0.23	0.87	1.07	1.19	1.27	1.30
061029	11	46.1	0.55	-0.45	0.84	-0.040	20.45	-0.15	0.77	1.36	1.91	2.59	3.09
061307	14	96.2	0.45	-0.43	0.94	-0.142	6.21	-0.09	0.84	1.39	1.85	2.39	2.75
061602	22	28.6	0.21	-0.11	1.12	-0.766	1.35	0.25	0.88	1.09	1.20	1.27	1.30
061801	10	29.4	0.31	-0.52	0.76	0.099		-0.24	0.70	1.39	2.09	3.08	3.89
061901	11	26.6	0.45	-0.48	0.76	0.048		-0.20	0.71	1.33	1.96	2.79	3.45
071203	10	50.5	0.21	-0.48	0.88	-0.035	24.42	-0.16	0.81	1.43	2.01	2.73	3.26
073503	13	30.0	0.39	-0.37	1.05	-0.282	3.35	-0.01	0.91	1.38	1.74	2.11	2.33
080101	15	19.9	0.31	-0.40	1.00	-0.216	4.23	-0.05	0.88	1.38	1.79	2.24	2.52
080707	12	23.7	0.47	-0.40	1.01	-0.225	4.11	-0.04	0.89	1.39	1.80	2.24	2.51
120201	11	29.9	0.40	-0.51	0.38	0.439		-0.36	0.30	0.95	1.82	3.44	5.17

- 1- Longueur des séries de niveaux maxima annuels (NMaxA) disponibles.
- 2- La distribution GEV est bornée lorsque le paramètre de forme est négatif.



## ANNEXE C. NIVEAUX MINIMUMS ET MAXIMUMS JAUGÉS ET MESURÉS AUX STATIONS

Tableau C.1 – Plus petit niveau jaugé (PPNJ), plus grand niveau jaugé (PGNJ), plus petit niveau mesuré (PPNM) et plus grand niveaux mesurés (PGNM) aux stations. Pour PPNM et PGNM tout l'historique des niveaux enregistrés est considéré alors que tous les jaugeages ont été considérés pour PPNJ et PGNJ. Les divers niveaux sont exprimés sous forme d'écart normalisés par rapport au NMaxA moyen (équation 5.1).

Station	Nombre années NMaxA disponibles	PPNJ	PGNJ	PPNM	PGNM	Probabilité annuelle de non dépassement du PGNJ	Période de retour PGNJ (années)
010802	16	-3.89	-0.20	-2.94	1.84	0.49	2.0
010902	10	-3.08	-0.06	-3.09	1.79	0.56	2.3
011003	10	-2.93	-0.79	-2.92	1.54	0.23	1.3
011508	12	-5.00	1.82	-5.25	1.85	0.94	17.6
011707	15	-4.51	1.22	-4.84	1.59	0.87	7.7
021407	11	-6.60	-0.26	-6.65	1.90	0.43	1.8
021601	12	-6.08	0.75	-6.13	2.10	0.77	4.3
021702	10	-6.54	-0.28	-6.62	2.33	0.48	1.9
022003	19	-7.72	2.87	-8.04	2.03	0.98	50.1
022301	11	-8.85	1.61	-8.71	2.04	0.93	13.5
022505	21	-7.11	2.30	-7.54	2.14	0.97	30.5
022507	14	-5.43	0.78	-5.36	1.35	0.75	4.0
022513	13	-5.51	1.95	-5.40	1.91	0.95	20.7
023106	18	-6.55	-0.22	-6.59	3.06	0.48	1.9
023303	17	-5.58	1.12	-5.56	1.77	0.86	7.2
023401	18	-5.33	1.25	-5.77	2.16	0.89	8.8
023402	23	-6.90	0.88	-6.95	1.85	0.79	4.8
023422	19	-7.86	-0.47	-7.91	2.22	0.37	1.6
023427	24	-5.95	0.91	-6.02	2.09	0.81	5.4
023429	21	-7.20	-0.14	-7.00	2.49	0.48	1.9
023432	12	-41.06	1.06	-5.53	1.20	0.88	8.6
023702	12	-5.80	0.05	-5.82	2.09	0.57	2.3

Station	Nombre années NMaxA disponibles	PPNJ	PGNJ	PPNM	PGNM	Probabilité annuelle de non dépassement du PGNJ	Période de retour PGNJ (années)
024003	19	-6.26	1.82	-6.42	2.19	0.94	17.8
024014	18	-2.87	0.69	-3.39	3.63	0.86	7.4
024015	11	-4.97	0.94	-5.10	1.97	0.83	5.8
030101	20	-5.33	1.19	-5.45	2.17	0.89	8.7
030103	20	-7.04	0.10	-6.91	2.41	0.58	2.4
030106	20	-4.87	-1.39	-4.86	2.37	0.05	1.1
030208	20	-5.39	1.11	-5.73	1.84	0.87	7.4
030215	21	-3.34	-0.07	-3.42	3.32	0.58	2.4
030220	21	-5.27	1.85	-5.40	2.16	0.94	17.4
030225	16	-125.87	1.03	-6.24	2.48	0.86	6.9
030234	19	-6.13	-0.75	-6.49	2.06	0.25	1.3
030278	22	-5.51	-1.24	-5.71	2.87	0.08	1.1
030282	21	-5.97	0.81	-6.00	1.76	0.79	4.8
030284	21	-7.09	0.64	-8.03	1.69	0.77	4.3
030302	21	-5.44	0.60	-5.50	2.25	0.75	4.0
030304	22	-9.21	-0.16	-9.98	1.70	0.41	1.7
030309	20	-119.36	-0.31	-5.05	2.18	0.47	1.9
030314	22	-5.94	0.11	-5.88	2.44	0.63	2.7
030316	18	-7.46	0.70	-8.00	1.95	0.77	4.3
030340	13	-5.20	-1.78	-5.54	1.65	0.00	1.0
030343	21	-21.82	-0.77	-7.76	1.70	0.23	1.3
030345	16	-7.52	0.64	-7.67	1.37	0.68	3.1
030348	19	-5.40	-0.74	-5.86	2.55	0.24	1.3
030415	21	-7.11	-0.82	-7.14	2.20	0.20	1.3
030421	20	-4.99	0.44	-5.08	2.57	0.72	3.6
030423	12	-5.50	-0.92	-5.56	1.61	0.19	1.2
030424	17	-5.37	0.79	-5.45	2.61	0.80	4.9
030425	16	-5.38	-0.13	-5.59	1.84	0.50	2.0
030426	14	-4.71	-0.37	-5.00	1.70	0.34	1.5
030429	11	-4.09	0.17	-4.15	1.42	0.57	2.3
030905	24	-5.01	0.93	-4.88	3.12	0.86	7.1

Station	Nombre années NMaxA disponibles	PPNJ	PGNJ	PPNM	PGNM	Probabilité annuelle de non dépassement du PGNJ	Période de retour PGNJ (années)
030907	20	-4.74	1.49	-4.79	2.37	0.92	12.1
030919	15	-11.77	0.22	-11.86	1.07	0.46	1.9
030920	13	-3.67	-0.37	-3.75	2.18	0.38	1.6
030921	14	-5.76	0.67	-5.90	1.35	0.72	3.6
040110	21	-8.08	1.46	-8.26	1.78	0.93	14.2
040122	21	-7.40	1.47	-7.64	2.08	0.92	12.0
040132	22	-13.58	0.09	-15.20	1.49	0.47	1.9
040204	19	-9.24	1.35	-9.94	1.85	0.90	10.1
040406	21	-4.23	2.60	-4.35	2.62	0.98	48.3
040409	19	-6.81	-0.59	-6.86	1.72	0.28	1.4
040624	19	-5.37	1.52	-5.81	1.91	0.92	12.1
040627	22	-326.21	1.51	-7.24	2.34	0.92	12.3
040830	19	-5.81	0.14	-6.24	2.22	0.59	2.4
040840	14	-5.25	2.05	-5.35	1.44	1.00	> 100
040841	13	-6.23	2.32	-6.35	1.43	0.99	> 100
041902	16	-5.12	0.93	-5.36	1.91	0.81	5.4
042610	11	-4.08	1.74	-5.57	2.06	0.96	25.1
043301	20	-4.48	2.35	-4.72	2.38	0.97	37.8
046709	10	-4.19	2.05	-4.39	2.04	0.95	19.0
048603	11	-6.48	-1.13	-6.30	1.61	0.14	1.2
050119	13	-6.61	4.67	-6.74	2.28	1.00	> 100
050304	18	-7.31	2.05	-7.89	1.59	0.97	32.1
050408	19	-4.81	2.58	-5.74	1.80	0.98	40.5
050409	17	-6.94	1.64	-7.32	1.92	0.92	13.2
050501	11	-7.38	-2.05	-7.37	1.59	0.04	1.0
050702	11	-5.49	0.13	-5.52	1.34	0.52	2.1
050801	17	-4.95	0.96	-5.22	1.89	0.83	5.7
050807	22	-9.43	0.64	-9.45	1.78	0.71	3.4
050812	14	-5.53	1.68	-5.44	1.85	0.94	17.3
050813	20	-2.95	8.86	-3.05	2.69	1.00	> 100
050904	19	-8.95	1.23	-8.87	1.46	0.87	8.0

Station	Nombre années NMaxA disponibles	PPNJ	PGNJ	PPNM	PGNM	Probabilité annuelle de non dépassement du PGNJ	Période de retour PGNJ (années)
050915	11	-4.67	0.77	-4.87	1.27	0.74	3.9
051001	20	-10.39	-0.42	-13.47	1.97	0.34	1.5
051002	21	-4.04	-1.61	-5.19	1.52	0.05	1.1
051003	18	-4.23	-1.16	-5.13	1.45	0.14	1.2
051004	14	-3.36	-0.45	-3.92	2.05	0.39	1.6
051007	11	-9.20	-2.06	-6.64	1.88	0.00	1.0
051502	22	-5.96	1.13	-6.16	2.43	0.87	7.8
052212	19	-7.69	1.32	-8.46	1.57	0.90	9.6
052219	20	-6.73	0.91	-6.80	1.13	0.80	5.0
052228	17	-5.96	0.11	-6.08	2.47	0.61	2.6
052233	17	-8.55	-0.20	-8.38	1.57	0.45	1.8
052235	14	-5.85	1.46	-5.94	1.64	0.91	10.8
052606	22	-9.81	1.45	-10.18	1.56	0.93	15.3
052805	15	-5.03	2.35	-4.92	1.69	0.99	77.9
054001	12	-6.70	-2.22	-6.88	1.83	0.00	1.0
061004	22	-5.50	2.28	-4.81	1.47	1.00	> 100
061029	11	-3.27	2.11	-4.74	2.16	0.96	25.9
061307	14	-5.85	0.60	-5.99	1.97	0.74	3.8
061602	22	-7.58	2.13	-8.09	1.31	1.00	> 100
061801	10	-5.57	2.13	-5.93	2.02	0.95	20.7
061901	11	-5.97	2.52	-6.26	2.32	0.97	37.2
071203	10	-7.27	0.56	-7.44	1.72	0.74	3.9
073503	13	-6.32	-0.35	-7.79	1.76	0.37	1.6
080101	15	-5.43	3.21	-5.62	1.84	1.00	> 100
080707	12	-8.07	2.31	-8.24	1.59	0.98	59.7
120201	11	-2.66	-0.56	-2.74	2.72	0.32	1.5

## ANNEXE D. PARAMÈTRES DES COURBES DE TARAGE

Cette annexe regroupe les paramètres des courbes de tarage (CT) ajustées aux séquences de jaugeages des différentes stations hydrométriques. Le Tableau D.1 concerne les 305 CT représentées par une régression hydraulique (RH) alors que le Tableau D.2 regroupe les 20 CT représentées par deux RH. Les stations sont ordonnées par ordre croissant de numéro de station et les séquences par ordre chronologique croissant de la période couverte. Il est à noter que les paramètres sont ajustés à une RH où les débits sont exprimés en m<sup>3</sup>/sec et les niveaux en mètres

Tableau D.1 – Paramètres des CT aux stations hydrométriques où la CT est représentée par une RH. La catégorie définissant les inégalités entre le PGNJ, le PGNM et le NC1 auquel appartient chaque séquence est indiquée à la colonne 'Comparaison PGNJ, PGNM et NC1' (voir Figure 8.23). Ces catégories sont : A) A. PGNJ < PGNM < NC1; B) PGNJ < NC1 < PGNM; C) PGNM < PGNJ < NC1; D) PGNM < NC1 < PGNJ; E) NC1 < PGNJ < PGNM; F) NC1 < PGNM < PGNJ. A noter qu'une cellule vide signifie que l'on ne disposait pas à ces stations du profil de la section de contrôle permettant d'estimer les NC.

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	a	b	c	Comparaison PGNJ, PGNM et NC1
010802	Bonaventure	1981-1990	29	52.70	47.00	1.98	B
		2002-2011	24	55.19	47.08	1.97	B
		1991-1994	10	43.89	46.92	2.10	B
		1994-2002	24	46.01	47.00	2.16	B
		2012-2017	12	75.82	47.25	1.71	B
		2017-2020	8	0.00	45.20	8.69	B
010902	Petite rivière Cascapédia	1981-2019	96	55.36	47.54	1.91	A
011003	Cascapédia	1984-1994	29	61.18	46.17	1.67	
		1994-2004	19	55.51	46.14	1.74	
011204	Nouvelle	2017-2020	15	12.70	27.79	2.93	B
011508	Décharge du lac Matapédia	1982-1994	32	28.34	47.65	1.43	A
011509	Matapédia	1996-2020	55	85.92	25.88	2.12	A
011707	Madawaska	2003-2020	31	53.55	47.27	1.46	E
020404	York	1981-1992	32	19.54	45.74	2.87	A
021407	Sainte-Anne	1978-1992	27	37.39	26.29	2.18	E

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	a	b	c	Comparaison PGNJ. PGNM et NC1
021407	Sainte-Anne	2000-2016	46	41.40	26.26	2.20	B
		2016-2020	16	96.54	26.78	1.31	B
		1992-1995	14	36.63	26.24	2.47	B
		1995-2000	17	41.60	26.30	2.18	B
021601	Matane	1979-2004	44	54.28	24.53	1.93	B
		2004-2007	12	77.65	24.74	1.63	B
		2008-2012	10	49.23	24.50	2.21	B
		2013-2020	15	68.40	24.63	1.69	B
021702	Blanche	1998-2006	19	28.52	28.93	1.66	A
		2007-2020	19	31.84	28.91	1.81	A
021916	Petite rivière Neigette	1997-2020	58	9.22	47.62	2.16	E
022003	Rimouski	1997-2018	23	12.21	25.21	1.88	
022505	Fourchue	1978-2020	46	20.71	28.15	2.08	C
022513	Du Loup	1961-1976	47	38.79	28.94	1.98	A
		1977-2018	55	44.23	29.03	1.87	A
022601	Kamouraska	2016-2020	10	8.31	46.82	2.14	A
		2008-2012	13	7.77	46.84	2.07	A
		2013-2015	7	8.20	46.81	2.18	A
022704	Ouelle	1999-2020	39	4.67	47.70	3.35	
023002	Boyer Sud	1995-2001	34	10.79	47.77	2.18	B
		2001-2007	31	11.29	47.75	2.38	B
		2007-2014	16	12.27	47.75	2.27	B
		2014-2019	23	10.45	47.75	1.99	B
023004	Boyer	1996-2017	58	28.63	47.03	2.01	
023106	Du Sud	1966-2019	104	2.36	27.05	3.72	
023303	Etchemin	1980-2020	63	63.71	45.74	2.10	A
023402	Chaudière	1968-1983	29	166.18	20.44	1.72	E
		2012-2019	17	216.26	20.50	1.51	E
023422	Famine	1964-2017	133	33.67	26.69	2.26	E
023427	Chaudière	2001-2019	19	33.50	46.05	1.75	E

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	a	b	c	Comparaison PGNJ. PGNM et NC1
023429	Chaudière	1980-2011	50	32.83	28.53	3.01	A
023432	Bras d'Henri	1988-2020	76	11.68	46.06	1.96	
023445		2006-2013	29	11.79	47.32	1.93	
023448	Chaudière	2012-2020	23	86.60	43.37	2.17	E
023702	Petite rivière du Chêne	2006-2020	41	11.81	45.97	1.96	
024003	Bécancour	1967-2020	97	14.60	27.14	2.08	
024014		2000-2018	26	64.79	46.56	1.89	B
024015	Bourbon	2006-2020	38	26.47	45.77	2.41	
024016	Osgood	2016-2020	31	44.87	48.61	2.95	
030101	Nicolet Sud-Ouest	1970-2020	82	14.98	154.58	2.36	E
030103	Nicolet	1967-1981	40	43.15	24.93	2.44	A
		1982-1986	7	40.60	24.95	2.57	A
		1987-1999	21	55.21	25.05	2.26	A
		2000-2020	25	53.40	25.06	2.28	A
030106	Bulstrode	1982-2004	38	38.88	124.07	1.92	B
		2004-2020	25	37.65	124.12	1.75	B
030208	Saint-François	1990-2018	37	87.31	18.23	1.50	E
030215	Coaticook	1961-1992	40	26.05	27.03	1.97	B
		1994-2000	14	25.54	27.01	1.93	B
		2001-2006	7	26.08	26.99	2.07	B
		2007-2019	18	25.32	26.98	2.04	E
030220	Massawippi	1956-1995	44	19.85	28.36	1.95	B
		2000-2020	29	20.04	28.38	2.03	B
030225	Saint-François	1972-1979	18	12.18	47.14	2.47	E
030225	Saint-François	1980-2019	46	10.29	47.12	2.52	E
030234	Eaton	1969-1993	31	17.44	24.93	3.07	A
		1994-1997	13	19.00	24.94	3.02	A
		1998-2010	12	17.62	24.92	3.01	A
		2011-2017	11	17.81	24.91	2.96	A
030278	Saint-François	1978-1990	19	69.86	42.93	2.77	E

