

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

**CARACTÉRISATION DE L'INFLUENCE DES BARRAGES SUR
LES DÉBITS MESURÉS**

Par

Alain MAILHOT

Guillaume TALBOT

Dikra KHEDHAOUIRIA

Rapport No R1465

Version finale

Mai 2014

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent d'abord remercier MM. William Larouche, Richard Turcotte, Simon Lachance-Cloutier du Centre d'Expertise Hydrique du Québec pour leurs précieux conseils, leurs expertises et leurs disponibilités. Un grand merci également à Mme Julie Lafleur et M. Louis-Guillaume Fortin du Service de la gestion et de l'évaluation de la sécurité de la Direction des barrages publics qui ont généreusement donné de leur temps et ont eu la gentillesse de répondre avec diligence à nos nombreuses questions et requêtes.

Les auteurs sont également reconnaissants à Mmes Julie Garneau et Caroline Brodeur-Doucet, étudiantes en génie des eaux à l'Université Laval, dont les travaux réalisés durant leurs stages respectifs à l'INRS ont contribué à l'avancement de ce projet.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
CHAPITRE 3 : CONSIDÉRATIONS PRÉLIMINAIRES ET APPROCHE RETENUE	9
CHAPITRE 4 : SÉLECTION ET CLASSIFICATION DES STATIONS ET BARRAGES.....	13
4.1. Données disponibles : stations hydrométriques	13
4.2. Données disponibles : barrages	14
4.3. <i>Impounded Runoff Index original (IRI') et Impounded Runoff Index modifié (IRI)</i>	15
4.4. Stations hydrométriques retenues	17
4.4.1. Valeurs nulles du débit.....	17
4.4.2. Rupture dans les séries de débits.....	18
4.4.3. Hydrogrammes en paliers.....	19
4.5. Classification des stations retenues	21
4.5.1. Stations naturelles	22
4.5.2. Stations avec barrages	23
CHAPITRE 5 : STATIONS EN AVAL DE BARRAGES AVEC DATES D'OPÉRATION CONNUES	27
5.1. Analyse du nombre d'opération	27
5.2. Variations des débits quotidiens de jours consécutifs	30
CHAPITRE 6 : CRITÈRES D'INFLUENCE CONSIDÉRÉS	35
6.1. Test d'unimodalité.....	35
6.1.1. Cas particuliers	37
6.1.1.1. <i>Séries trop courtes</i>	37
6.1.1.2. <i>Rupture dans la série des débits journaliers</i>	37
6.1.1.3. <i>Période prolongée avec débit nul</i>	37
6.1.1.4. <i>Précision variable dans la mesure des données</i>	38
6.2. Indices liés aux débits de crue	40
6.2.1. Indice 1 – Moyenne des rapports annuels du débit moyen de crue et du débit sur les autres mois	40
6.2.2. Indice 2 – Rapport du débit moyen en période de crue et du débit moyen des autres mois.....	41

6.2.3. Indice 3 – Moyenne des rapports annuels du débit maximal et du débit moyen de crue	41
6.2.4. Indice 4 – Rapport maximal du débit maximal annuel et du débit moyen de crue.....	42
6.2.5. Indice 5 - Coefficient de variation des débits maxima annuels	42
6.3. Indices liés aux étiages	42
6.3.1. Indice 1 – Moyenne des rapports annuels du débit d'étiage et du débit sur le reste de l'année.....	43
6.3.2. Indice 2 – Rapport du débit moyen en période d'étiage et du débit moyen des autres mois.....	43
6.3.3. Indice 3 – Moyenne des rapports annuels du débit d'étiage 7 jours et du débit moyen en période d'étiage.....	44
6.3.4. Indice 4 – Valeur minimale du rapport annuel du débit d'étiage 7 jours et du débit moyen d'étiage.....	44
6.3.5. Indice 5 - Coefficient de variation des débits minima d'étiage 7 jours	45
6.4. Indice combiné crue-étiage	45
6.5. Indice coefficient de variation	46
6.6. Indice coefficient de corrélation	46
CHAPITRE 7 : ÉTABLISSEMENT DES CRITÈRES D'INFLUENCE À PARTIR DES GROUPES DES STATIONS NATURELLES ET 'UNE STATION EN AVAL D'UN BARRAGE'	49
7.1. Considérations préliminaires : stations à l'exutoire de lacs.....	50
7.2. Classification en fonction des latitudes et des superficies des bassins versants amonts	50
7.3. Test d'unimodalité.....	52
7.4. Indice de crue	55
7.5. Indice d'étiage	57
7.6. Indice crue-étiage.....	58
7.7. Indice coefficient de variation.....	60
7.8. Indice coefficient de corrélation	60
7.9. Valeurs représentatives des indices en régime naturel d'écoulement	67
7.10. Synthèse des résultats pour le groupe 'une station en aval d'un barrage'	71
CHAPITRE 8 : APPLICATION AUX GROUPES 'PLUSIEURS STATIONS EN AVAL D'UN BARRAGE' ET 'CONFIGURATIONS MIXTES STATIONS/BARRAGES'.....	83
8.1. Groupe 'plusieurs stations en aval d'un barrage'	83
8.2. Groupe 'configurations mixtes stations/barrages'	87