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	a	b	c	Comparaison PGNJ. PGNM et NC1
030278	Saint-François	1990-2004	12	96.54	43.12	1.94	E
		2005-2019	22	83.83	43.09	2.04	E
030282	Au Saumon	1975-1990	41	52.77	28.51	2.28	
		1998-2018	24	49.03	28.47	2.26	
		1991-1996	14	50.75	28.45	2.59	
		1996-1998	6	55.75	28.48	2.65	
030284	Saint-François	1979-2018	48	54.51	28.21	2.45	
030299	St-Germain	2014-2015	13	12.48	47.49	2.13	A
		2016-2019	18	10.92	47.51	2.26	A
030302	Yamaska	1966-1980	37	142.52	32.08	1.68	E
		1980-2007	30	150.15	32.05	1.80	E
		2008-2019	18	146.13	32.04	1.82	E
030304	Noire	2011-2018	21	14.21	27.26	4.59	E
030309	Yamaska Nord	1994-2020	42	9.25	29.80	2.83	A
		1985-1994	13	10.60	29.82	2.90	A
		1977-1978	11	12.19	29.97	2.11	A
		1979-1985	14	13.03	29.96	2.18	A
030314	Yamaska Sud-Est	1997-2006	12	7.83	29.54	3.74	
		2006-2011	12	18.63	29.78	3.06	
		2012-2019	19	26.13	29.87	2.72	
030316	David	1969-2019	127	11.27	26.75	2.14	E
030340	Yamaska Nord	1983-1989	14	15.25	93.40	2.30	E
		1990-2002	31	13.43	93.33	2.63	B
030340	Yamaska Nord	2003-2006	12	2.45	92.85	5.04	B
		2007-2009	10	16.87	93.41	2.28	B
		2009-2012	10	19.00	93.46	2.12	E
030340	Yamaska Nord	2012-2019	11	18.52	93.40	2.36	E
030343		1990-2005	46	22.19	204.96	2.94	A
		2006-2018	49	17.98	204.98	2.46	A
030345	Yamaska	1994-2018	67	52.32	25.00	1.76	E

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	a	b	c	Comparaison PGNJ. PGNM et NC1
030348	Runnels	2000-2020	66	17.02	45.31	2.52	A
030351	Yamaska	2005-2013	27	31.86	48.57	1.67	
		2014-2015	10	17.30	48.83	1.84	E
		2015-2020	19	17.99	48.84	1.75	E
030415	Des Hurons	1980-1988	20	14.57	23.03	1.83	A
		2011-2019	16	15.16	22.98	1.92	A
		1974-1975	17	15.71	23.06	1.82	A
		1975-1980	14	13.86	22.95	2.23	A
		1998-2011	27	17.56	23.00	1.91	A
		1989-1994	11	15.69	23.01	1.90	A
		1995-1998	13	16.78	23.04	1.64	A
030421	L'Acadie	2006-2020	32	21.52	27.32	2.23	E
030423	Morpions	2005-2020	46	9.17	46.79	2.00	E
030424	Aux Brochets	2002-2004	9	48.35	49.86	1.80	E
030426	Ewing	2002-2016	34	5.22	46.11	2.31	E
		2017-2020	8	6.39	46.13	2.55	B
030429	À l'Ours	2006-2020	34	10.06	45.58	2.50	A
030905	Châteauguay	1970-1982	46	25.86	28.19	2.14	E
		2003-2019	21	36.57	28.25	1.89	B
		1983-1994	10	1.85	27.23	4.03	B
		1995-1999	11	44.92	28.39	1.64	B
		2000-2003	7	38.41	28.27	1.82	E
030907	Des Anglais	2009-2020	17	65.31	30.06	2.50	B
		1999-2008	15	60.25	29.91	3.84	B
		1996-1999	9	68.97	30.04	2.79	B
030907	Des Anglais	1990-1995	9	72.10	30.02	2.95	B
030919	Châteauguay	2004-2020	33	66.39	28.78	1.64	E
030920	Noire	2005-2011	18	6.59	45.81	2.22	B
		2011-2020	25	7.67	45.87	2.07	B
030921	Des Anglais	2005-2020	34	9.49	45.17	2.38	A

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	a	b	c	Comparaison PGNJ. PGNM et NC1
040110	Du Nord	1979-2020	44	13.98	5.61	2.29	E
		1960-1975	15	8.33	5.34	2.62	B
		1976-1978	9	7.57	5.38	2.78	E
040122		1970-2018	88	7.55	27.45	2.59	E
040129	Doncaster	1974-1983	23	7.11	28.69	2.51	
		1984-1993	18	3.71	28.48	3.30	
		2011-2019	17	9.53	28.90	1.87	
		1993-2004	15	5.37	28.62	2.77	
		2005-2011	8	10.41	28.88	2.06	
040132	Décharge du lac Ludger	1983-2019	65	3.38	373.31	3.11	E
040204	Rouge	1977-2020	67	0.01	22.22	5.49	
		1972-1976	12	0.01	21.98	5.41	
		1962-1965	12	68.76	26.57	1.38	
		1966-1971	15	0.02	22.31	5.04	
040212	Saint-Louis	1968-1994	69	12.59	29.33	2.23	
		1994-2019	33	11.57	29.26	2.53	
040406	De la Petite Nation	1972-1999	41	15.37	26.42	1.79	
		2000-2020	26	15.58	26.44	1.76	
040409	Suffolk	1976-1995	42	10.08	30.16	2.30	
		1995-2019	51	8.61	30.15	2.18	
040619	Mitchinamecus	1977-2019	45	19.54	25.12	1.91	
040624	Du Lièvre	1979-2020	49	50.14	27.17	1.65	
040627	Kiamika	1990-2018	28	38.28	47.11	1.79	
040830	Gatineau	1974-2019	57	71.94	25.30	1.95	
040840	Picanoc	2004-2020	29	19.06	42.61	1.96	
040841	Désert	2005-2019	36	16.27	47.06	2.16	E
041902	Dumoine	1965-1991	35	33.64	26.74	2.05	
		1992-2007	7	8.56	26.18	3.01	
		2010-2019	14	23.46	26.59	2.21	
042610	Kipawa	2008-2019	13	35.85	46.82	1.99	

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	a	b	c	Comparaison PGNJ. PGNM et NC1
043003	Des Outaouais	1977-2018	41	66.45	26.87	1.91	
043030	Capitachouane	2005-2020	19	24.40	48.07	2.10	
043301	Des Prairies	1968-2020	40	597.85	45.79	1.16	E
046709	du Chêne	2017-2020	15	9.70	47.87	1.95	
048603	Gordon	2008-2019	9	0.88	45.86	6.46	
050119	Matawin	1977-1989	38	38.18	26.10	1.70	
		1990-1999	16	41.71	26.14	1.58	
		2000-2018	25	38.56	26.13	1.59	
050135	Croche	1972-1978	16	25.22	25.17	2.00	
		1994-2017	42	18.31	24.92	2.19	
		1965-1966	9	14.75	24.96	2.34	
		1967-1972	10	15.21	24.94	2.36	
		1978-1986	14	2.17	24.21	3.58	
		1986-1993	18	2.31	24.23	3.61	
050144	Vermillon	1983-2020	53	54.38	47.06	2.01	
050304	Batiscan	1967-1992	40	64.04	25.98	1.99	A
		1992-2020	30	68.85	26.03	1.93	A
050408	Sainte-Anne	1965-2001	53	77.80	26.55	1.64	C
		2005-2020	19	69.09	26.52	1.70	A
050409	Bras du Nord	1994-2020	37	36.01	27.72	1.94	
		1965-1979	33	43.77	27.83	1.76	
		1980-1994	17	34.40	27.69	1.98	
050501	La Chevrotière	2015-2020	19	3.51	28.30	1.61	E
050702	Portneuf	2002-2007	14	23.80	47.73	1.82	E
		2008-2018	19	26.27	47.75	1.74	E
050807	Ontaritzi	2002-2019	15	10.31	45.31	2.01	B
050812	Aux Pommès	1987-1998	34	14.56	47.71	1.98	A
		1998-2007	29	12.50	47.72	2.11	A
		2007-2019	35	14.20	47.77	2.09	A
050813	Décharge du lac Clair	1995-2014	17	1.95	47.85	1.73	

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	a	b	c	Comparaison PGNJ. PGNM et NC1
050813	Décharge du lac Clair	2015-2019	14	1.75	47.84	1.64	
050904	Saint-Charles	1968-1978	29	21.19	26.77	2.07	A
		1995-2009	22	14.43	26.59	2.45	A
		2010-2020	25	17.36	26.62	2.33	A
		1978-1992	24	12.94	26.55	2.86	A
		1992-1995	8	13.53	26.56	2.63	A
050915	Nelson	2006-2013	41	6.17	45.35	1.36	E
		2014-2016	13	6.37	45.38	1.25	E
		2016-2017	9	5.41	45.36	1.20	E
		2017-2020	15	5.10	45.40	1.18	E
050916	Des Hurons	2007-2011	20	14.40	48.72	2.05	B
		2011-2014	11	13.67	48.66	2.02	E
		2014-2017	13	13.10	48.56	2.62	B
		2017-2019	12	10.77	48.57	2.24	B
051001	Montmorency	1966-1998	44	20.48	25.72	2.36	E
		1998-2020	19	3.17	25.11	3.48	B
051002	Des Eaux Volées	1966-2018	33	1.47	28.87	2.59	E
051003		1968-2019	24	2.79	28.22	2.34	A
051004	Des Aulnaies	1968-2018	27	0.79	28.64	2.64	
051005	Montmorency	1997-2017	34	28.06	25.71	1.84	A
051007	Des Aulnaies	1998-2018	25	1.80	29.42	2.66	
051502	Malbaie	1996-2019	36	27.82	22.03	2.44	A
052212	Ouareau	1978-1995	31	22.58	27.41	2.24	
		1965-1968	17	27.53	27.52	1.97	
		1969-1978	20	19.24	27.33	2.31	
052219	L'Assomption	1962-2018	81	30.00	19.23	2.08	A
052233	De l'Achigan	1979-1991	30	31.94	28.71	2.07	
		1991-2017	52	29.06	28.70	2.27	
052235	Saint-Pierre	2012-2019	19	7.73	48.61	2.62	
		2000-2002	16	7.25	48.62	2.32	

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	a	b	c	Comparaison PGNJ. PGNM et NC1
052235	Saint-Pierre	2002-2012	32	6.81	48.62	2.31	
052401	Bayonne	2015-2018	8	50.95	28.43	1.76	B
052601	Maskinongé	1935-1983	46	17.50	26.56	1.97	E
		2010-2020	21	19.64	26.66	1.88	B
		1983-1995	15	19.64	26.63	1.77	E
		1995-2010	9	17.80	26.60	1.96	E
052606	Mastigouche	1995-2019	56	23.38	29.26	2.60	A
052810	Du Loup	2013-2015	12	0.04	42.13	4.99	
054001	Beauport	2010-2020	41	14.41	44.09	2.61	A
		2006-2008	14	21.34	44.18	2.03	A
		2009-2010	12	12.49	44.08	2.47	A
060102	Petit Saguenay	1999-2017	38	27.42	27.92	2.37	B
060704	À Mars	2009-2020	29	18.47	44.57	2.15	E
060901	Du Moulin	2008-2013	15	89.91	49.09	1.84	E
		2014-2018	11	88.09	49.10	1.75	E
061020	Aux Écorces	1970-1997	42	74.40	27.50	1.67	A
061022	Pikauba	1970-1978	23	38.31	28.88	1.53	C
061022	Pikauba	1978-1991	27	48.39	28.97	1.28	A
		2009-2019	13	54.98	28.89	1.51	A
		1992-1997	9	39.45	28.80	1.80	A
		1998-2009	13	50.94	28.86	1.61	A
061024	Cyriac	1996-2020	42	30.69	96.70	1.64	
061028	Pikauba	2000-2016	11	40.60	171.32	2.11	
061307	La Belle Rivière	2013-2019	23	5.63	93.25	1.94	
		1996-2007	22	6.78	93.36	1.77	
		2008-2013	18	3.96	93.10	2.18	
061502	Métabetchouane	1977-2020	51	84.74	26.99	1.98	A
061602	Ouiatchouan	1984-2020	51	5.72	26.56	2.87	E
061801	Petite rivière Péribonka	1975-1989	30	24.64	27.28	2.02	
		2009-2020	13	22.85	27.20	2.07	

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	a	b	c	Comparaison PGNJ. PGNM et NC1
061801	Petite rivière Péribonka	1990-1996	9	22.58	27.22	2.07	
		1996-2008	13	22.71	27.20	2.08	
061901	Ashuapmushuan	1953-2019	81	10.29	21.91	3.11	
061909	Aux Saumons	1982-1991	23	49.71	29.79	1.84	
		2013-2020	11	52.74	29.74	1.77	
		1992-1995	10	35.43	29.58	2.93	
		1995-2006	14	47.46	29.70	2.08	
		2006-2008	10	44.32	29.69	1.99	
		2008-2013	8	47.20	29.69	1.88	
062002	Rouge	2009-2015	21	8.56	48.28	1.82	
		2015-2020	14	8.33	48.29	1.73	
062102	Mistassini	1957-2020	74	35.57	25.36	2.70	
062114	Mistassibi	2003-2020	27	60.48	43.93	2.35	
062701	Valin	1975-2020	46	41.97	28.55	1.61	
062803	Sainte-Marguerite Nord-Est	1997-2020	39	62.17	25.57	1.95	
064101	Aux Iroquois	2011-2020	26	8.86	46.51	2.45	
070204	Des Escoumins	1992-2018	39	46.20	29.12	2.00	
071203	Aux Anglais	2009-2019	23	27.62	48.76	1.58	
071401	Godbout	1974-1978	12	25.97	28.72	2.10	
		1978-2019	42	30.17	28.90	2.06	
071801	Riverin	2014-2019	14	30.20	49.56	2.40	
072301	Moisie	1962-2019	26	74.53	24.25	1.45	
073503	Magpie	1978-2019	26	30.14	26.05	2.45	
074903	Natashquan	1980-2019	27	8.40	22.95	2.80	
075705	Du Petit Mécatina	1983-2009	29	3.43	89.51	3.01	
		2009-2019	12	21.89	90.85	2.21	
076601	Saint-Paul	1967-1973	10	6.35	24.23	3.12	
		1973-2019	24	34.79	25.16	2.30	
080106	Bourlamaque	2010-2019	23	7.43	48.94	3.40	
080707	Bell	1962-2019	39	2.60	17.32	3.37	

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	a	b	c	Comparaison PGNJ. PGNM et NC1
080718	Waswanipi	1966-2019	27	129.76	24.08	1.58	
080809	Broadback	1972-2019	27	43.93	26.83	2.45	
081101	Pontax	1975-1989	16	70.99	25.43	1.74	
		1990-1995	6	34.00	25.07	2.34	
		2001-2019	14	62.87	25.42	1.90	
093801	Grande rivière de la Baleine	1961-2019	26	0.07	22.93	4.81	
095003	Lac des Loups Marins	1994-2017	7	0.14	23.98	4.52	
102706	Aux Feuilles	1987-2018	14	280.65	45.29	1.61	
103605	Aux Mélèzes	1965-1966	11	14.17	25.92	3.09	
		1966-1990	8	34.60	26.44	2.74	
		1991-2010	8	51.37	26.49	2.44	
		2011-2018	7	62.42	26.61	2.41	
103702	Caniapiscau	1962-1966	14	60.68	25.52	2.41	
103702	Caniapiscau	1966-2018	12	149.76	26.30	2.05	
104001	À la Baleine	1962-2018	34	102.60	25.31	1.95	
104803	George	1975-2018	23	401.66	25.97	1.61	
120201	Dauphine	1970-1976	38	22.98	28.87	1.92	B
		1976-1983	27	37.31	28.80	2.76	B
		1985-1995	28	19.99	28.82	2.15	B
		2008-2020	53	17.92	28.80	2.24	B

Tableau D.2 – Paramètres des CT aux stations hydrométriques où la CT est représentée par deux RH. Le niveau de transition (NT) correspond au niveau de raccordement des deux RH. RH1 réfère à la RH s’appliquant aux niveaux inférieurs au NT alors que RH2 réfère à la RH valable pour les niveaux supérieurs au NT. La catégorie définissant les inégalités entre le PGNJ, le PGNM et le NC1 auquel appartient chaque séquence est indiquée à la colonne ‘Comparaison PGNJ, PGNM et NC1’ (voir Figure 8.23). Ces catégories sont : A) A. PGNJ < PGNM < NC1; B) PGNJ < NC1 < PGNM; C) PGNM < PGNJ < NC1; D) PGNM < NC1 < PGNJ; E) NC1 < PGNJ < PGNM; F) NC1 < PGNM < PGNJ. A noter qu’une cellule vide signifie que l’on ne disposait pas à ces stations du profil de la section de contrôle permettant d’estimer les NC.

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Niveau de transition (m)	RH1			RH2			Comparaison PGNJ, PGNM et NC1		
				Nombre de jaugeages	a	b	c	Nombre de jaugeages	a		b	c
011508	Décharge du lac Matapédia	1995-2019	48.04	29	37.93	47.51	2.53	26	31.21	47.74	1.17	A
020404	York	1993-2020	46.89	51	31.29	45.97	2.19	22	35.52	46.01	2.25	A
020602	Dartmouth	1970-1992	29.72	28	6.31	28.29	5.21	10	26.82	28.54	2.46	
020602	Dartmouth	1993-2020	29.76	53	9.62	28.39	4.82	9	23.71	28.50	2.65	
022301	Des Trois-Pistoles	1939-2020	27.68	37	31.28	27.01	2.90	35	46.42	27.24	1.93	
022507	Du Loup	1986-2020	24.32	68	20.34	23.43	2.71	22	0.49	21.06	2.89	
023401	Beaurivage	1929-2020	26.35	33	24.31	25.36	2.57	26	34.63	25.54	1.78	
023402	Chaudière	1984-2012	21.23	27	205.84	20.41	2.08	9	154.82	20.30	1.69	E
030424	Aux Brochets	2004-2020	50.50	24	50.68	49.78	2.28	6	40.90	49.76	1.77	E
030907	Des Anglais	1974-1989	30.70	29	77.08	29.93	3.84	7	25.52	29.66	2.41	B
040238	Du Diable	2010-2018	37.41	16	5.49	35.78	4.04	8	14.45	35.69	1.84	E
043012	Kinojévis	1965-2020	28.72	49	5.70	25.85	2.42	23	25.60	26.94	1.82	A
046709	du Chêne	2010-2017	48.73	20	9.77	47.75	2.61	6	7.03	47.56	1.84	
050801	Jacques-Cartier	1925-2018	30.91	54	5.87	27.11	2.85	8	0.22	24.11	3.69	E
052212	Ouareau	1996-2020	28.98	19	18.67	27.33	2.47	8	16.45	27.17	2.29	

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Niveau de transition (m)	RH1			RH2			Comparaison PGNJ, PGNM et NC1		
				Nombre de jaugeages	a	b	c	Nombre de jaugeages	a		b	c
052228	Noire	1974-2019	27.66	83	22.06	26.84	2.03	13	17.79	26.76	1.65	
052805	Du Loup	1966-2019	28.06	39	7.58	26.88	3.09	42	36.24	27.59	1.39	
061020	Aux Écorces	1998-2019	28.02	10	49.58	27.26	2.28	13	84.70	27.55	1.56	A
080101	Harricana	1944-2019	18.90	23	62.06	17.94	1.40	48	106.6	18.32	1.11	F
089907	Bellefeuille	2010-2020	43.89	16	14.32	43.25	2.22	8	9.95	43.27	1.33	A



## ANNEXE E. DISTRIBUTION LOGISTIQUE

Un examen plus attentif des séquences où l'hypothèse de normalité est rejetée montre que la kurtosis de la distribution normale est souvent trop petite pour représenter adéquatement les résidus relatifs (RR) de ces séquences ou, dit autrement, les queues des distributions des RR sont trop lourdes pour être représentées par la distribution normale. Une distribution logistique de moyenne nulle a donc été également considérée.

La densité de probabilité de la distribution logistique  $f_L(x; \mu, \sigma)$  s'écrit :

$$f_L(x; \mu, \sigma) = \frac{\exp\left[-\frac{(x - \mu)}{\sigma}\right]}{\sigma \left[1 + \exp\left[-\frac{(x - \mu)}{\sigma}\right]\right]^2}$$

où  $\mu$  est le paramètre de position et  $\sigma$  le paramètre d'échelle. Dans le cas où  $\mu = 0$ , on a :

$$f_L(x; \sigma) = \frac{\exp\left(-\frac{x}{\sigma}\right)}{\sigma \left[1 + \exp\left(-\frac{x}{\sigma}\right)\right]^2} \quad \text{E. 1}$$

L'écart-type de cette distribution est donné par :

$$\text{ET} = \frac{\sigma \pi}{\sqrt{3}} \quad \text{E. 2}$$



## ANNEXE F. MODÈLES D'INCERTITUDES SÉLECTIONNÉS ET VALEURS DES PARAMÈTRES

Cette annexe présente la liste des modèles d'incertitudes retenus pour chaque CT et les paramètres décrivant ces modèles d'incertitudes. Ces résultats sont regroupés selon le modèle d'incertitudes sélectionné. Ainsi le Tableau F.1 regroupe les CT où le modèle M1 a été retenue (modèles N-M1 et L-M1), le Tableau F.2 les CT où le modèle M2 a été retenue (modèles N-M2d, N-M2a, L-M2d, L-M2a) et le Tableau F.3 le modèle M3 (N-M3 et L-M3). Les stations sont ordonnées par ordre croissant de numéro de station et les séquences par ordre chronologique croissant de la période couverte. Il est à noter que les paramètres sont ajustés à une RH où les débits sont exprimés en m<sup>3</sup>/sec et les niveaux en m. Le lecteur est invité à consulter la Section 8.3.3 et les équations 8.3a, 8.3b, 8.3c et 8.3d pour la signification des différents paramètres des modèles d'incertitudes.

Tableau F.1 – Paramètres des modèles d'incertitudes des courbes de tarage (CT) où le modèle M1 a été sélectionné.

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	Modèle sélectionné	Paramètre $\sigma_1$
010802	Bonaventure	1981-1990	29	L-M1	0.029
		1991-1994	10	L-M1	0.009
011003	Cascapédia	1994-2004	19	L-M1	0.017
011508	Décharge du lac Matapédia	1995-2019	55	L-M1	0.025
		1982-1994	32	N-M1	0.069
020404	York	1981-1992	32	L-M1	0.097
		1993-2020	73	L-M1	0.038
020602	Dartmouth	1993-2020	62	L-M1	0.028
		1970-1992	38	N-M1	0.041
021407	Sainte-Anne	1992-1995	14	L-M1	0.014
		1995-2000	17	N-M1	0.059
021601	Matane	1979-2004	44	L-M1	0.033
		2004-2007	12	L-M1	0.024
		2008-2012	10	N-M1	0.053

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	Modèle sélectionné	Paramètre $\sigma_1$
021601	Matane	2013-2020	15	N-M1	0.068
021702	Blanche	1979-1998	40	L-M1	0.039
		1998-2006	19	N-M1	0.067
021916	Petite rivière Neigette	1997-2020	58	L-M1	0.054
022003	Rimouski	1997-2018	23	L-M1	0.030
022505	Fourchue	1978-2020	46	N-M1	0.056
022601	Kamouraska	2008-2012	13	L-M1	0.042
		2016-2020	10	N-M1	0.085
022704	Ouelle	1999-2020	39	L-M1	0.068
023002	Boyer Sud	1995-2001	34	L-M1	0.040
		2001-2007	31	L-M1	0.068
		2007-2014	16	L-M1	0.043
023303	Etchemin	1980-2020	63	L-M1	0.043
023402	Chaudière	1984-2012	36	L-M1	0.028
		2012-2019	17	L-M1	0.031
		1968-1983	29	N-M1	0.100
		1980-2011	50	N-M1	0.088
		2012-2020	23	L-M1	0.033
023429					
023448					
023702	Petite rivière du Chêne	2006-2020	41	L-M1	0.028
024003	Bécancour	1967-2020	97	L-M1	0.036
024014		2000-2018	26	L-M1	0.031
024015	Bourbon	2006-2020	38	L-M1	0.057
024016	Osgood	2016-2020	31	N-M1	0.086
030101	Nicolet Sud-Ouest	1970-2020	82	L-M1	0.025
030103	Nicolet	1967-1981	40	L-M1	0.044
030215	Coaticook	1994-2000	14	L-M1	0.040

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	Modèle sélectionné	Paramètre $\sigma_1$
030215	Coaticook	1961-1992	40	N-M1	0.049
		2007-2019	18	N-M1	0.037
030220	Massawippi	1956-1995	44	N-M1	0.040
030225	Saint-François	1972-1979	18	L-M1	0.031
030234	Eaton	1969-1993	31	L-M1	0.047
		1994-1997	13	L-M1	0.035
		2011-2017	11	N-M1	0.041
030278	Saint-François	1990-2004	12	L-M1	0.029
		1978-1990	19	N-M1	0.067
		2005-2019	22	N-M1	0.033
030282	Au Saumon	1975-1990	41	L-M1	0.052
		1998-2018	24	L-M1	0.043
030299	St-Germain	2014-2015	13	L-M1	0.057
		2016-2019	18	N-M1	0.135
030302	Yamaska	2008-2019	18	L-M1	0.022
030304	Noire	2011-2018	21	L-M1	0.139
030309	Yamaska Nord	1994-2020	42	L-M1	0.040
		1985-1994	13	L-M1	0.029
030314	Yamaska Sud-Est	2012-2019	19	L-M1	0.054
		1997-2006	12	N-M1	0.043
		2006-2011	12	N-M1	0.019
030340	Yamaska Nord	1983-1989	14	L-M1	0.019
		1990-2002	31	L-M1	0.049
		2003-2006	12	L-M1	0.017
		2007-2009	10	L-M1	0.015
		2012-2019	11	L-M1	0.028

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	Modèle sélectionné	Paramètre $\sigma_1$
030340	Yamaska Nord	2009-2012	10	N-M1	0.015
030353	Yamaska	2014-2015	10	L-M1	0.017
		2015-2020	19	L-M1	0.051
030415	Des Hurons	1974-1975	17	L-M1	0.050
		1975-1980	14	L-M1	0.046
		1995-1998	13	L-M1	0.042
030424	Aux Brochets	2004-2020	30	N-M1	0.056
030905	Châteauguay	2003-2019	21	L-M1	0.021
		1983-1994	10	L-M1	0.016
		1995-1999	11	L-M1	0.056
		1970-1982	46	N-M1	0.106
030907	Des Anglais	1999-2008	15	L-M1	0.034
030919	Châteauguay	2004-2020	33	L-M1	0.021
030920	Noire	2005-2011	18	L-M1	0.041
030921	Des Anglais	2005-2020	34	L-M1	0.045
040110	Du Nord	1960-1975	15	L-M1	0.016
040122		1970-2018	88	L-M1	0.031
040129	Doncaster	1984-1993	18	L-M1	0.033
		1993-2004	15	N-M1	0.020
040204	Rouge	1977-2020	67	L-M1	0.031
		1972-1976	12	L-M1	0.009
		1962-1965	12	N-M1	0.083
		1966-1971	15	N-M1	0.032
040238	Du Diable	2010-2018	24	N-M1	0.044
040406	De la Petite Nation	2000-2020	26	L-M1	0.026
040619	Mitchinamecus	1977-2019	45	L-M1	0.039

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	Modèle sélectionné	Paramètre $\sigma_1$
040624	Du Lièvre	1979-2020	49	N-M1	0.031
040627	Kiamika	1990-2018	28	L-M1	0.027
040840	Picanoc	2004-2020	29	N-M1	0.031
040841	Désert	2005-2019	36	N-M1	0.060
041902	Dumoine	1965-1991	35	L-M1	0.013
		2010-2019	14	L-M1	0.013
042610	Kipawa	2008-2019	13	N-M1	0.031
043003	Des Outaouais	1977-2018	41	L-M1	0.017
043030	Capitachouane	2005-2020	19	N-M1	0.041
043301	Des Prairies	1968-2020	40	L-M1	0.014
046709	du Chêne	2010-2017	26	L-M1	0.041
		2017-2020	15	L-M1	0.112
050119	Matawin	1990-1999	16	L-M1	0.017
		1977-1989	38	N-M1	0.059
050135	Croche	1978-1986	14	L-M1	0.028
		1986-1993	18	L-M1	0.040
		1994-2017	42	N-M1	0.067
		1967-1972	10	N-M1	0.066
050304	Batiscan	1967-1992	40	N-M1	0.028
050408	Sainte-Anne	2005-2020	19	N-M1	0.051
050409	Bras du Nord	1980-1994	17	N-M1	0.021
050501	La Chevrotière	2015-2020	19	N-M1	0.121
050702	Portneuf	2002-2007	14	L-M1	0.028
050807	Ontaritzi	2002-2019	15	L-M1	0.026
050812	Aux Pommes	1987-1998	34	L-M1	0.039
		1998-2007	29	L-M1	0.060

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	Modèle sélectionné	Paramètre $\sigma_1$
050812	Aux Pommes	2007-2019	35	N-M1	0.063
050813	Décharge du lac Clair	2015-2019	14	L-M1	0.030
050904	Saint-Charles	2010-2020	25	L-M1	0.049
		1995-2009	22	N-M1	0.056
050915	Nelson	2014-2016	13	L-M1	0.024
050916	Des Hurons	2011-2014	11	L-M1	0.087
		2017-2019	12	L-M1	0.062
		2007-2011	20	N-M1	0.063
		2014-2017	13	N-M1	0.063
051001	Montmorency	1966-1998	44	L-M1	0.031
051002	Des Eaux Volées	1966-2018	33	L-M1	0.044
051003		1968-2019	24	L-M1	0.018
051004	Des Aulnaies	1968-2018	27	N-M1	0.111
051005	Montmorency	1997-2017	34	L-M1	0.032
051007	Des Aulnaies	1998-2018	25	N-M1	0.089
052212	Ouareau	1996-2020	27	L-M1	0.016
		1965-1968	17	L-M1	0.022
		1969-1978	20	L-M1	0.033
052233	De l'Achigan	1979-1991	30	L-M1	0.054
052235	Saint-Pierre	2000-2002	16	L-M1	0.034
052601	Maskinongé	1983-1995	15	N-M1	0.032
052805	Du Loup	1966-2019	81	L-M1	0.036
052810		2013-2015	12	L-M1	0.120
054001	Beauport	2010-2020	41	L-M1	0.050
		2009-2010	12	L-M1	0.049
		2006-2008	14	N-M1	0.084

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	Modèle sélectionné	Paramètre $\sigma_1$
060102	Petit Saguenay	1999-2017	38	N-M1	0.047
060704	À Mars	2009-2020	29	L-M1	0.016
060901	Du Moulin	2014-2018	11	L-M1	0.017
061004	Chicoutimi	1963-2020	64	N-M1	0.043
061022	Pikauba	1970-1978	23	L-M1	0.028
		1978-1991	27	L-M1	0.040
		2009-2019	13	N-M1	0.038
061024	Cyriac	1996-2020	42	L-M1	0.039
061028	Pikauba	2000-2016	11	L-M1	0.020
061307	La Belle Rivière	2008-2013	18	N-M1	0.046
061502	Métabetchouane	1977-2020	51	N-M1	0.037
061602	Ouiatchouan	1984-2020	51	N-M1	0.051
061801	Petite rivière Péribonka	1975-1989	30	L-M1	0.019
		2009-2020	13	L-M1	0.009
		1996-2008	13	N-M1	0.043
061901	Ashuapmushuan	1953-2019	81	L-M1	0.023
061909	Aux Saumons	2013-2020	11	L-M1	0.012
		1992-1995	10	L-M1	0.023
		1995-2006	14	L-M1	0.093
		2006-2008	10	L-M1	0.013
		1982-1991	23	N-M1	0.067
062002	Rouge	2009-2015	21	L-M1	0.033
062102	Mistassini	1957-2020	74	N-M1	0.033
062114	Mistassibi	2003-2020	27	N-M1	0.030
062701	Valin	1975-2020	46	L-M1	0.022
064101	Aux Iroquois	2011-2020	26	N-M1	0.043

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	Modèle sélectionné	Paramètre $\sigma_1$
070204	Des Escoumins	1992-2018	39	L-M1	0.040
071401	Godbout	1974-1978	12	L-M1	0.030
071801	Riverin	2014-2019	14	N-M1	0.097
072301	Moisie	1962-2019	26	L-M1	0.014
075705	Du Petit Mécatina	1983-2009	29	L-M1	0.024
		2009-2019	12	L-M1	0.020
076601	Saint-Paul	1967-1973	10	L-M1	0.031
080106	Bourlamaque	2010-2019	23	N-M1	0.078
080707	Bell	1962-2019	39	N-M1	0.041
080718	Waswanipi	1966-2019	27	N-M1	0.044
081101	Pontax	1975-1989	16	L-M1	0.037
		2001-2019	14	L-M1	0.017
093801	Grande rivière de la Baleine	1961-2019	26	L-M1	0.014
102706	Aux Feuilles	1987-2018	14	N-M1	0.036
103605	Aux Mélèzes	1965-1966	11	L-M1	0.010
103702	Caniapiscau	1962-1966	14	L-M1	0.017
		1966-2018	12	L-M1	0.013
104803	George	1975-2018	23	N-M1	0.028
120201	Dauphine	1970-1976	38	L-M1	0.075
		1976-1983	27	L-M1	0.092
		1985-1995	28	L-M1	0.062

Tableau F.2 – Paramètres des modèles d'incertitudes des courbes de tarage (CT) où le modèle M2 a été sélectionné.