CHAPITRE 9 : APPLICATION AUX STATIONS AVEC DÉBITS MESURÉS AVANT ET APRÈS CONSTRUCTION DU BARRAGE.....	107
9.1. Liste des stations avec mesures de débits avant et après construction d'un barrage.....	107
9.2. Examen préliminaire des séries de débits disponibles.....	109
9.3. Comparaison des critères d'influence des périodes avant et après construction des barrages	110
9.4. Conclusion.....	112
CHAPITRE 10 : ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES BARRAGES EN FONCTION DE LEURS CARACTÉRISTIQUES ET DE LA PHYSIOGRAPHIE DES BASSINS.....	113
10.1. Relation entre influence des barrages et IRI.....	113
10.2. Relation entre influence des barrages, IRI et type de vannes.....	119
CHAPITRE 11 : PROCÉDURE PROPOSÉE POUR L'ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES BARRAGES.....	123
11.1. Évaluation de l'influence à partir des séries de débits.....	123
11.2. Évaluation de l'influence à partir des caractéristiques du barrage et du bassin.....	125
CHAPITRE 12 : CONCLUSION	129
CHAPITRE 13 : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	135
ANNEXE A - LISTE DES STATIONS NON RETENUES	139
ANNEXE B - LISTE DES STATIONS NATURELLES RETENUES.....	141
ANNEXE C - GROUPE 'UNE STATION EN AVAL D'UN BARRAGE'	147
ANNEXE D - GROUPE 'PLUSIEURS STATIONS EN AVAL D'UN BARRAGE'	153
ANNEXE E - GROUPE 'CONFIGURATIONS MIXTES STATIONS/BARRAGES'	155
ANNEXE F - 'CONFIGURATION MIXTE STATIONS/BARRAGES' DE LA RIVIÈRE YAMASKA.....	159
ANNEXE G - 'CONFIGURATION MIXTES STATIONS/BARRAGES' DE LA RIVIÈRE DU NORD	161

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Liste des usages des barrages selon les classifications du <i>National Atlas of the United States</i> (États-Unis) et du Québec et symboles utilisés dans le cadre de la présente étude.	15
Tableau 5.1 Liste des barrages dont les dates d'opération sont connues et des stations situées en aval de ces barrages.....	28
Tableau 6.1 Précision du débit archivé en fonction de la fourchette de débit mesuré pour les stations du Québec.	38
Tableau 6.2 Précision du débit archivé en fonction de la fourchette de débit mesuré pour les stations des États-Unis.	38
Tableau 7.1 Nombre de stations pour les différentes classes de latitude et de superficie pour les stations naturelles et les différentes configurations stations/barrages. Les classes en gris sont celles considérées dans la suite de l'étude.....	52
Tableau 7.2 Liste des stations en aval d'un barrage dont les distributions des débits quotidiens, hebdomadaires ou mensuels sont non-unimodales (test d'unimodalité avec p-value < 0,05; les p-value en gras indiquent une distribution non-unimodale au seuil 95 %).	55
Tableau 7.3 Valeurs minimales et maximales des fourchettes de valeurs pour les débits quotidiens aux stations en régime naturel d'écoulement pour les différentes classes de latitude et de superficie. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N ; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N ; L4 : [48,50[°N ; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km ² ; S2 : [1000, 4000[km ² ; S3 : ≥ 4000 km ² . Les fourchettes des valeurs pour les indices calculés à partir des débits quotidiens, hebdomadaires et mensuels sont les mêmes pour les indices de crue, d'étiage et de crue-étiage.	68

Tableau 7.4 Valeurs minimales et maximales des fourchettes de valeurs pour les débits hebdomadaires aux stations en régime naturel d'écoulement pour les différentes classes de latitude et de superficie. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N ; L4 : [48,50[°N ; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km². Les fourchettes des valeurs pour les indices calculés à partir des débits quotidiens, hebdomadaires et mensuels sont les mêmes pour les indices de crue, d'étiage et de crue-étiage (voir Tableau 7.3).....68

Tableau 7.5 Valeurs minimales et maximales des fourchettes de valeurs pour les débits mensuels aux stations en régime naturel d'écoulement pour les différentes classes de latitude et de superficie. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N; L4 : [48,50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km². Les fourchettes des valeurs pour les indices calculés à partir des débits quotidiens, hebdomadaires et mensuels sont les mêmes pour les indices de crue, d'étiage et de crue-étiage (voir Tableau 7.3).....69

Tableau 7.6 Tableau comparatif des différents indices du groupe de stations 'une station en aval d'un barrage' (débits quotidiens). Les zones en gris indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N; L4 : [48,50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².74

Tableau 7.7 Tableau comparatif des différents indices du groupe de stations 'une station en aval d'un barrage' (débits hebdomadaires). Les zones en

gris indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44[°N; L2 : [44, 46[°N; L3 : [46, 48[°N; L4 : [48, 50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km². 76

Tableau 7.8 Tableau comparatif des différents indices du groupe de stations 'une station en aval d'un barrage' (débits mensuels). Les zones en gris indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44[°N; L2 : [44, 46[°N; L3 : [46, 48[°N; L4 : [48, 50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km². 78

Tableau 7.9 Tableau comparatif des résultats aux différentes stations pour les différentes échelles temporelles. Les zones en gris indiquent des stations influencées pour l'échelle temporelle considérée. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44[°N; L2 : [44, 46[°N; L3 : [46, 48[°N; L4 : [48, 50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km². Les stations de chaque groupe latitude-superficie sont ordonnées par ordre croissant des valeurs d'IRI. 80

Tableau 8.1 Tableau comparatif des différents indices du groupe 'plusieurs stations en aval d'un barrage' (débits quotidiens). Les zones en gris indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les stations classées influencées sont en gris. Les classes latitude-superficie en gras

correspondent aux classes pour lesquelles il n'a pas été possible de définir des fourchettes de valeurs en régime naturel.....84

Tableau 8.2 Tableau comparatif des différents indices du groupe 'plusieurs stations en aval d'un barrage' (débits hebdomadaires). Les zones en gris indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les stations classées influencées sont en gris. Les classes latitude-superficie en gras correspondent aux classes pour lesquelles il n'a pas été possible de définir des fourchettes en régime naturel.85

Tableau 8.3 Tableau comparatif des différents indices du groupe 'plusieurs stations en aval d'un barrage' (débits mensuels). Les zones en gris indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les stations classées influencées sont en gris. Les classes latitude-superficie en gras correspondent aux classes pour lesquelles il n'a pas été possible de définir des fourchettes de valeurs en régime naturel.....86