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	Modèle sélectionné	Paramètre $\sigma_1$	Paramètre $\sigma_0$ ou $\sigma_2$	Paramètre $\alpha_0$ ou $\alpha_2$
010802	Bonaventure	1994-2002	24	L-M2d	0.088	3.98	0.011
		2012-2017	12	L-M2d	0.105	51.69	0.013
		2002-2011	24	N-M2d	0.201	7.98	0.040
010902	Petite rivière Cascapédia	1981-2019	96	L-M2d	0.069	10.06	0.020
011003	Cascapédia	1984-1994	29	N-M2d	0.199	723.99	0.027
011204	Nouvelle	2017-2020	15	L-M2d	0.705	10.79	0.012
011509	Matapédia	1996-2020	55	N-M2d	0.068	12.75	0.022
011707	Madawaska	2003-2020	31	N-M2d	0.046	3.91	0.020
021407	Sainte-Anne	1978-1992	27	L-M2d	0.062	11.04	0.011
		2000-2016	46	L-M2d	0.308	3.79	0.011
		2016-2020	16	L-M2d	0.102	7.31	0.014
021702	Blanche	2007-2020	19	L-M2d	0.086	16.35	0.022
022301	Des Trois-Pistoles	1939-2020	72	N-M2d	0.110	12.68	0.034
022513	Du Loup	1961-1976	47	L-M2d	0.074	1.87	0.011
		1977-2018	55	N-M2d	0.039	4.11	0.020
023002	Boyer Sud	2014-2019	23	N-M2d	0.412	29.19	0.066
023004	Boyer	1996-2017	58	L-M2d	0.072	10.73	0.021
023106	Du Sud	1966-2019	104	L-M2d	1.041	11.32	0.056
023401	Beaurivage	1929-2020	59	N-M2d	0.091	7.98	0.021
023422	Famine	1964-2017	133	N-M2d	0.119	16.55	0.071
023427	Chaudière	2001-2019	19	L-M2d	0.164	82.42	0.044
023432	Bras d'Henri	1988-2020	76	L-M2d	0.152	40.49	0.071
023445	Bras d'Henri	2006-2013	29	N-M2d	0.474	14.90	0.050
030103	Nicolet	2000-2020	25	L-M2d	0.200	194.85	0.027

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	Modèle sélectionné	Paramètre $\sigma_1$	Paramètre $\sigma_0$ ou $\sigma_2$	Paramètre $\alpha_0$ ou $\alpha_2$
030103	Nicolet	1987-1999	21	N-M2d	0.200	8.24	0.031
030106	Bulstrode	2004-2020	25	L-M2d	0.419	1482.91	0.056
030208	Saint-François	1990-2018	37	L-M2d	0.255	41.08	0.019
030220	Massawippi	2000-2020	29	N-M2d	0.722	16.22	0.055
030225	Saint-François	1980-2019	46	N-M2d	0.226	39.28	0.043
030234	Eaton	1998-2010	12	L-M2d	0.096	1378.29	0.018
030282	Au Saumon	1991-1996	14	N-M2a	0.000	7.54	0.020
030284	Saint-François	1979-2018	48	N-M2d	0.119	10.65	0.044
030302	Yamaska	1966-1980	37	L-M2d	0.105	4.02	0.011
		1980-2007	30	N-M2d	0.119	9.38	0.020
030309	Yamaska Nord	1977-1978	11	L-M2d	0.242	10.82	0.019
		1979-1985	14	N-M2a	0.003	3.67	0.020
030316	David	1969-2019	127	L-M2d	0.286	49.62	0.070
030343	Yamaska Nord	1990-2005	46	N-M2d	0.207	4.47	0.067
030345	Yamaska	1994-2018	67	N-M2d	0.181	10.84	0.026
030348	Runnels	2000-2020	66	L-M2d	0.198	11.97	0.013
030351	Yamaska	2005-2013	27	L-M2d	0.647	18.90	0.033
030415	Des Hurons	1980-1988	20	L-M2d	0.123	35.60	0.025
		1989-1994	11	L-M2d	0.061	14.98	0.011
030421	L'Acadie	2006-2020	32	L-M2d	0.126	4.99	0.011
030423	Morpions	2005-2020	46	N-M2d	0.588	24.08	0.084
030426	Ewing	2002-2016	34	L-M2d	0.124	12.24	0.026
030907	Des Anglais	1974-1989	36	L-M2d	0.146	3.44	0.011
		2009-2020	17	N-M2a	0.005	3.66	0.042
030920	Noire	2011-2020	25	N-M2d	0.162	9.92	0.063
040110	Du Nord	1979-2020	44	L-M2d	0.093	39.27	0.017

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	Modèle sélectionné	Paramètre $\sigma_1$	Paramètre $\sigma_0$ ou $\sigma_2$	Paramètre $\alpha_0$ ou $\alpha_2$
040129	Doncaster	2011-2019	17	N-M2a	0.000	79.50	0.049
		1974-1983	23	N-M2d	0.143	5.32	0.027
040132	Décharge du lac Ludger	1983-2019	65	L-M2d	0.202	474.55	0.045
040212	Saint-Louis	1968-1994	69	L-M2d	0.247	4.65	0.011
		1994-2019	33	N-M2d	0.148	21.22	0.035
040406	De la Petite Nation	1972-1999	41	N-M2d	0.062	5.48	0.020
040409	Suffolk	1995-2019	51	L-M2d	0.128	24.85	0.043
		1976-1995	42	N-M2d	0.349	48.37	0.070
040830	Gatineau	1974-2019	57	N-M2d	0.366	13.81	0.025
043012	Kinojévis	1965-2020	72	L-M2d	0.027	4.79	0.011
050119	Matawin	2000-2018	25	N-M2d	0.055	4.67	0.020
050135	Croche	1972-1978	16	L-M2d	0.111	12.13	0.011
050144	Vermillon	1983-2020	53	N-M2a	0.000	8.51	0.051
050304	Batiscan	1992-2020	30	N-M2d	0.091	11.00	0.020
050409	Bras du Nord	1994-2020	37	L-M2d	0.065	5.04	0.016
		1965-1979	33	L-M2d	0.060	7.62	0.013
050801	Jacques-Cartier	1925-2018	62	L-M2d	0.044	14.75	0.012
050813	Décharge du lac Clair	1995-2014	17	N-M2d	0.179	2.26	0.020
050904	Saint-Charles	1968-1978	29	L-M2d	0.176	8.03	0.032
		1978-1992	24	N-M2d	2.252	20.90	0.099
050915	Nelson	2017-2020	15	N-M2a	0.000	41.36	0.054
		2006-2013	41	N-M2d	0.316	3.68	0.038
051001	Montmorency	1998-2020	19	L-M2d	0.068	3.58	0.011
051502	Malbaie	1996-2019	36	N-M2d	0.112	110.10	0.040
052212	Ouareau	1978-1995	31	L-M2d	0.116	10.30	0.020
052219	L'Assomption	1962-2018	81	N-M2d	0.125	18.25	0.031

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	Modèle sélectionné	Paramètre $\sigma_1$	Paramètre $\sigma_0$ ou $\sigma_2$	Paramètre $\alpha_0$ ou $\alpha_2$
052228	Noire	1974-2019	96	N-M2d	0.103	8.30	0.037
052233	De l'Achigan	1991-2017	52	N-M2d	0.198	8.95	0.027
052235	Saint-Pierre	2012-2019	19	L-M2d	0.081	5.37	0.011
		2002-2012	32	L-M2d	0.207	3.21	0.011
052601	Maskinongé	1935-1983	46	N-M2d	0.153	5.14	0.036
		2010-2020	21	N-M2d	0.124	4.81	0.027
052606	Mastigouche	1995-2019	56	N-M2d	0.218	22.85	0.058
060901	Du Moulin	2008-2013	15	N-M2d	0.122	13.08	0.026
061020	Aux Écorces	1998-2019	23	L-M2d	0.152	44.46	0.012
		1970-1997	42	N-M2d	0.552	18.77	0.036
061022	Pikauba	1998-2009	13	L-M2d	0.049	7.56	0.011
061307	La Belle Rivière	1996-2007	22	N-M2a	0.000	328.76	0.043
062002	Rouge	2015-2020	14	L-M2d	0.084	8.63	0.011
062803	Sainte-Marguerite Nord-Est	1997-2020	39	N-M2d	0.188	90.32	0.061
071203	Aux Anglais	2009-2019	23	N-M2a	0.014	2.55	0.020
071401	Godbout	1978-2019	42	L-M2d	0.349	89.15	0.025
073503	Magpie	1978-2019	26	L-M2d	0.075	1093.34	0.017
074903	Natashquan	1980-2019	27	N-M2a	0.000	170.94	0.042
076601	Saint-Paul	1973-2019	24	N-M2d	0.147	11.86	0.021
080101	Harricana	1944-2019	71	N-M2d	0.240	21.86	0.042
080809	Broadback	1972-2019	27	L-M2d	0.063	4.41	0.014
089907	Bellefeuille	2010-2020	24	N-M2d	0.340	8529.14	0.059
104001	À la Baleine	1962-2018	34	N-M2d	0.036	19.13	0.022
120201	Dauphine	2008-2020	53	L-M2d	0.397	5.87	0.044

Tableau F.3 – Paramètres des modèles d’incertitudes des courbes de tarage (CT) où le modèle M3 a été sélectionné.

Numéro de la station	Nom de la station	Période couverte par la séquence	Nombre de jaugeage	Modèle sélectionné	Paramètre $\sigma_0$	Paramètre $\sigma_1$	Paramètre $\sigma_2$	Paramètre $\alpha_0$	Paramètre $\alpha_2$
030106	Bulstrode	1982-2004	38	L-M3	0.568	28.52	1.02E-04	7.29	0.022
030343	Yamaska Nord	2006-2018	49	N-M3	0.397	7.07	5.48E-05	8.47	0.030
030415	Des Hurons	1998-2011	27	N-M3	0.187	166.95	9.81E-11	21.24	0.039
030429	À l'Ours	2006-2020	34	N-M3	0.421	11.66	3.28E-07	14.47	0.046
050408	Sainte-Anne	1965-2001	53	N-M3	0.074	19.57	2.42E-06	10.79	0.027
050702	Portneuf	2008-2018	19	L-M3	0.054	9.22	5.35E-10	19.02	0.014
061307	La Belle Rivière	2013-2019	23	N-M3	0.314	11.36	1.70E-05	8.21	0.020



## ANNEXE G. CAS SPÉCIAUX – COURBES DE TARAGE

Cette annexe présente les CT dont les modèles d'incertitudes sont problématiques. La liste de ces CT apparaît au Tableau 8.3.

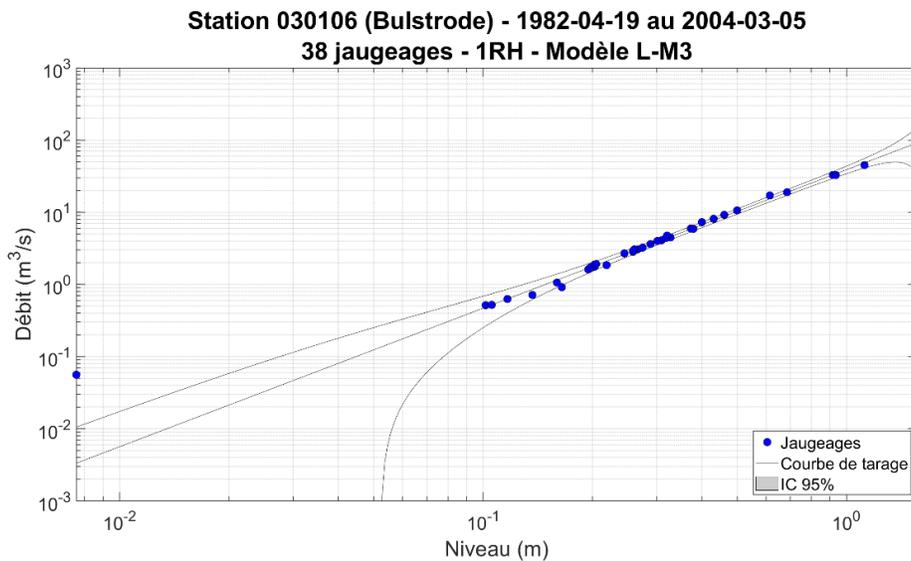


Figure G.1 – Courbes de tarage et intervalles 5-95% pour les CT de la station Bulstrode (030106) couvrant la période du 19/04/1982 au 05/03/2004 (38 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d'incertitude L-M3. A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l'écart entre le niveau et le niveau de référence  $b$  de la RH obtenu après ajustement de la CT.

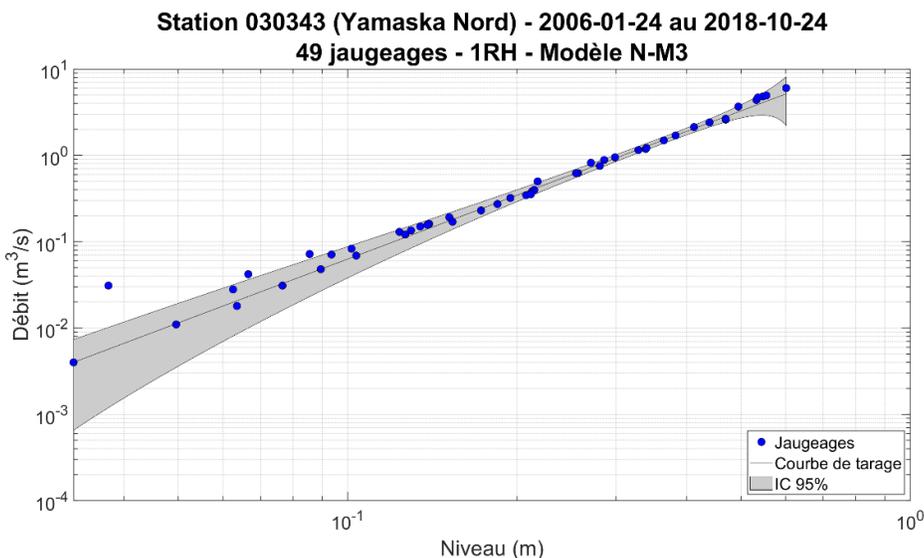


Figure G.2 – Courbes de tarage et intervalles 5-95% pour les CT de la station Yamaska Nord (030343) couvrant la période du 24/01/2006 au 24/10/2018 (49 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d'incertitude N-M3. A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l'écart entre le niveau et le niveau de référence  $b$  de la RH obtenu après ajustement de la CT.

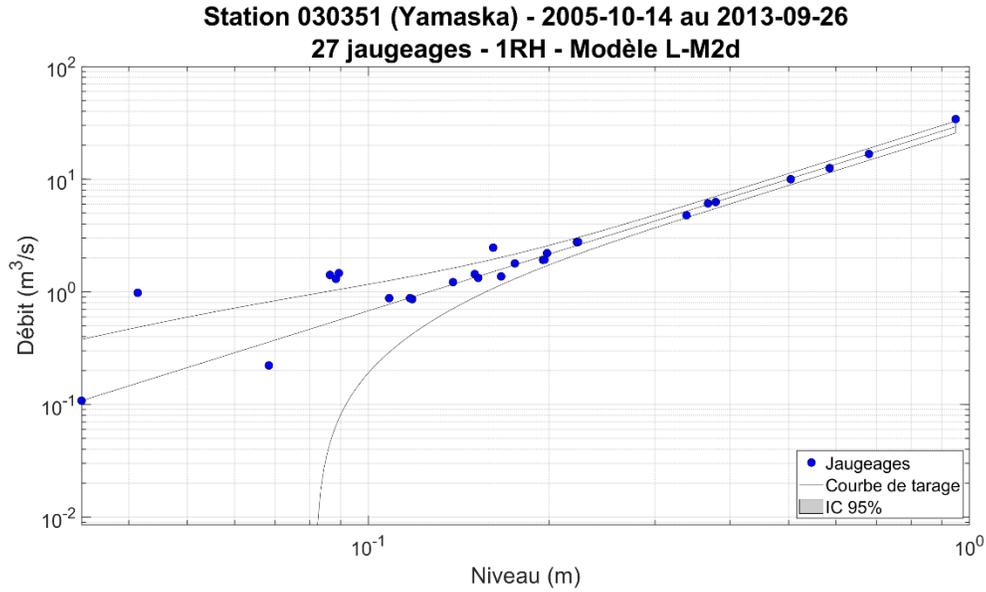


Figure G.3 – Courbes de tarage et intervalles 5-95% pour les CT de la station Yamaska (030351) couvrant la période du 14/10/2005 au 26/09/2013 (27 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d'incertitude L-M2d. A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l'écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.