Tableau 8.4 Tableau comparatif des différents indices du groupe de configurations mixtes stations/barrages (débits quotidiens). Les lignes consécutives en gris ou en blanc correspondent à une séquence de stations et de barrages. Les séquences stations/barrages sont ordonnées depuis l'amont vers l'aval. Les valeurs des critères d'influence en gras indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les stations classées influencées sont en gras. Les classes latitude-superficie en gras correspondent aux classes pour lesquelles il n'a pas été possible de définir des fourchettes de valeurs en régime naturel.....91

Tableau 8.5 Tableau comparatif des différents indices du groupe de configurations mixtes stations/barrages (débits hebdomadaires). Les lignes consécutives en gris ou en blanc correspondent à une séquence de stations et de barrages. Les séquences stations/barrages sont ordonnées depuis l'amont vers l'aval. Les valeurs des critères d'influence en gras indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les stations classées influencées sont en gras. Les classes latitude-superficie en gras correspondent aux classes pour lesquelles il n'a pas été possible de définir des fourchettes de valeurs en régime naturel.....96

Tableau 8.6 Tableau comparatif des différents indices du groupe de configurations mixtes stations/barrages (débits mensuels). Les lignes consécutives en gris ou en blanc correspondent à une séquence de stations et de barrages. Les séquences stations/barrages sont ordonnées depuis l'amont vers l'aval. Les valeurs des critères d'influence en gras indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les stations classées influencées sont en gras. Les classes latitude-superficie en gras correspondent aux classes pour lesquelles il n'a pas été possible de définir des fourchettes de valeurs en régime naturel..... 101

Tableau 9.1 Liste et caractéristiques des stations pour lesquelles les débits mesurés couvrent les périodes avant et après la construction du barrage en amont (les stations en gris sont celles qui n'ont pas été retenues pour la suite de l'analyse; voir Section 9.2). 108

Tableau 9.2 Liste des stations non retenues pour fin d'analyse. 109

Tableau 9.3 Tableau comparatif des différents critères avant et après construction des barrages aux sept stations retenues pour les débits quotidiens.

Les cellules en gris indiquent des valeurs suggérant une influence de l'opération du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N; L4 : [48,50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000,4000[km²; S3 : ≥ 4000 km². Les classes de latitude-superficie en gras correspondent aux classes pour lesquelles les fourchettes de valeurs en régime naturel n'ont pu être établies. Pour une station donnée, la première ligne des critères (6 colonnes de droite) correspond aux valeurs pour la période avant construction du barrage alors que la deuxième ligne correspond aux valeurs pour la période après construction du barrage..... 111

Tableau 10.1 Liste des stations et des barrages associés dont les caractéristiques relatives aux vannes et déversoirs (types et nombre) sont connues. Les types de vannes et déversoirs sont décrits au Tableau 10.2..... 120

Tableau 10.2 Types de vannes et déversoirs. 121

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1 Exemple d'hydrogramme comportant une longue période de débit nul (station 1027200, North Branch Penobscot River near Pittston Farm, Maine).....	18
Figure 4.2 Exemple d'hydrogramme des débits quotidiens comportant une rupture (périodes antérieure et postérieure à 1970) dans les débits minimums et maximums (station 1077000, Squam River at Ashland, New-Hampshire). À noter que le barrage en amont de cette station (6808, Squam Lake) a été construit en 1856.....	19
Figure 4.3 Exemple d'hydrogramme en paliers à la station Matawin (Québec; station 050119) : a) pour la période 1935-1940; b) pour la période 1965-1970 qui ne présente pas de structures en paliers apparentes. À noter que le bassin en amont de cette station ne comporte aucun barrage.	20
Figure 4.4 Années d'opération pour l'ensemble des stations retenues (le rang en ordonnées a été établi en fonction de l'année de mise en opération des stations).	21
Figure 4.5 Histogramme du nombre d'années d'opération valides pour les stations retenues.....	22
Figure 4.6 Localisation des stations dites naturelles.....	23
Figure 4.7 Carte des stations/barrages du groupe 'une station en aval d'un barrage' (36 couples station/barrage).....	24
Figure 4.8 Carte des stations/barrages du groupe 'plusieurs stations en aval d'un barrage' (7 ensembles stations/barrage).....	25
Figure 4.9 Carte des stations/barrages du groupe 'configurations mixtes stations/barrages' (13 configurations).....	25

Figure 5.1 Box plots du nombre d'opérations par mois aux différents barrages dont les dates d'opérations sont connues.	29
Figure 5.2 Histogrammes des fractions de jours où les barrages sont opérés par classes de valeurs de débits aux stations situées les plus près des barrages.....	32
Figure 6.1 Histogramme des débits quotidiens pour la station 30309 directement en aval du barrage Choinière (Québec). Les lignes rouges pointillées montrent les deux modes.	36
Figure 6.2 Exemple fictif de fonction de répartition des débits quotidiens à une station naturelle dont la précision est de 0,1 m ³ /s pour des débits entre 40 et 100 m ³ /s, puis de 1 m ³ /s pour les débits supérieurs à 100 m ³ /s.....	39
Figure 7.1 Superficies des bassins versant aux stations hydrométriques sous étude en fonction de la latitude.....	51
Figure 7.2 Histogrammes des débits journaliers (distributions non-unimodales) des stations naturelles : (a) Mistassini (062111; 49,32°N, -72,64°E; 4480 km ²); (b) Mégiscane (080717; 48,37°N, -77,12°E; 8310 km ²); et (c) Waswanipi (080718; 49,86°N, -77,19°E; 31964 km ²).....	54
Figure 7.3 Fonctions de répartition (F) de l'indice de crue (I_{C2}) (quotidien, hebdomadaire et mensuel) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-superficie. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits quotidiens sont non-unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits quotidiens unimodales.	56

Figure 7.4 Fonctions de répartition (F) de l'indice d'étiage (I_{E2}) (quotidien, hebdomadaire et mensuel) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-superficie. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits quotidiens sont non-unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits quotidiens unimodales.58

Figure 7.5 Fonctions de répartition (F) de l'indice combiné crue-étiage (I_C) (quotidien, hebdomadaire et mensuel) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-superficie. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits quotidiens sont non-unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits quotidiens unimodales.59

Figure 7.6 Fonctions de répartition (F) de l'indice coefficient de variation (I_{CV}) (quotidien) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-superficie. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits quotidiens sont non-unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits quotidiens unimodales.61

Figure 7.7 Fonctions de répartition (F) de l'indice coefficient de variation (I_{CV}) (hebdomadaire) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-superficie. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits hebdomadaires sont unimodales

alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits hebdomadaires non-unimodales.....62

Figure 7.8 Fonctions de répartition (F) de l'indice coefficient de variation (I_{CV}) (mensuel) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-superficie. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits mensuels sont unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits mensuels non-unimodales.....63

Figure 7.9 Fonctions de répartition (F) de l'indice coefficient de corrélation (I_{ρ}) (quotidien) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-superficie. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits quotidiens sont unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits quotidiens non-unimodales.....64

Figure 7.10 Fonctions de répartition (F) de l'indice coefficient de corrélation (I_{ρ}) (hebdomadaire) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-superficie. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits hebdomadaires sont non-unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits hebdomadaires unimodales.....65

Figure 7.11 Fonctions de répartition (F) de l'indice coefficient de corrélation (I_{ρ}) (mensuel) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une

station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-superficie. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits mensuels sont non-unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits mensuels unimodales. 66

Figure 7.12 Fourchettes des valeurs des indices en régime naturel à l'échelle quotidienne pour les différentes classes de latitude-superficie. 70

Figure 7.13 Fourchettes des valeurs des indices coefficient de variation et de corrélation en régime naturel aux échelles (a) hebdomadaires et (b) mensuelles pour les différentes classes de latitude-superficie. 71

Figure 10.1 Rapport des superficies en amont des barrages et des stations en fonction de l'IRI et du type d'utilisation du barrage, pour les stations des catégories une station en aval d'un barrage, plusieurs stations en aval d'un barrage et configurations mixtes stations/barrages, ces derniers étant identifiés par le terme 'mixte' dans la légende (débits quotidiens). Les symboles en bleu correspondent aux stations influencées alors que les symboles blancs aux stations non influencées. Les stations de toutes les classes superficie-latitude sont considérées. Une séparation verticale a été imposée afin d'éviter une superposition des stations. Les cas identifiés par des nombres sont discutés dans le texte. 114

Figure 11.1 Régression linéaire (tirets rouges) entre le volume annuel médian et la superficie du bassin en amont. Les points correspondent aux valeurs des stations naturelles ($R^2 = 0,998$)..... 127

Figure 11.2 Diagramme des zones d'influence en fonction des valeurs d'IRI. Les carrés correspondent aux valeurs des stations en aval de barrages considérés dans cette étude (bleus pour les stations influencées et blancs pour les stations non influencées). 127

Figure F.1 Schéma de la configuration mixte stations/barrages de la rivière
Yamaska..... 160

Figure G.1 Schématisation de la configuration mixte stations/barrages de la rivière
du Nord..... 162

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CERIU	Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines
IHA	<i>Indicators of Hydrologic Alteration</i>
IRI	<i>Impounded Runoff Index</i>
MAF	<i>Medium Annual Flow</i>
MAMROT	Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire
MDDEFP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (anciennement MDDEP)
MRCC	Modèle régional canadien du climat
USGS	United States Geological Survey

CHAPITRE 1 :INTRODUCTION

Le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) est responsable de l'exploitation des stations hydrométriques au Québec. Les mesures effectuées à ces stations sont, dans de nombreux cas, affectées par la présence d'ouvrages hydrauliques (barrages) situés en amont de ces stations. La construction de ces ouvrages a un impact hydrologique majeur et peut entraîner, par exemple, une réduction des débits de crue ou une modification de la variabilité interannuelle des débits (FitzHugh et Vogel 2011; Magilligan et Nislow 2005) en plus d'avoir des impacts géomorphologiques majeurs et modifier les écosystèmes aquatiques (pour une description de ces impacts voir Poff et Hart 2002).

L'influence des barrages sur le régime d'écoulement peut se subdiviser en deux types. Le premier résulte de la construction du barrage et s'intéresse à déterminer comment la construction de cet ouvrage a modifié les patrons d'écoulement en aval par rapport à la situation « naturelle », *i.e.* avant construction du barrage. Le second type s'intéresse plus spécifiquement aux impacts liés à l'opération des barrages et cherche donc à comprendre comment ces opérations modifient les écoulements par rapport à une situation où le barrage n'est pas opéré.

L'influence des barrages sur le régime d'écoulement désignera, dans ce rapport, la différence entre les régimes d'écoulement naturelles et en présence d'un barrage et considèrera donc les effets combinés sur le régime d'écoulement de la présence du barrage et de son opération. L'influence réfère donc aux modifications du régime d'écoulement qui peuvent modifier les régimes hydrologiques à court terme (*e.g.* sur une base journalière ou saisonnière) aux stations hydrométriques. Cette influence pourra dépendre du régime d'écoulement (*e.g.* crue estivale, printanière, étiage), de l'échelle temporelle considérée (*e.g.* moyenne annuelle, saisonnière, maxima annuel) mais aussi des objectifs de gestion et des caractéristiques physiques du barrage (p. ex. capacité de stockage, types de vannes). Une référence explicite aux conséquences de la gestion et de l'opération des barrages sera faite lorsque nécessaire.

La caractérisation de l'influence est utile, par exemple, dans un contexte d'utilisation des séries mesurées sur des bassins non jaugés. De même, la mise en place de nouvelles stations sur des bassins pourra bénéficier de l'information issue de la présente analyse

puisqu'elle permettra une identification préliminaire des sites de jaugeage potentiels non influencés par les ouvrages. Enfin, une meilleure connaissance de cette influence des barrages permettra de mieux évaluer l'impact des changements climatiques sur le régime hydrique naturel des cours d'eau à travers la séparation des effets anthropiques (liés à la présence des barrages) de ceux attribuables au climat. Par le fait même, cela permettra également d'améliorer la validation et le traitement des données hydrométriques aux stations influencées par des barrages et d'assurer une meilleure caractérisation de cette influence dans les données diffusées sur Internet par le CEHQ.