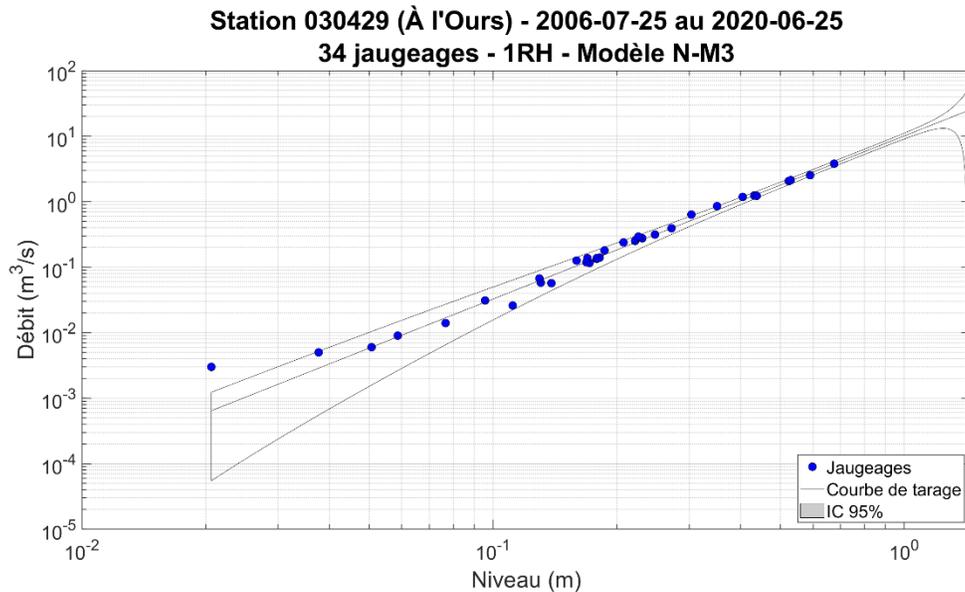


Figure G.4 – Courbes de tarage et intervalles 5-95% pour les CT de la station À l'Ours (030429) couvrant la période du 25/07/2006 au 25/06/2020 (34 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d'incertitude N-M3. A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l'écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.

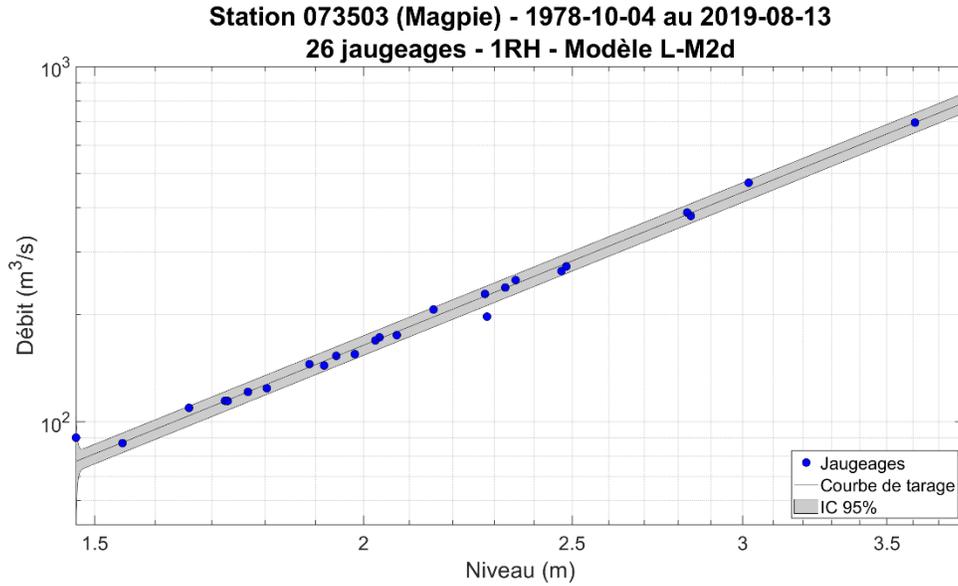


Figure G.5 – Courbes de tarage et intervalles 5-95% pour les CT de la station Magpie (073503) couvrant la période du 04/10/1978 au 13/08/2019 (34 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d'incertitude L-M2d. A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l'écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.

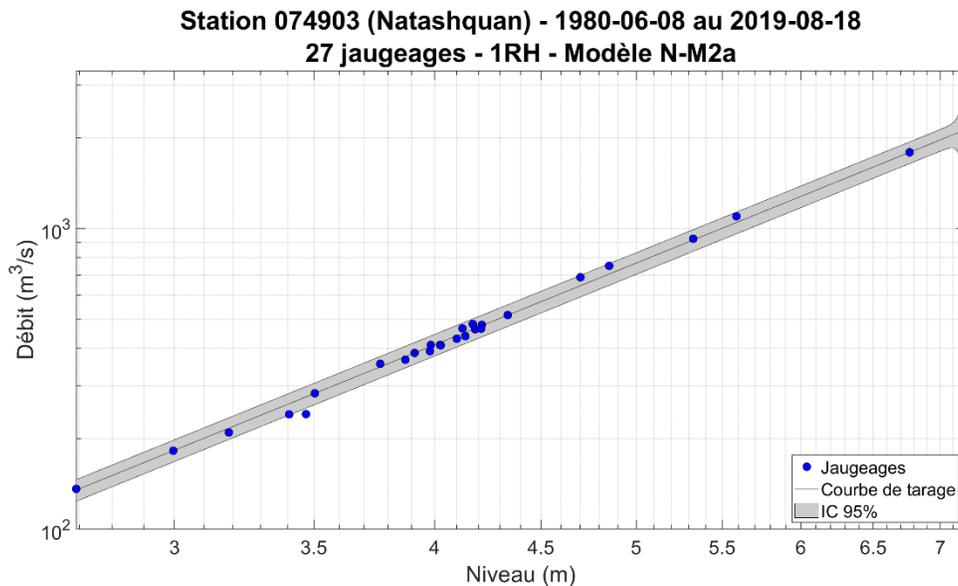


Figure G.6 – Courbes de tarage et intervalles 5-95% pour les CT de la station Natashquan (074903) couvrant la période du 08/06/1980 au 18/08/2019 (27 jaugeages) et représenté par une RH et le modèle d'incertitude N-M2a. A noter les échelles logarithmiques en ordonnées et en abscisses. Le niveau est exprimé en fonction de l'écart entre le niveau et le niveau de référence b de la RH obtenu après ajustement de la CT.



## **ANNEXE H. PROFIL DES SECTIONS DE CONTRÔLE ET INCERTITUDES**

Le Tableau H.1 indique le facteur de correction donné pour chaque station hydrométrique géoréférencée (SHG) ainsi que différents niveaux suite à l'application du facteur de correction. En plus des niveaux associés aux changements de profils, ce tableau contient les niveaux des plus petits niveaux jaugés (PPNJ), des plus grands niveaux jaugés (PGNJ), des plus petits niveaux mesurés (PPNM), des plus grands niveaux mesurés (PGNM).

En lien avec le Tableau H.1, différents points nécessitent d'être soulevés. Pour trois SHG (010902, 030220 et 051003), une note N/A est ajoutée à la colonne PPNM. Il est important de rappeler que les valeurs enregistrées de niveaux ne sont pas disponibles dans les fichiers de données historiques (voir Section 2.5). Dès lors, les équations des spline cubique (voir Section 3.2.2) ont été utilisées pour estimer les valeurs de niveaux. Toutefois, pour de très petites valeurs de débits, les valeurs de niveaux obtenues peuvent être négatives, ce qui est le cas pour ces trois SHG.

Pour six SHG (022505, 050408, 051005, 061022, 061602 et 080101), le PGNJ est plus élevé que le PGNM. Cette situation survient parce que les données instantanées historiques de débits ne sont pas disponibles avant 1997 (voir Section 5.5). Toutefois, une station hydrométrique peut être active bien avant 1997 et il est possible qu'un jaugeage, dont le niveau surpasse les niveaux ultérieurs à 1997, ait été réalisé antérieurement à 1997. La situation inverse survient également pour les mêmes raisons, c.-à-d. que le PPNJ est moins élevé que le PPNM. Cette situation touche 12 SHG (010802, 011204, 022507, 022513, 023429, 030103, 030208, 030225, 030905, 050812, 050915 et 061004).

Tableau H.1 – Facteur de correction des stations hydrométriques géoréférencées et niveaux après l'application du facteur du plus petit niveau jaugé (PPNJ), du plus grand niveau jaugé (PGNJ), du plus petit niveau mesuré (PPNM), du plus grand niveau mesuré (PGNM) ainsi que des niveaux critiques.

Station	Correction (m)	Niveau après correction (m)				Niveau critique après correction (m)		
		PPNJ	PGNJ	PPNM	PGNM	1	2	3
010802	-2.97	44.41	47.06	44.45	49.00	51.40	58.37	
010902	-25.40	22.42	24.70	N/A	26.33	52.85		
011204	-13.60	14.91	17.49	15.05	18.15	31.32	32.68	
011508	108.67	156.40	158.93	156.31	158.94	52.19	53.01	
011509	27.78	53.94	55.96	43.49	56.61	29.54		
011707	98.09	145.51	149.39	145.41	149.65	50.12	51.69	52.54
020404	45.30	91.46	93.20	91.46	94.17	53.37	53.90	
021407	-4.17	22.31	24.48	21.86	25.22	28.40	29.22	
021601	-9.12	15.69	18.79	15.69	20.05	29.01		
021702	13.05	42.03	43.56	41.99	44.16	34.04	35.88	
021916	95.69	143.38	145.04	143.35	145.45	49.06	49.59	
022505	151.69	180.00	181.78	179.91	181.75	30.37	31.32	
022507	101.86	125.47	129.75	125.49	130.42	26.28	27.66	
022513	60.96	90.10	92.52	90.14	92.61	32.53	32.77	34.36
022601	-37.30	9.61	12.20	9.58	12.49	51.42		
023002	34.16	81.96	83.48	81.92	84.53	49.44	49.72	
023303	34.91	80.75	83.39	80.72	84.10	49.33		
023402	91.44	112.00	115.98	111.91	116.95	23.80	26.31	32.64
023422	181.13	207.92	210.19	207.90	212.03	27.82	29.37	30.50
023427	346.03	391.86	394.56	391.64	395.41	47.79	49.47	50.91
023429	137.89	166.55	169.81	166.64	171.02	35.56	41.24	42.86
023448	183.82	227.43	230.21	227.24	230.28	45.87	49.48	

Station	Correction (m)	Niveau après correction (m)				Niveau critique après correction (m)		
		PPNJ	PGNJ	PPNM	PGNM	1	2	3
024014	35.65	82.41	86.58	81.01	90.02	51.20	53.31	54.32
030101	0.00	154.80	157.82	154.74	158.28	157.41	158.79	
030103	37.20	62.37	64.90	62.42	65.71	34.75		
030106	0.00	124.08	126.16	124.06	127.44	126.94	128.37	
030208	121.53	140.01	146.38	140.02	149.54	24.20	24.99	26.73
030215	156.93	184.01	186.32	183.95	189.16	29.32	30.99	35.03
030220	129.58	157.96	160.40	N/A	167.74	31.03	32.47	32.74
030225	230.87	278.25	281.28	278.32	281.93	48.75	49.95	51.54
030234	157.06	182.30	184.28	182.15	185.47	39.00		
030278	200.27	243.43	244.94	243.36	245.63	43.96	46.09	
030299	22.32	70.02	72.05	70.02	72.12	52.82	53.86	
030302	30.49	62.62	64.02	62.61	64.40	32.34	33.53	35.28
030304	4.86	32.59	34.34	32.27	34.70	28.93	30.55	
030309	96.38	126.28	127.50	126.25	128.16	32.71		
030316	-15.67	11.15	14.32	11.09	14.80	29.75	30.28	32.07
030340	-14.26	79.42	80.33	79.34	81.72	94.50	95.01	96.03
030343	0.00	205.02	205.59	204.99	205.80	207.98	209.31	
030345	-6.41	18.77	23.29	18.69	23.93	28.35	31.00	
030348	26.02	71.35	72.49	71.23	73.30	47.88		
030353	89.52	138.51	139.62	138.46	140.16	49.99	50.21	51.07
030415	-4.60	18.46	21.17	18.42	22.47	27.66	30.01	
030421	-8.55	18.86	20.89	18.77	21.69	28.05	28.11	29.35
030423	-4.80	42.02	43.62	42.01	44.98	47.30	49.89	
030424	-12.51	37.36	39.39	37.32	39.99	50.49	51.62	53.18
030425	4.46	52.35	53.51	52.30	53.95	48.61	50.37	

Station	Correction (m)	Niveau après correction (m)				Niveau critique après correction (m)		
		PPNJ	PGNJ	PPNM	PGNM	1	2	3
030426	-14.42	31.74	32.99	31.65	33.59	47.12	47.66	
030429	-22.82	22.78	24.21	22.76	24.61	48.95		
030905	-1.43	26.95	31.23	27.04	33.25	30.39	34.35	35.90
030907	6.97	37.09	38.96	37.07	40.07	32.26	35.09	
030919	16.76	45.69	47.20	45.68	47.34	30.30	30.51	30.89
030920	8.73	54.64	55.82	54.63	56.73	47.82	48.98	
030921	2.89	48.21	50.25	48.17	50.47	49.14	49.67	
040110	91.44	97.55	100.68	97.49	100.95	8.84	10.07	
040122	300.37	328.20	330.30	328.17	330.45	29.58	30.30	32.11
040132	0.00	373.55	374.51	373.43	374.61	374.40	376.23	
040238	157.93	194.6	197.9	194.5	198.2	39.43	41.37	46.33
040841	138.37	185.89	188.80	185.87	188.8	49.40	52.64	54.29
043012	242.36	269.39	273.25	269.03	274.0	36.08		
043301	-27.62	19.00	22.64	18.88	22.7	49.51	50.80	51.88
048603	213.45	260.68	260.86	260.68	260.95	44.09	47.38	
050304	67.64	94.19	97.23	94.00	97.4	30.74	32.12	
050408	96.31	123.10	127.59	122.77	127.1	31.57	33.23	36.53
050501	45.79	74.12	75.19	74.10	75.9	29.05	29.62	31.49
050702	-7.52	40.42	42.55	39.92	42.9	48.90	49.85	50.60
050801	121.91	150.51	154.82	150.31	155.5	29.86	30.44	32.61
050807	111.23	156.65	158.83	156.65	159.1	47.65	48.77	49.77
050812	1.91	49.79	51.35	49.86	51.8	50.76		
050904	-14.97	11.73	13.76	11.71	13.8	28.96		
050915	109.47	154.90	157.00	154.93	157.4	46.61	48.39	
050916	118.21	167.05	169.23	167.02	169.9	50.75	51.77	

Station	Correction (m)	Niveau après correction (m)				Niveau critique après correction (m)		
		PPNJ	PGNJ	PPNM	PGNM	1	2	3
051001	66.31	92.61	95.43	92.21	96.1	28.99		
051002	700.59	729.72	730.21	729.51	730.8	29.31	30.66	
051003	535.58	564.03	564.80	N/A	565.4	31.08		
051005	526.34	552.23	556.16	552.21	555.2	29.96	32.22	
051502	3.77	26.32	29.10	26.02	31.8	27.24	29.49	
052219	20.01	39.50	42.15	39.48	42.2	28.13		
052401	53.94	82.43	83.52	82.39	84.0	29.57	29.93	30.61
052601	58.64	85.56	88.33	85.51	89.1	29.02	29.98	31.73
052606	247.23	276.59	277.93	276.53	278.0	31.67	32.34	
054001	-6.15	38.12	38.72	38.10	39.3	48.06		
060102	135.11	163.24	164.74	163.15	165.3	30.09	30.63	
060704	229.95	274.86	276.40	274.86	277.5	45.67	47.75	
060901	60.57	109.77	110.57	109.74	110.6	49.10	49.53	50.51
061004	129.18	150.65	152.65	150.74	154.9	24.04		
061020	328.69	356.34	358.15	356.29	358.4	30.73	31.60	
061022	524.95	553.98	555.97	553.93	555.8	32.14		
061502	184.31	211.67	213.20	211.58	213.49	34.32		
061602	297.36	324.32	326.38	324.22	326.03	28.58		
080101	274.32	292.53	295.23	292.47	294.95	20.11	20.88	
089907	243.18	286.52	289.13	286.45	291.71	48.65		
120201	16.86	45.68	46.52	45.65	47.83	30.67	31.35	



## **ANNEXE I. MODÉLISATION HYDRAULIQUE ET COMPARAISON AVEC DES COURBES DE TARAGE (MÉTHODOLOGIE)**

La comparaison de courbes de tarage (CT) issue de modélisation hydrauliques et de CT basées sur des jaugeages et sur une relation hydraulique (voir Section 3.2.1) implique deux approches différentes selon les sources des modélisations hydrauliques et les données reçues. La Section I.1 décrit la procédure retenue en lien avec les modélisations hydrauliques provenant de l'équipe de Mme Audrey Lavoie de la DEH (MELCC). La Section I.2 décrit quant à elle l'approche utilisée avec les modélisations hydrauliques de Mme Mélanie Trudel de l'Université de Sherbrooke.