Le projet, dont le présent rapport décrit les travaux, entend donc développer une procédure permettant de caractériser le niveau et la nature de l'influence des ouvrages de retenue sur les débits mesurés aux stations hydrométriques. Cette influence se traduira par la définition d'un ou plusieurs critères fonctions du régime d'écoulement et de l'échelle temporelle considérée. Les sous-objectifs du projet, tels que définis dans le mandat initial, sont les suivants :

- Définir et estimer des indices caractérisant le niveau d'influence de l'opération des barrages pour divers régimes d'écoulement et diverses échelles temporelles pour diverses configurations barrage/station;
- Définir une procédure permettant d'estimer ces indices à des sites barrages/stations pour lesquels nous disposons : a) de données physiographiques et de séries de débits observés et simulés; b) uniquement de données physiographiques.

Il est très important de mentionner que le mandat initial faisait explicitement référence à l'influence de l'opération du barrage sur les régimes d'écoulement et visait donc la définition d'indices susceptibles de discerner ce type d'influence de l'influence globale que peut avoir la présence des barrages sur les régimes d'écoulement. Les analyses réalisées ont cependant montré qu'il est très difficile de discerner exclusivement l'effet de l'opération des barrages (ce point est discuté en détails au Chapitre 3). L'approche proposée permet donc d'évaluer l'influence globale du barrage sur les débits aux stations.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE

La plupart des études publiées à ce jour ont cherché à déterminer la nature et l'ampleur des impacts hydrologiques des barrages. On peut identifier trois principales approches pour caractériser ces impacts (Assani *et al.* 2005; Assani *et al.* 2006) : 1) la comparaison des débits à une station donnée avant et après construction du barrage (*monitoring station method*; Magilligan et Nislow 2005); 2) la comparaison des débits en amont et en aval d'un barrage ou encore avec une station de référence sur un autre bassin aux caractéristiques similaires (*control station method*; Graf 2006); et 3) la méthode de reconstitution des débits naturels (p. ex. à l'aide d'un modèle hydrologique; *reconstitution method*). Une autre approche, proposée par Assani *et al.* (2006), consiste à comparer les valeurs des caractéristiques hydrologiques des stations sous étude (p. ex. débit annuel moyen, débit mensuel moyen) à celles issues de stations naturelles, c'est-à-dire qui ne se trouvent pas en aval de barrages, valeurs estimées à partir de régression statistique (p. ex. en fonction de la surface de bassin).

La méthode basée sur la comparaison des débits à une station donnée avant et après construction du barrage (*pre- and post-dam conditions*) demeure la plus utilisée. Plusieurs analyses à grande échelle ont ainsi été réalisées aux États-Unis (Magilligan et Nislow 2005; Graf 2006; Poff *et al.* 2006). Les indices utilisés s'inspirent très largement de ceux initialement proposés par Richter *et al.* (1996) et repris par The Nature Conservancy (2006). Ces indices, au nombre de 32 et désignés sous le nom général de *Indicators of Hydrologic Alteration* (IHA), se divisent en cinq catégories selon qu'ils cherchent à quantifier : i) l'amplitude des changements; ii) l'amplitude et la durée des débits extrêmes annuels; iii) les périodes d'occurrence des conditions extrêmes; iv) la durée et la fréquence des conditions hydrologiques spécifiques (débits inférieurs et supérieurs au 25^e et 75^e percentile); v) l'amplitude des changements dans les conditions d'écoulement (Richter *et al.* 1996; Magilligan et Nislow 2005). D'autres indicateurs ont également été proposés pour caractériser l'influence des barrages sur la réponse hydrologique (voir p. ex. Gao *et al.* 2009; Schmidt et Wilcock 2008).

Graf (2006), après analyse de tronçons en aval de très grands barrages (capacité de plus de $1,2 \times 10^9 \text{ m}^3$) aux États-Unis, a montré que ces derniers ont un impact marqué sur les débits maximaux annuels (réduction moyenne de 67 %), le ratio entre les débits

maximaux annuels et les débits moyens (réduction moyenne de 60 %), l'étendue des débits journaliers (réduction moyenne de 64 %), le nombre d'inversion des taux de variations de débits (*discharge reversals*; hausse moyenne de 34 %).

Poff *et al.* (2006) concluent que la mise en place des barrages sur de petits bassins versants (< 282 km²) conduit à une réduction des débits maximaux annuels, une hausse des débits d'étiage et une diminution de la variabilité des débits.

Magilligan et Nislow (2005) ont quant à eux évalué les IHA à 21 stations disséminées sur le territoire des États-Unis disposant de séries de débits journaliers couvrant une période d'au moins 30 ans avant et après la construction de barrage. Ils ont montré que les barrages avaient un impact important sur l'ensemble des caractéristiques hydrologiques mesurées par les IHA, les indices associés aux débits minima et maxima étant les plus affectés. À l'échelle mensuelle, les débits moyens des mois d'avril et de mai tendent à diminuer alors que ceux des mois d'août et de septembre tendent à augmenter.

Plus récemment, Fitzhugh et Vogel (2011) ont développé une approche basée sur le développement de modèles de régression régional d'estimation de la médiane des maxima annuels sur 10 ans des débits journaliers (MAF, *Medium Annual Flow*) en fonction des caractéristiques des bassins versants, de la capacité de stockage des barrages et de la densité de la population (proxy de l'imperméabilisation du territoire). L'impact des barrages sur l'indice retenu a été évalué en fixant la capacité de stockage à zéro. Cette approche a été appliquée à quelques 4 859 stations du *United States Geological Survey* (USGS) disséminées sur l'ensemble des États-Unis découpés pour l'occasion en 209 unités hydrologiques. Ces auteurs ont montré que l'amplitude des impacts des barrages sur les régimes hydrologiques croît en fonction de la taille des bassins. De plus, le niveau de réduction du MAF atteint, pour l'ensemble du territoire des États-Unis, 29 % pour les grandes rivières, 15 % pour les rivières moyennes et 7 % pour les petites rivières. De même, le pourcentage de rivières ayant subi une réduction de plus de 25 % du MAF est de 55 % pour les grandes rivières, 25 % pour les rivières moyennes et 10 % pour les petites rivières.

La grande majorité des études antérieures ne fait aucune distinction entre les impacts associés à la présence des barrages (*i.e.* les impacts résultant de la mise en place des barrages) et ceux associés à l'opération de ces derniers. Plusieurs auteurs réfèrent indistinctement à l'un et à l'autre de ces impacts et les études comparant les régimes hydrologiques avant et après construction du barrage (*monitoring station method*) ne permettent pas de distinguer ces effets, pas plus que les méthodes comparant les débits en amont et en aval des barrages (*control station method*).

À notre connaissance, deux articles s'intéressent plus spécifiquement à cet aspect. Le premier, White *et al.* (2005), utilise l'analyse par ondelettes (*wavelet analysis*) pour investiguer les effets hydrologiques de l'opération du barrage Glen Canyon sur la rivière Colorado (États-Unis) en condition avant et après construction du barrage. Des débits journaliers et horaires ont été considérés dans cette étude. L'analyse des séries journalières de débit a permis à ces auteurs de montrer l'influence du barrage sur les conditions d'écoulement par rapport à celles prévalant avant la construction du barrage. Par ailleurs, l'analyse des séries horaires de débits après construction du barrage leur a permis de mettre en évidence des cycles d'opération du barrage (destiné à la production hydro-électrique). Bien que ces auteurs affirment que l'analyse par ondelette peut être utilisée pour caractériser les opérations d'autres barrages, ils indiquent que cette caractérisation ne saurait être complète et précise sans accès à une série de débit de résolution temporelle beaucoup plus petite que la journée (p. ex. débit horaire).

Le second article faisant explicitement mention à l'impact de l'opération des barrages est celui de Zimmerman *et al.* (2010). Ces auteurs ont développé une approche permettant d'évaluer les impacts de l'opération des barrages sur les variations des débits horaires pour le bassin de la rivière Connecticut (États-Unis). La comparaison a été effectuée dans ce cas entre stations tout juste en aval de barrages opérés par le *US Army Corps of Engineers* (certains barrages étant destinés à la production hydroélectrique, d'autres au contrôle des crues) et des stations préalablement identifiées comme les moins influencées par l'opération des barrages ou encore sans ouvrage de contrôle en aval. Quatre indices mesurant la variabilité infra-quotidienne des débits ont été utilisés. Les valeurs obtenues aux stations en régime naturel d'écoulement sont ensuite comparées aux valeurs obtenues pour les stations en aval de barrage. Cette étude a permis de montrer que l'impact le plus significatif des barrages se situait au niveau du nombre de

jours où la variabilité naturelle (défini par les stations soumis à des régimes naturels d'écoulement) était dépassée et non dans l'amplitude de ce dépassement. Si les changements les plus importants des patrons infra-quotidiens de débits sont observés aux stations en aval de barrages hydroélectriques répondant aux demandes de pointe (*peaking hydropower dam*), des modifications ont également été observées pour certaines stations en aval de barrages hydroélectriques au fil de l'eau (*run-of-water hydropower dam*), de même que pour certaines stations en aval de barrages destinés aux contrôles des crues (*flood-control dam*). Plusieurs stations en aval de ces deux derniers types de barrages ont toutefois des indices compris dans la gamme des valeurs des stations naturelles. Ces auteurs mentionnent finalement que les séries journalières de débits ne permettent pas de caractériser adéquatement la variabilité infra-quotidienne des débits et que, conséquemment, ces séries ne permettent pas de détecter et de caractériser l'impact de l'opération des barrages sur les débits.

Concernant plus spécifiquement le Québec, Assani *et al.* (2006, 2010, 2011), Lajoie *et al.* (2007) et Matteau *et al.* (2009) se sont intéressés à la caractérisation des régimes d'écoulement en présence de barrages. L'objectif principal de l'ensemble de ces travaux était de caractériser les impacts de la présence des barrages sur les régimes naturels d'écoulement à différentes échelles temporelles (p. ex. mensuelles dans Lajoie *et al.*, 2007). Certaines analyses de ces auteurs reposent sur une classification préalable des écoulements en régime artificialisé (*i.e.* en aval d'un barrage), classification obtenue à la suite d'une analyse en composantes principales des débits mensuels et saisonniers. Ces auteurs identifient trois régimes hydrologiques, à savoir (Assani *et al.* 2005) : 1) le régime d'inversion caractérisé par une baisse significative de la fréquence d'occurrence des débits minima annuels en été (juillet à septembre), d'une hausse très significative d'occurrence des débits minima annuels au printemps (avril à juin) au moment de la fonte de neiges et d'une occurrence des débits maxima mensuels en hiver; 2) le régime d'homogénéisation marqué par des débits mensuels très similaires tout au long de l'année; et 3) le régime dit naturel qui, outre un patron annuel des débits similaire au régime naturel, se caractérise par une hausse de la fréquence des débits minimums annuels pendant les mois de novembre à janvier. Cette classification des régimes d'écoulement « artificialisés » (*i.e.* en présence d'un barrage) revient à classer ces

régimes en fonction du mode de gestion des barrages, chaque mode de gestion se traduisant par une typologie particulière d'écoulement (Matteau *et al.* 2009).