### **I.1 Étapes de réalisation : modélisation provenant de la DEH**

Le lien entre les modélisations hydrauliques réalisées par l'équipe de Mme Audrey Lavoie et les CT correspondantes ont été effectuées pour deux stations hydrométriques :

1. Aux Sables (061029), Municipalité : Saguenay, Superficie du BV : 3400 km<sup>2</sup>.
2. Etchemin (023303), Municipalité : Saint-Henri, Superficie du BV : 1152 km<sup>2</sup>.

Pour ces deux stations, différents profils de profondeurs ont été fournis par l'équipe de Mme Lavoie correspondant à différents débits (voir Tableau I.1 pour la station Aux Sables et le Tableau I.2 pour la station Etchemin). La résolution du maillage utilisée est de 1 m<sup>2</sup>.

Les Tableaux I.3 et I.4 contiennent les principales informations relatives aux jaugeages disponibles aux stations Aux Sables et Etchemin respectivement, soient les niveaux et débits mesurés ainsi que la date où les jaugeages ont été réalisés.

À ces informations s'ajoutent celles provenant des modèles numériques de terrain (MNT. LiDAR) qui permettent d'estimer l'élévation ou l'altitude des divers points par rapport au niveau de la mer. Les LiDAR (résolution de 1m x 1m) ont également été fournis par l'équipe d'Audrey Lavoie.

Les étapes servant à l'analyse hydraulique de la section de contrôle sont les suivantes.

1. La première étape consiste à localiser le transect près du contrôle hydraulique et de la zone où sont vraisemblablement réalisés les jaugeages. Le transect doit satisfaire aux critères suivants :
  - a. Il est perpendiculaire à la direction principale d'écoulement de l'eau ;
  - b. Il est prolongé au-delà des points de contact avec les berges associées au débit le plus élevé considéré.

La Figure I.1 montre le transect pour la station Aux Sables (061029) ainsi que les profondeurs associées à un débit de 650 m<sup>3</sup>/s (profil B40 du Tableau I.1). La Figure I.2 montre le transect pour la station Etchemin (023303) ainsi que les profondeurs associées au débit considéré le plus élevé, soit 785 m<sup>3</sup>/s (profil B36 du Tableau I.2).

Tableau I.1 – Numéro des profils de profondeur avec les débits simulés correspondants pour la station Aux Sables (061029).

Numéro	Débit (m <sup>3</sup> /s)						
B1	25.5	B11	120	B21	280	B31	480
B2	30	B12	130	B22	300	B32	500
B3	40	B13	140	B23	320	B33	520
B4	50	B14	150	B24	340	B34	540
B5	60	B15	160	B25	360	B35	560
B6	70	B16	180	B26	380	B36	580
B7	80	B17	200	B27	400	B37	600
B8	90	B18	220	B28	420	B38	620
B9	100	B19	240	B29	440	B39	640
B10	110	B20	260	B30	460	B40	650

Tableau I.2 – Numéro des profils de profondeur avec les débits simulés correspondants pour la station Etchemin (023303).

Numéro	Débit (m <sup>3</sup> /s)						
B1	17	B10	119	B19	296	B28	543.5
B2	21	B11	135	B20	320	B29	575.5
B3	30.5	B12	152	B21	345	B30	608
B4	40.5	B13	170	B22	370.5	B31	641.5
B5	51.5	B14	189	B23	397	B32	676
B6	63	B15	208.5	B24	424.5	B33	711.5
B7	75.5	B16	229	B25	453	B34	748
B8	89.5	B17	250.5	B26	482.5	B35	768
B9	103.5	B18	272.5	B27	512.5	B36	785

Tableau I.3 - Niveaux et débits associés aux jaugeages de la station Aux Sables (061029) et dates des jaugeages.

Numéro	Niveau (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Date (a/m/j)	Numéro	Niveau (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Date (a/m/j)
J1	44.24	9.23	2009-09-17	J12	44.99	38.99	2014-05-13
J2	44.24	9.45	2009-09-21	J13	44.99	41.90	2014-05-13
J3	44.30	10.06	2010-05-06	J14	45.05	48.70	2014-06-17
J4	44.34	11.37	2010-05-06	J15	45.29	73.30	2017-06-16
J5	44.45	12.95	2012-04-26	J16	45.30	73.51	2017-10-17
J6	44.50	15.44	2012-10-04	J17	45.55	105.46	2018-06-20
J7	44.55	16.25	2013-06-04	J18	45.77	129.33	2018-06-27
J8	44.75	22.89	2013-06-04	J19	45.82	135.01	2018-10-15
J9	44.75	24.56	2013-06-07	J20	46.48	227.75	2018-10-24
J10	44.83	26.84	2013-06-07	J21	47.22	329.39	2019-06-17
J11	44.88	33.85	2013-07-25				

Tableau I.4 - Niveaux et débits associés aux jaugeages de la station Etchemin (023303) et dates des jaugeages.

Numéro	Niveau (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Date (a/m/j)	Numéro	Niveau (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Date (a/m/j)
J1	45.84	0.47	1980-04-11	J33	46.30	18.81	2009-05-25
J2	45.94	2.44	1980-04-16	J34	46.30	18.68	2009-05-26
J3	45.96	2.68	1981-04-07	J35	46.32	20.94	2009-07-30
J4	45.96	2.89	1983-08-29	J36	46.32	19.91	2009-09-17
J5	45.96	2.72	1984-05-24	J37	46.34	21.10	2010-04-28
J6	45.96	2.72	1985-05-29	J38	46.39	23.86	2011-06-09
J7	45.96	2.75	1986-05-27	J39	46.40	26.30	2011-08-29
J8	45.96	2.85	1988-06-03	J40	46.41	28.38	2012-06-11
J9	45.97	2.79	1988-08-18	J41	46.46	31.92	2012-09-21
J10	45.97	2.76	1989-05-15	J42	46.47	34.70	2013-04-19
J11	45.97	3.48	1989-08-29	J43	46.59	49.17	2013-04-30
J12	46.00	4.12	1989-09-20	J44	46.61	45.23	2013-07-10
J13	46.01	3.97	1991-11-04	J45	46.67	58.49	2013-09-23
J14	46.02	4.61	1992-06-15	J46	46.73	67.60	2015-09-24
J15	46.02	5.02	1992-10-28	J47	46.85	78.55	2016-06-06
J16	46.04	4.87	1993-06-01	J48	46.95	101.79	2016-06-13
J17	46.05	5.17	1993-08-31	J49	46.95	100.85	2016-07-06
J18	46.05	5.69	1994-05-09	J50	46.95	98.56	2016-07-11
J19	46.08	6.40	1995-04-25	J51	46.97	103.22	2016-07-14
J20	46.08	6.96	1995-10-04	J52	46.99	103.66	2016-09-22
J21	46.08	6.78	1996-08-28	J53	46.99	105.34	2016-10-24
J22	46.09	7.02	1999-04-19	J54	47.02	97.89	2016-10-25
J23	46.10	7.06	1999-04-19	J55	47.05	114.56	2017-08-29
J24	46.10	7.10	1999-06-01	J56	47.07	124.00	2017-08-29
J25	46.12	8.32	1999-09-03	J57	47.25	148.53	2017-08-29
J26	46.12	8.97	1999-09-07	J58	47.50	214.07	2017-08-29
J27	46.14	9.04	2002-04-15	J59	47.60	206.34	2017-08-29
J28	46.15	8.18	2002-04-17	J60	47.81	296.45	2017-09-29
J29	46.16	8.37	2002-04-18	J61	47.87	324.24	2018-04-30
J30	46.20	11.15	2005-09-15	J62	48.18	417.68	2018-06-21
J31	46.22	13.00	2006-05-17	J63	48.49	441.18	2020-06-25
J32	46.22	13.25	2007-10-15				

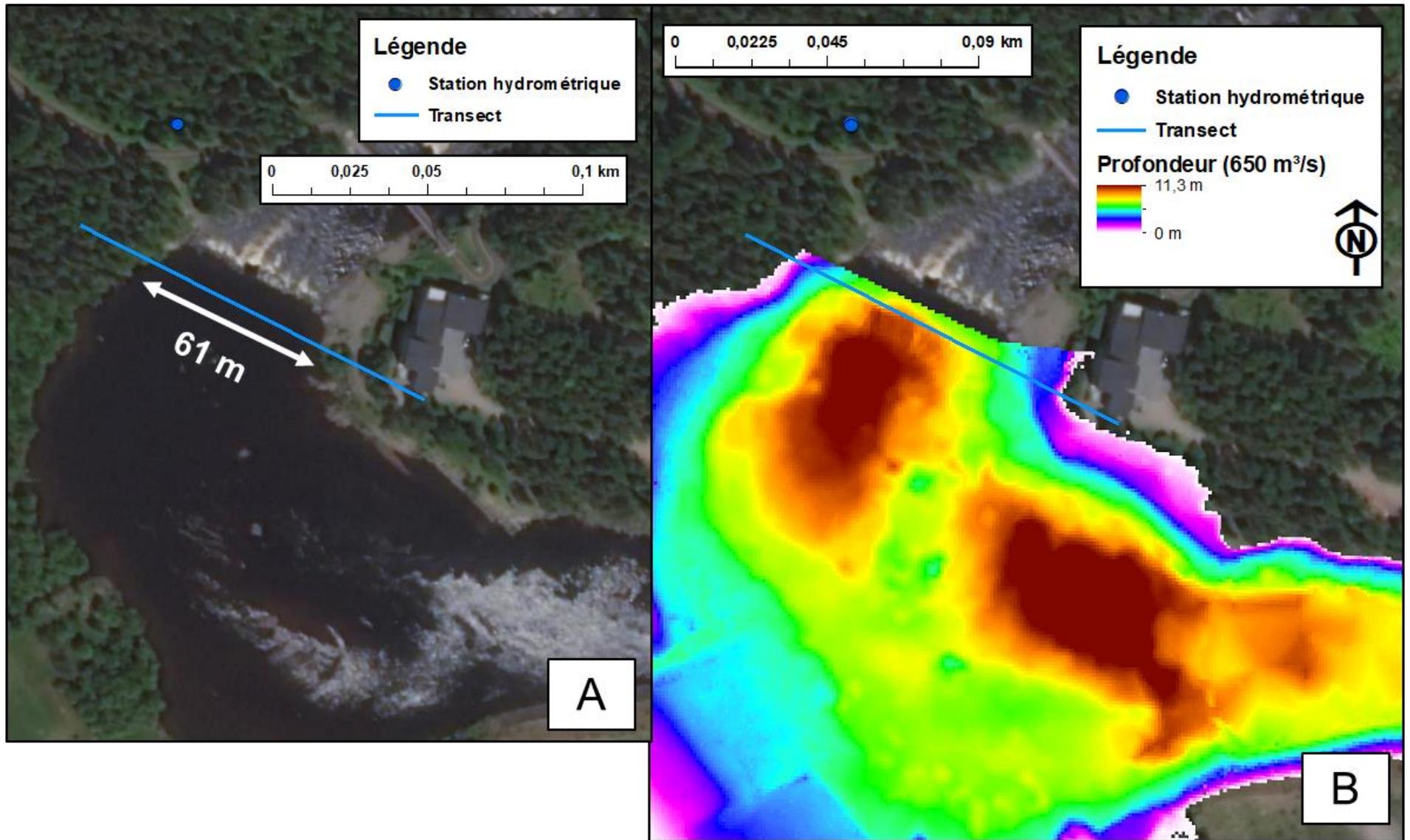


Figure I.1 – A) Localisation de la station hydrométrique Aux Sables (061029) et du transect retenu pour le profil d'élévation et les profils de profondeur et B) profil des profondeurs associées à un débit de  $650 \text{ m}^3/\text{s}$ .

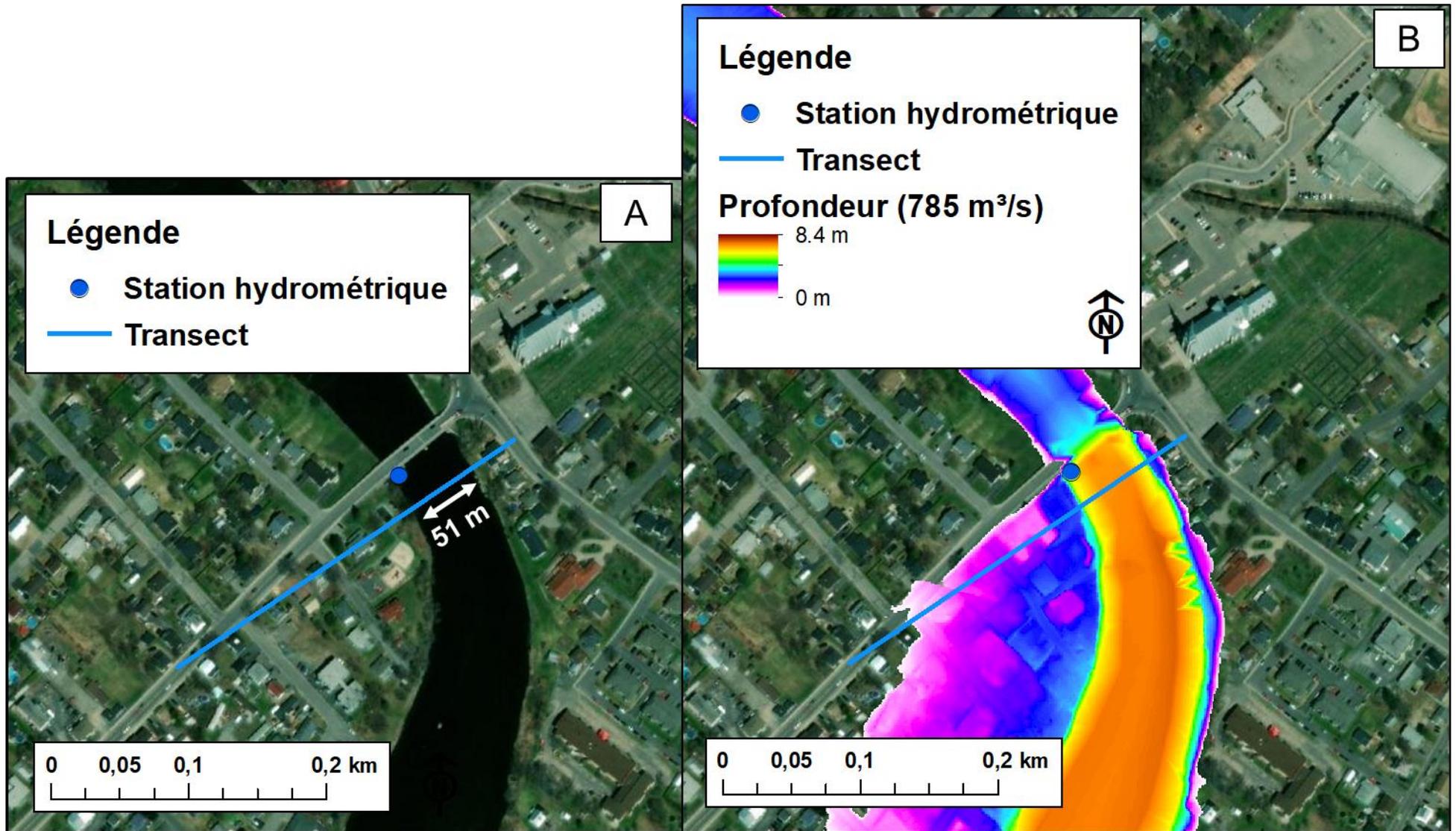


Figure 1.2 – A) Localisation de la station hydrométrique Etchemin (023303) et du transect retenu pour le profil d'élévation et les profils de profondeur et B) profil des profondeurs associées à un débit de 785 m<sup>3</sup>/s.