Gross et Moglen (2007) ont établi une relation entre la distance d'influence des ouvrages hydrauliques sur les débits maxima annuels et les caractéristiques des bassins (p. ex. la pente, le volume du réservoir, la surface drainée par l'ouvrage). Ces relations (régressions) ont ensuite été utilisées afin d'identifier les stations du Maryland (États-Unis) qui ne subissent pas l'influence des barrages et qui peuvent donc être considérées pour une analyse fréquentielle régionale des débits de crues.

Singer (2007) pour sa part, a réalisé une analyse détaillée de l'impact des barrages sur le bassin de la rivière Sacramento (Californie, États-Unis). Ces barrages ont divers usages et sont opérés en fonction d'un ou plusieurs objectifs (production hydroélectrique, approvisionnement en eau, contrôle des crues et activités récréatives). Son étude visait plus spécifiquement à déterminer l'influence des barrages sur différentes caractéristiques des hydrogrammes (débits de crue, débit minimal annuel, volume de crue annuel, durée de montée des crues, durée des récessions et durée entre les crues). Ce travail avait également pour objectif de voir comment l'influence des barrages s'amenuisait en fonction de la distance. Les séries des débits quotidiens mesurés aux stations en aval de barrages majeurs sont subdivisées en deux séries, selon que ces débits ont été mesurés avant ou après la construction du barrage. Ces séries ont permis de construire les courbes de probabilités empiriques des six caractéristiques des hydrogrammes définis plus haut. Cet auteur conclut que l'influence de l'opération des barrages dépend beaucoup de l'indice de rétention du ruissellement (*Impounded Runoff Index*, IRI; Battala *et al.* 2004), défini comme le ratio entre la capacité du réservoir et le volume médian annuel de ruissellement. Ainsi les barrages avec un grand indice IRI réduisent généralement les débits de pointe, la durée de montée des crues, la durée des récessions et le volume annuel de crue. Les barrages avec un faible indice IRI ne disposent pas d'une capacité de stockage suffisante pour contenir le volume de crue de sorte que la durée totale de la période de crue est augmentée (début des crues devancé et fin des crues retardé). Globalement, cet auteur note que l'influence des barrages est largement tributaire des règles et des objectifs de gestion et que l'indice IRI est un excellent indicateur de l'impact des barrages sur les régimes d'écoulement dans le cas des barrages visant le contrôle des crues.

CHAPITRE 3 : CONSIDÉRATIONS PRÉLIMINAIRES ET APPROCHE RETENUE

La revue de littérature précédente a permis de montrer que si l'évaluation de l'influence de la construction des barrages sur le régime d'écoulement peut être déterminée à partir de différents indices hydrologiques, la caractérisation de l'influence de l'opération des barrages par rapport à une situation sans opération demeure plus difficile. En effet, considérant que la mise en place du barrage lui-même perturbe sensiblement les régimes d'écoulement par rapport à la situation naturelle, l'influence de l'opération du barrage doit être mesurée par rapport à ce régime « perturbé ». Dans plusieurs cas, il sera donc difficile de discerner l'impact de la présence du barrage de celle de l'opération et les études répertoriées considèrent indistinctement ces deux effets.

Idéalement, l'évaluation de l'impact de l'opération des barrages sur les régimes hydrologiques devrait se faire en comparant la situation avec opération et la situation sans opération. Pour ce faire, il faudrait disposer de période distincte où le barrage a été opéré et de période où il n'a pas été opéré (un peu à l'image des conditions avant et après construction des barrages) ou encore de disposer de la chronologie précise des dates d'opération du barrage afin de voir *in fine* comment l'opération altère le régime hydrologique en aval.

Plusieurs facteurs sont susceptibles de déterminer le niveau d'influence de l'opération d'un barrage sur une station en aval. Ces facteurs sont :

- Caractéristiques du barrage : volume de retenu, types de vannes, nombre de vannes.
- Modes de gestion et règles d'opérations du barrage : usages du barrage (hydroélectrique, contrôle de crue, villégiature, etc.), fréquence des opérations, amplitude des variations des débits évacués par rapport au débit en rivière, période de l'année où le barrage est opéré, règles de gestion du barrage.
- Configurations station/barrage : superficie du bassin versant en amont de la station versus superficie du bassin versant en amont du barrage, distance entre le barrage et la station, présence d'autres barrages sur des affluents, présence d'autres barrages en amont du premier barrage.

Par ailleurs, plusieurs variables/caractéristiques hydrologiques sont susceptibles d'être modifiées par l'opération des barrages. Évidemment les variables les plus influencées seront celles directement visées par les objectifs de gestion du barrage. Ainsi un barrage dont l'objectif est le contrôle des crues devrait, par rapport à une situation équivalente naturelle, entraîner une réduction des débits de crue en aval. De même, une station en aval d'un barrage dont l'objectif est le soutien des étiages, devrait voir ses étiages moins prononcés.

Ces modifications, par rapport à la situation d'écoulement naturel, peuvent également résulter de la seule présence du barrage. La variable hydrologique idéale serait donc celle qui, en comparaison avec les régimes naturels d'écoulement (c'est-à-dire en l'absence du barrage), ne serait influencée que par l'opération des barrages et pas ou peu influencée par la mise en place du barrage. Une variable hydrologique dont la modification porterait la signature unique de l'opération du barrage. L'identification d'une telle variable reste toutefois difficile à établir.

L'approche retenue s'appuie d'abord sur les séries de débits moyens quotidiens disponibles. Les stations ont été classées en deux groupes : les stations naturelles et les stations avec un ou plusieurs barrages en amont. Le premier groupe constitue le groupe de référence. Différents indices ou caractéristiques hydrologiques (voir Chapitre 6) ont été estimés à ces stations et les valeurs obtenues définissent les gammes de valeurs des régimes naturelles. Le deuxième groupe de station est subdivisé en plusieurs sous-groupes : 1) une station en aval d'un barrage; 2) plusieurs stations en aval d'un barrage unique; 3) configuration mixte stations/barrages (le détail de ces configurations est donné au Chapitre 4). Les valeurs des indices hydrologiques sont ensuite estimées en ces différentes stations. L'hypothèse de base est qu'une valeur d'indice à l'extérieur de la gamme des valeurs des stations naturelles signifie que le régime hydrologique est significativement perturbé par la présence et/ou l'opération du barrage.