2. La deuxième étape consiste à identifier un jaugeage dont le débit est similaire à l'un des débits simulés. Il est important que ce jaugeage soit relativement récent pour maximiser les chances qu'il soit représentatif des conditions hydrauliques actuelles considérant que les modélisations hydrauliques sont quant à elle récentes. Ainsi, pour la station Aux Sables, le profil B12 associé au débit de 130 m<sup>3</sup>/s (Tableau H.1) a été associée au jaugeage J18 de débit 129.3 m<sup>3</sup>/s (27 juin 2018, Tableau H.3) alors que pour la station Etchemin, le profil de profondeur B15 associé au débit 208.5 m<sup>3</sup>/s (Tableau H.2) a été associée au jaugeage J59 dont le débit est de 206.34 m<sup>3</sup>/s. (29 août 2017, Tableau H.4). Il est important de retenir que les profils B15 et B12 seront considérées comme les profils de référence dans ce qui suit.
3. La troisième étape consiste à associer une valeur provenant du modèle d'élévation aux points de contact des profils de référence en rives droite et gauche le long du transect (Figure H.3-A) afin d'estimer l'élévation de la ligne d'eau correspondant à la valeur du modèle d'élévation à laquelle est ajoutée la profondeur (Figure H.3-B). La Figure H.4 donne plus de détails quant aux valeurs retenues à la fois pour la station 061029 (Figure H.4-A) et la station 023303 (Figure H.4-B). La Figure H.4 montre que les élévations de la ligne d'eau sur les deux rives aux deux stations sont pratiquement identiques ce qui valide en quelque sorte la méthode retenue. Ainsi, sur la base de ces résultats, une élévation d'environ 152.44 m peut être associée à un niveau de 45.77 m et un débit de 130 m<sup>3</sup>/s pour la station 061029. Cela correspond donc à un écart d'environ 106.66 m. Pour la station 023303, une élévation d'environ 83.14 m pour être associée à un niveau de 47.60 m et un débit d'environ 208 m<sup>3</sup>/s. L'écart dans ce cas-ci est de 35.54 m. Les Figure H.5 et H.6 rapportent ces mêmes informations mais sur une carte affichant le profil de profondeur de référence pour les deux stations à l'étude.
4. La quatrième étape consiste à répéter l'étape 3 pour tous les autres profils de profondeurs disponibles et d'appliquer l'écart (106.66 et 35.54 m pour les stations 061029 et 023303 respectivement) sur cette valeur afin d'obtenir le niveau correspondant. Les courbes de tarage issues du modèle hydraulique (MH) sont présentées à la Figure H.7 à la fois pour la rive gauche et droite.

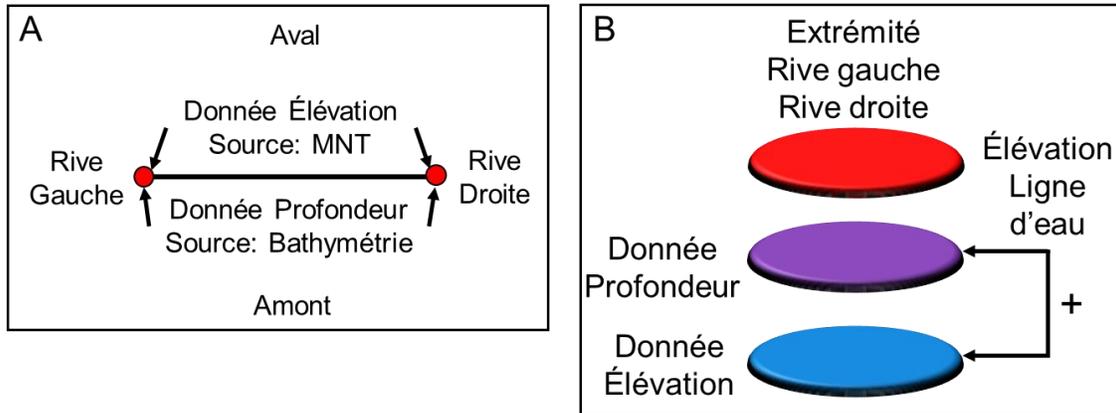


Figure I.3 - Association des données d'élévation et de profondeur aux points de contact des profils de référence avec les berges en rives droite et gauche le long du transect (A : Plan horizontal le long du transect considérant le profil de référence; B : Plan vertical considérant les points de contact avec les berges en rives droite et gauche des profils de référence le long du transect).

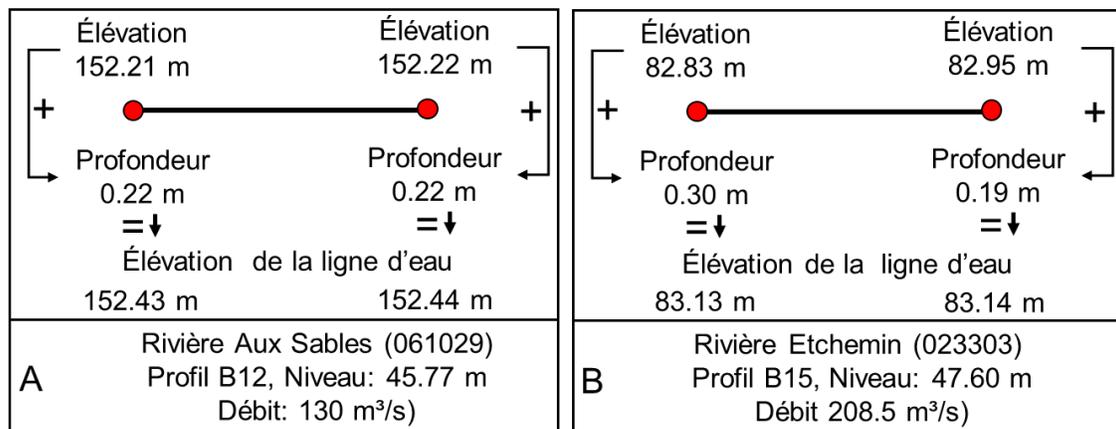


Figure I.4 – Estimation de l'élévation corrigée aux points de contact des profils de référence avec les berges en rives droite et gauche le long du transect et association avec un jaugeage de débit similaire (A : Rivières Aux Sables – 061029; B : Rivière Etchemin – 23303).

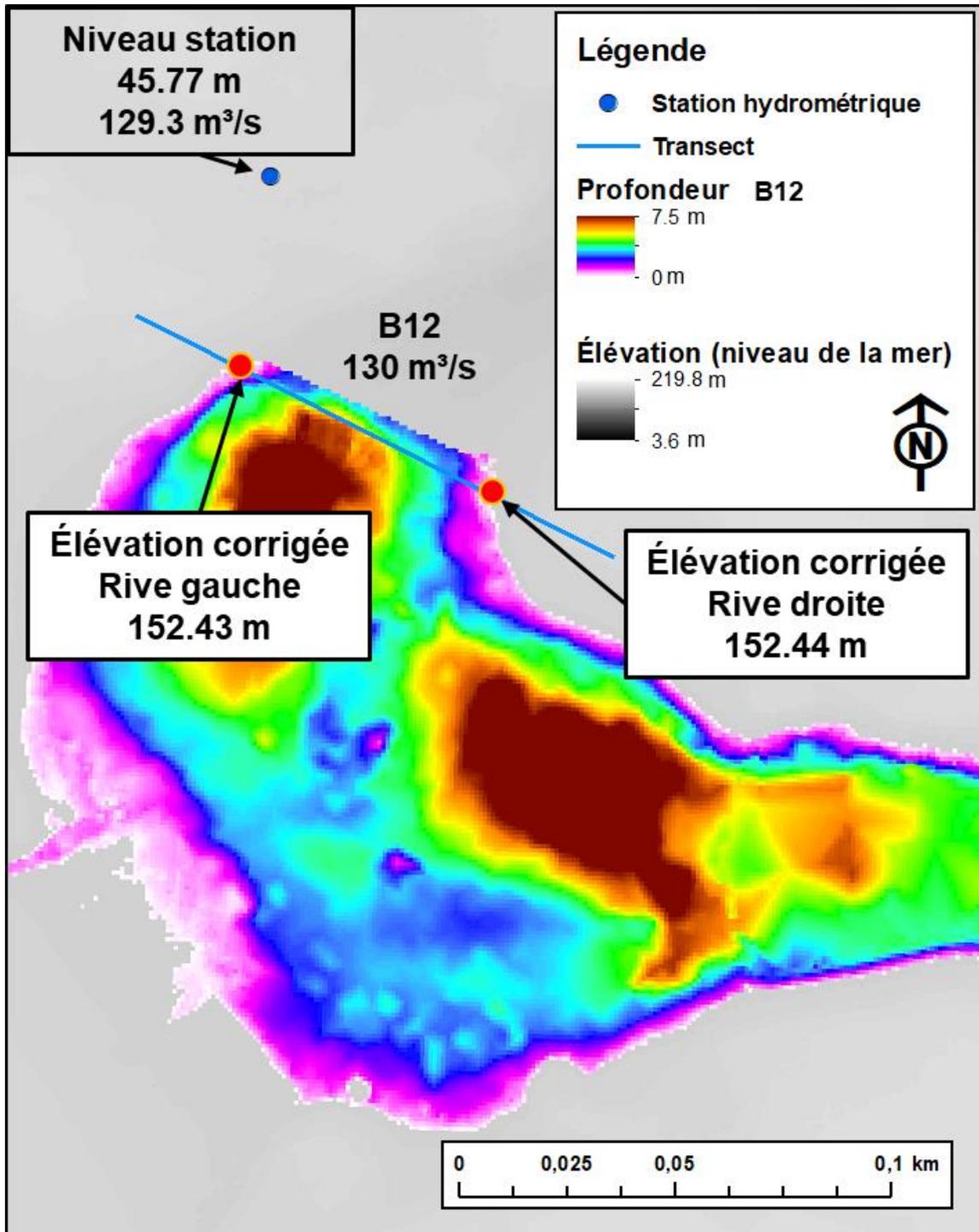


Figure I.5 – Transect à la station Aux Sables (061029), points de contact du profil de référence avec les berges en rives droite et gauche le long du transect et données retenues utilisées pour estimer les élévations corrigées associées à un débit donné.

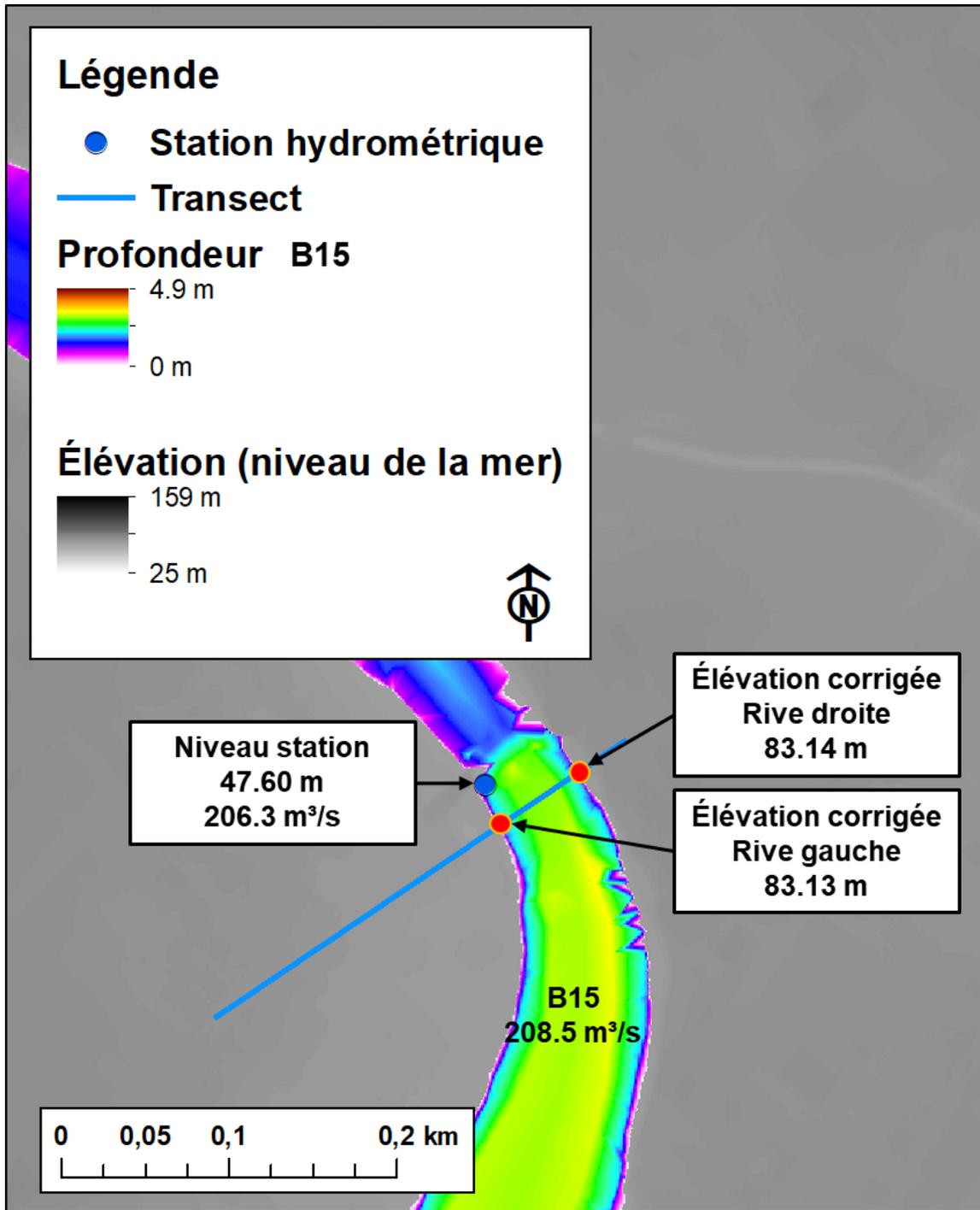
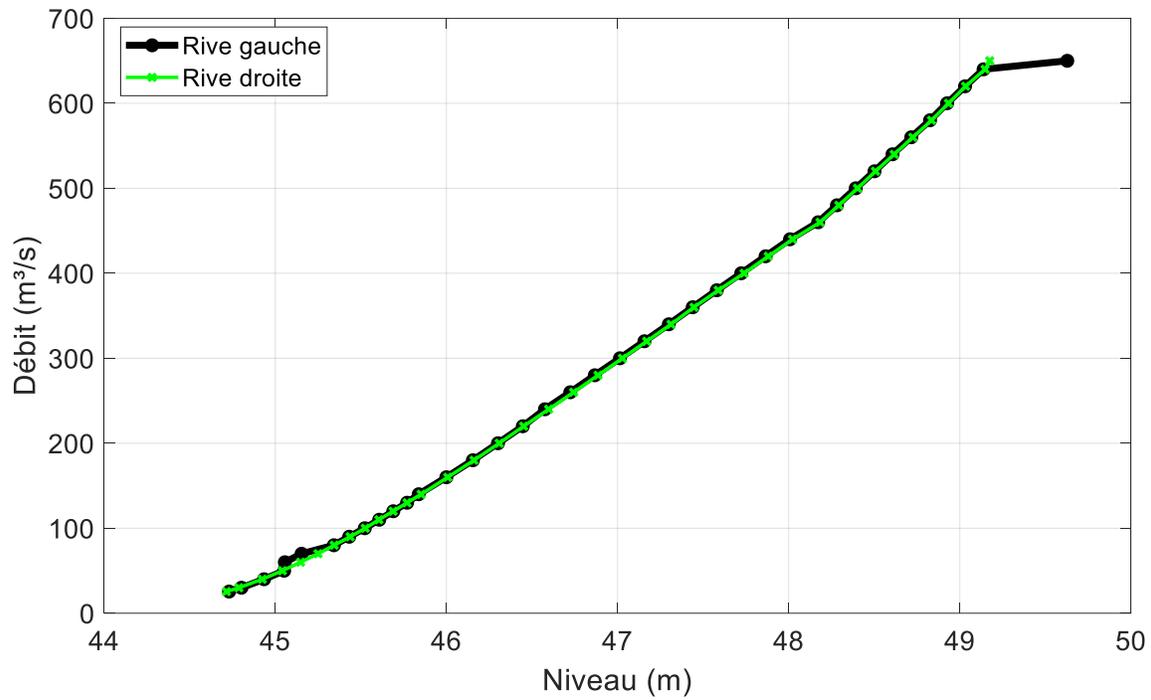
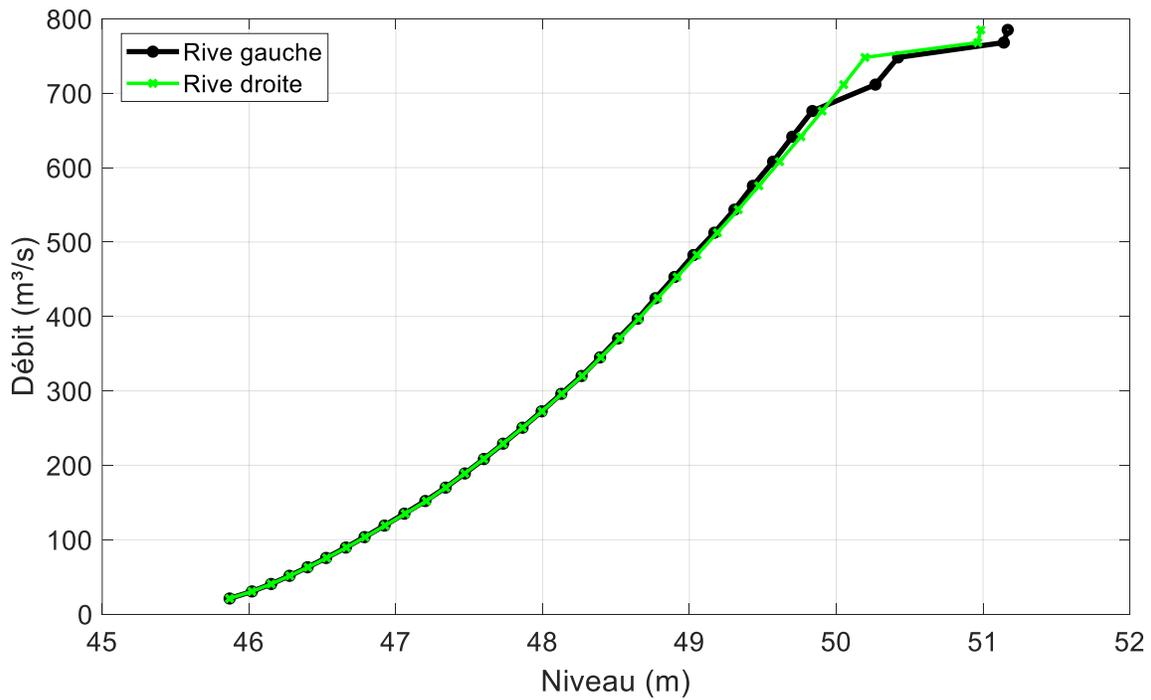


Figure I.6 – Transect à la station Etchemin (023303), points de contact du profil de référence avec les berges en rives droite et gauche le long du transect et données utilisées afin d’estimer les élévations corrigées associées à un débit donné.



(A)



(B)

Figure I.7 – Courbes de tarage issues du modèle hydraulique pour les rives gauche et droite aux stations : A) Aux Sables-061029; B) Etchemin-023303.

## I.2 Étapes de réalisation : modélisation provenant de l'Université de Sherbrooke

Le Tableau I.5 montre les valeurs d'élévations et de débits pour chaque SH. Dans ce tableau, les cases en bleues indiquent les observations provenant de relevés hydrométriques utilisés pour calibrer le MH. Il est important de mentionner que ces relevés hydrométriques sont indépendants des jaugeages réalisés par la DEH. Pour chacune de ces SH, un jaugeage, dont le débit est similaire à l'un des débits du Tableau I.5 a été identifié. Dans le Tableau I.5, les débits retenus et associés à un jaugeage sont identifiés par un astérisque. Les jaugeages retenus sont quant à eux identifiés par des cases bleues dans les Tableaux I.7, I.8 et I.9.

Considérant que le nombre de débits provenant des simulations hydrauliques est relativement faible (Tableau I.5) pour chacune des SH, il est nécessairement plus difficile d'y associer un débit similaire provenant d'un jaugeage récent. Ainsi, pour la station 030208, le jaugeage retenu est le J13 (1<sup>er</sup> novembre 1995) avec un débit de 345.11 m<sup>3</sup>/s. Pour la station 030282, le jaugeage J13 a été retenu (57.71 m<sup>3</sup>/s, 18 avril 1977). Seul le cas de la station 030284 a permis de retenir au jaugeage récent (J104, 475.26 m<sup>3</sup>/s, 4 mai 2018). Il est important de noter que l'association entre les débits provenant des simulations hydrauliques et des jaugeages ne s'applique que sur les débits associés aux relevés hydrométriques ayant servis à calibrer le modèle (cases bleues du Tableau I.5).

L'association entre les débits de jaugeages et ceux provenant des simulations hydrauliques a permis d'estimer l'écart entre l'élévation et le niveau arbitraire des SH (Tableau I.6). Cet écart à par la suite été retenu et rapporté à l'élévation de tous les autres débits simulés du Tableau I.5.

Tableau I. 5 – Débits pour différentes élévations provenant de l'application d'un MH par l'équipe de Mélanie Trudel de l'Université de Sherbrooke. Les entrées en bleues indiquent les relevés hydrométriques utilisés pour la calibration du modèle.

030208			030282			030284		
Élévation (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	PDR	Élévation (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	PDR	Élévation (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	PDR
142.22	343*	< 2	272.39	21	< 2	229.30	80	< 2
143.63	681	< 2	272.73	58*	< 2	230.25	358	< 2
144.69	987	< 2	273.18	123	< 2	230.51	450	3.5
146.11	1502	6.0	273.87	252	2.4	230.56	475*	4.3
146.41	1632	8.7	273.98	280	3.2	230.73	550	9.0
146.59	1721	11.0	274.51	410	23.0	230.94	657	24.7
146.88	1864	16.1	274.82	501	113.8	231.08	736	50.2
			275.04	571	462.0			

Tableau I.6 – Estimation de l'écart entre l'élévation, par rapport au niveau de la mer, et le niveau arbitraire des stations hydrométriques pour des débits simulés et jaugés similaires.

Station	Élévation (m)	Niveau (m)	Écart (m)
030208	142.22	20.79	121.43
030282	272.73	29.57	243.16
030284	230.56	30.66	199.90

Tableau I.7 - Niveaux et débits associés aux jaugeages de la station Saint-François (030208) et dates des jaugeages. Les entrées en bleues indiquent les relevés hydrométriques utilisés pour la calibration du modèle

Numéro	Niveau (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Date (a/m/j)	Numéro	Niveau (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Date (a/m/j)
J1	19.55	135.69	1990-05-07	J20	18.61	20.85	2005-08-29
J2	19.23	90.57	1990-08-28	J21	19.12	73.83	2006-05-15
J3	20.65	360.57	1990-10-30	J22	23.94	1194.45	2011-04-28
J4	19.49	125.74	1991-05-22	J23	18.83	39.15	2011-08-03
J5	18.77	34.41	1991-08-14	J24	21.13	415.44	2011-08-31
J6	19.13	76.74	1991-11-05	J25	19.05	63.18	2011-10-13
J7	20.60	317.66	1994-05-17	J26	18.75	31.31	2012-08-01
J8	20.42	277.60	1994-05-19	J27	18.69	25.80	2012-08-28
J9	18.95	55.05	1994-08-25	J28	19.48	124.00	2012-10-22
J10	18.77	29.11	1994-10-27	J29	24.85	1522.00	2014-04-16
J11	19.38	107.01	1995-05-02	J30	21.80	593.10	2015-04-24
J12	18.97	57.56	1995-08-30	J31	20.24	249.41	2017-05-15
J13	20.79	345.11	1995-11-01	J32	18.48	17.82	2016-08-12
J14	21.65	543.11	1996-04-18	J33	19.71	162.62	2017-06-06
J15	20.72	333.81	1996-05-07	J34	18.92	55.22	2017-07-24
J16	19.26	90.35	1996-08-15	J35	19.31	106.76	2017-10-11
J17	23.71	1256.39	1998-04-02	J36	18.78	43.53	2018-09-13
J18	18.81	38.37	2002-09-17	J37	18.66	32.65	2018-09-14
J19	20.14	230.74	2004-04-13				

Tableau I.8 - Niveaux et débits associés aux jaugeages de la station Au Saumon (030282) et dates des jaugeages. Les entrées en bleues indiquent les relevés hydrométriques utilisés pour la calibration du modèle

Numéro	Niveau (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Date (a/m/j)	Numéro	Niveau (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Date (a/m/j)
J1	29.47	48.05	1975-04-23	J45	29.06	14.49	1992-10-29
J2	29.75	85.81	1975-04-25	J46	28.95	8.57	1993-05-19
J3	29.61	65.21	1975-05-07	J47	29.38	42.33	1994-05-05
J4	28.99	10.79	1975-06-04	J48	28.78	2.74	1994-10-20
J5	28.80	2.40	1975-07-09	J49	28.78	2.81	1994-10-20
J6	28.68	0.92	1975-08-21	J50	29.07	15.06	1995-05-04
J7	28.96	7.93	1975-10-08	J51	29.07	14.80	1995-05-04
J8	29.87	106.29	1976-04-03	J52	28.72	1.76	1995-08-22
J9	29.68	70.86	1976-04-04	J53	28.71	1.67	1995-08-23
J10	29.13	16.59	1976-05-11	J54	29.23	27.43	1995-10-24
J11	29.22	21.10	1976-07-15	J55	29.79	99.40	1996-04-17
J12	28.95	8.01	1976-09-09	J56	29.48	56.27	1996-04-30
J13	29.57	57.71	1977-04-18	J57	28.82	3.20	1996-08-29
J14	29.35	38.30	1978-05-05	J58	29.02	11.21	1996-10-23
J15	28.84	3.72	1978-07-04	J59	29.25	29.10	1997-03-05
J16	28.88	4.95	1978-09-14	J60	28.97	8.46	1997-06-04
J17	28.73	1.39	1979-07-12	J61	28.74	1.52	1997-08-06

Numéro	Niveau (m)	Débit (m³/s)	Date (a/m/j)	Numéro	Niveau (m)	Débit (m³/s)	Date (a/m/j)
J18	28.82	3.25	1980-07-07	J62	28.79	2.54	1998-05-20
J19	29.40	44.63	1980-09-03	J63	28.82	3.80	1998-08-20
J20	29.11	18.14	1980-11-13	J64	28.92	7.03	1999-08-10
J21	28.97	8.89	1981-05-06	J65	28.97	9.60	2000-09-19
J22	28.84	3.71	1981-07-09	J66	29.56	65.57	2001-05-02
J23	30.38	192.67	1979-03-26	J67	28.69	1.35	2001-09-11
J24	28.74	1.83	1982-08-10	J68	30.07	144.37	2002-04-16
J25	29.12	17.88	1983-05-18	J69	28.60	0.54	2002-09-10
J26	28.72	1.59	1983-08-17	J70	30.21	172.40	2004-04-20
J27	28.83	3.84	1983-10-26	J71	30.13	152.96	2007-05-17
J28	29.25	25.63	1984-05-16	J72	30.26	177.13	2009-04-04
J29	29.19	22.63	1985-05-22	J73	30.95	341.27	2011-04-27
J30	29.14	21.26	1986-05-07	J74	29.07	16.23	2008-10-23
J31	28.72	1.57	1986-07-23	J75	28.92	8.12	2011-07-13
J32	29.18	22.59	1986-10-16	J76	28.81	4.38	2011-07-15
J33	28.82	3.82	1987-05-22	J77	29.20	25.59	2011-08-31
J34	28.82	4.19	1987-08-12	J78	29.47	51.60	2011-10-17
J35	28.94	7.72	1988-05-19	J79	28.70	1.72	2012-07-13
J36	29.20	22.19	1989-05-10	J80	28.66	1.28	2012-08-22
J37	29.09	15.69	1989-08-09	J81	28.92	8.94	2012-10-23
J38	28.89	5.84	1989-10-17	J82	28.77	3.19	2016-06-20
J39	29.04	14.51	1990-05-09	J83	28.92	8.17	2016-07-19
J40	28.75	2.01	1990-09-05	J84	29.67	76.09	2017-05-15
J41	29.22	26.90	1990-10-23	J85	29.29	31.32	2017-11-02
J42	28.87	5.31	1991-05-22	J86	28.70	1.76	2017-10-03
J43	28.81	3.68	1992-06-11	J87	30.54	225.98	2018-04-27
J44	28.80	3.40	1992-08-20				

Tableau I.9 - Niveaux et débits associés aux jaugeages de la station Saint-François (030284) et dates des jaugeages. Les entrées en bleues indiquent les relevés hydrométriques utilisés pour la calibration du modèle

Numéro	Niveau (m)	Débit (m³/s)	Date (a/m/j)	Numéro	Niveau (m)	Débit (m³/s)	Date (a/m/j)
J1	29.46	95.21	1979-03-20	J55	29.17	46.74	1992-10-30
J2	30.04	237.52	1979-03-27	J56	28.98	26.41	1993-05-20
J3	29.60	130.23	1979-04-19	J57	29.95	217.75	1994-05-04
J4	29.29	66.37	1979-05-11	J58	29.09	40.20	1995-05-03
J5	29.24	60.29	1979-05-15	J59	30.30	322.04	1996-04-30
J6	28.92	22.71	1979-07-11	J60	29.74	154.68	2009-07-07
J7	29.78	169.05	1980-04-11	J61	30.52	424.00	2011-04-28
J8	29.22	54.29	1980-04-22	J62	29.46	95.21	1979-03-20
J9	28.89	21.38	1980-07-07	J63	30.04	237.52	1979-03-27
J10	29.22	57.10	1980-09-03	J64	29.60	130.23	1979-04-19
J11	29.52	108.18	1980-11-12	J65	29.29	66.37	1979-05-11
J12	29.14	43.43	1981-05-05	J66	29.24	60.29	1979-05-15
J13	29.17	46.53	1981-07-09	J67	28.92	22.71	1979-07-11

Numéro	Niveau (m)	Débit (m³/s)	Date (a/m/j)	Numéro	Niveau (m)	Débit (m³/s)	Date (a/m/j)
J14	29.25	57.95	1982-05-20	J68	29.78	169.05	1980-04-11
J15	29.20	49.66	1983-05-20	J69	29.22	54.29	1980-04-22
J16	29.26	66.12	1984-05-24	J70	28.89	21.38	1980-07-07
J17	29.27	63.31	1985-05-22	J71	29.22	57.10	1980-09-03
J18	29.29	65.56	1986-05-08	J72	29.52	108.18	1980-11-12
J19	29.00	26.47	1987-05-27	J73	29.14	43.43	1981-05-05
J20	28.92	22.60	1987-08-13	J74	29.17	46.53	1981-07-09
J21	28.93	23.25	1988-05-31	J75	29.25	57.95	1982-05-20
J22	29.65	149.56	1989-05-05	J76	29.20	49.66	1983-05-20
J23	29.21	58.56	1990-05-15	J77	29.26	66.12	1984-05-24
J24	29.11	44.34	1990-09-05	J78	29.27	63.31	1985-05-22
J25	28.80	13.12	1992-06-11	J79	29.29	65.56	1986-05-08
J26	28.76	10.22	1992-08-20	J80	29.00	26.47	1987-05-27
J27	29.17	46.74	1992-10-30	J81	28.92	22.60	1987-08-13
J28	29.46	95.21	1979-03-20	J82	28.93	23.25	1988-05-31
J29	30.04	237.52	1979-03-27	J83	29.65	149.56	1989-05-05
J30	29.60	130.23	1979-04-19	J84	29.21	58.56	1990-05-15
J31	29.29	66.37	1979-05-11	J85	29.11	44.34	1990-09-05
J32	29.24	60.29	1979-05-15	J86	30.10	271.20	1990-10-25
J33	28.92	22.71	1979-07-11	J87	29.17	46.74	1992-10-30
J34	29.78	169.05	1980-04-11	J88	28.98	26.41	1993-05-20
J35	29.22	54.29	1980-04-22	J89	29.95	217.75	1994-05-04
J36	28.89	21.38	1980-07-07	J90	29.09	40.20	1995-05-03
J37	29.22	57.10	1980-09-03	J91	30.30	322.04	1996-04-30
J38	29.52	108.18	1980-11-12	J92	29.74	154.68	2009-07-07
J39	29.14	43.43	1981-05-05	J93	30.52	424.00	2011-04-28
J40	29.17	46.53	1981-07-09	J94	28.86	20.19	2011-07-13
J41	29.25	57.95	1982-05-20	J95	28.87	19.90	2011-08-02
J42	29.20	49.66	1983-05-20	J96	28.73	12.38	2012-07-23
J43	29.26	66.12	1984-05-24	J97	28.67	9.44	2012-07-24
J44	29.27	63.31	1985-05-22	J98	28.99	28.74	2014-10-14
J45	29.29	65.56	1986-05-08	J99	29.32	72.71	2016-04-19
J46	29.00	26.47	1987-05-27	J100	28.75	13.10	2016-09-29
J47	28.92	22.60	1987-08-13	J101	28.70	10.33	2017-10-03
J48	28.93	23.25	1988-05-31	J102	29.60	135.00	2017-11-08
J49	29.65	149.56	1989-05-05	J103	30.47	398.71	2018-04-30
J50	29.21	58.56	1990-05-15	J104	30.66	475.26	2018-05-04
J51	29.11	44.34	1990-09-05	J105	30.12	266.59	2018-05-08
J52	30.10	271.20	1990-10-25	J106	29.75	172.55	2018-05-10
J53	28.80	13.12	1992-06-11	J107	29.26	65.11	2018-09-27
J54	28.76	10.22	1992-08-20				