Une analyse complémentaire (Chapitre 5) a été réalisée sur un sous-groupe de stations avec barrage. Ce sous-groupe est constitué de stations en aval de barrages dont les dates d'opération sont connues (barrages opérés par la Direction des barrages publics du CEHQ). L'analyse des séries à ces stations a pour objectif de mieux comprendre la nature et l'ampleur des modifications des patrons de débit attribuables directement à

l'opération des barrages et d'identifier, le cas échéant, des indices qui permettraient de détecter la « signature » de l'opération des barrages dans la séquence des débits quotidiens mesurés.

CHAPITRE 4 : SÉLECTION ET CLASSIFICATION DES STATIONS ET BARRAGES

Ce chapitre donne un aperçu des données disponibles et explique le processus de sélection et de classification des différentes configurations stations/barrages. Les Sections 4.1 et 4.2 donnent une description des données disponibles respectivement aux stations hydrométriques et aux barrages. La Section 4.3 explique les critères de sélection des stations hydrométriques retenues pour analyse ultérieure. Enfin, la Section 4.4 décrit les différentes catégories de stations et de configurations stations/barrages considérées.

4.1. Données disponibles : stations hydrométriques

Les données relatives aux stations hydrométriques au Québec proviennent du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) alors que celles des stations aux États-Unis proviennent de l'USGS (<http://nhd.usgs.gov/data.html>). Il est à noter qu'aux États-Unis, seules les stations localisées dans les états du Maine, du New-Hampshire, du Vermont et de New-York ont été considérées, en raison de leur proximité du territoire québécois.

Outre les séries des débits quotidiens, les informations suivantes sont disponibles pour l'ensemble des stations hydrométriques : a) nom et numéro; b) position géographique (latitude et longitude); c) altitude (sauf pour les stations des États-Unis); d) superficie du bassin versant en amont de la station.

Une autre caractéristique a été calculée pour les stations situées en aval d'un barrage, R_s , soit le rapport des superficies des bassins versants en amont du barrage et de la station, définie par :

$$R_s = \frac{S_{Barrage}}{S_{Station}} \quad (4.1)$$

où $S_{Barrage}$ correspond à la superficie du bassin versant en amont du barrage, et $S_{Station}$ à la superficie du bassin en amont de la station. Un rapport près de 1 indique que la station est située à proximité du barrage et que les débits à la station correspondent essentiellement aux débits évacués au barrage.

4.2. Données disponibles : barrages

Les données relatives aux barrages localisés au Québec ont été tirées du répertoire des barrages du CEHQ (<http://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/>). Les informations portant plus spécifiquement sur les barrages opérés par le CEHQ nous ont été transmises par Mme Julie Lafleur et M. Louis-Guillaume Fortin du Service de la gestion et de l'évaluation de la sécurité de la Direction des barrages publics. Pour les barrages situés aux États-Unis, les données sont issues du site du *National Atlas of the United States* (<http://nationalatlas.gov/mld/dams00x.html>).

Les données suivantes sont disponibles pour l'ensemble des barrages : a) nom et numéro; b) position géographique (latitude et longitude); c) altitude (sauf pour les barrages aux États-Unis); d) superficie du bassin versant en amont du barrage; e) volume de rétention maximal du barrage; f) type d'usage du barrage (p. ex. production hydroélectrique, contrôle des crues); g) date de construction du barrage. Il a également été possible d'obtenir les types de vannes et les dates d'opérations pour les barrages appartenant au CEHQ (ces barrages sont détaillés au Chapitre 5).

Les usages définis par le CEHQ pour les barrages au Québec diffèrent dans une certaine mesure de ceux définis par le *National Atlas of the United States* pour les barrages américains. Les usages apparemment similaires ont été regroupés alors que d'autres font directement référence à la classification américaine. Le Tableau 4.1 présente ces types d'usage et les types d'usages utilisés dans le présent document.

Tableau 4.1 Liste des usages des barrages selon les classifications du *National Atlas of the United States* (États-Unis) et du Québec et symboles utilisés dans le cadre de la présente étude.

Usage pour les barrages USGS	Usage pour les barrages du Québec	Symbole
Flood control and storm water management	Contrôle des inondations	I
Hydroelectric	Hydroélectricité	H
Recreation	Récréatif et Villégiature	V
Water supply	Prise d'eau	E
-	Régulation	R
Debris control	-	D
Fish and wildlife pond	-	P
Irrigation	-	G
Navigation	-	N
Other ¹	-	A
Fire protection, stock, or small farm pond	-	F
Tailings (résidus miniers)	-	B

1. Aucune précision n'est apportée quant aux usages regroupés sous le terme 'Other'

4.3. *Impounded Runoff Index original (IRI')* et *Impounded Runoff Index modifié (IRI)*

Une caractéristique importante des barrages a été considérée pour les barrages possédant au moins une station directement en aval soit l'*Impounded Runoff Index* (IRI'), inspiré des travaux de Singer (2007) qui lui-même s'est inspiré de Batalla *et al.* (2004). Cet indice est défini comme suit :

$$IRI' = \frac{\text{Volume de rétention maximal du barrage}}{\text{Volume annuel médian évacué}} \quad (4.2)$$

Le volume de rétention maximal correspond au volume d'eau maximal pouvant être stocké par le barrage et le volume annuel médian évacué correspond à la médiane des volumes totaux annuels évacués par le barrage. L'indice IRI' met donc en balance la capacité de stockage de l'ouvrage et le volume évacué. Ainsi plus l'IRI' est élevé, plus la capacité de stockage du barrage est importante par rapport aux débits évacués et plus le barrage est susceptible de modifier le débit en aval.

A cet effet, il est important de préciser que, parmi les données disponibles aux barrages localisés aux États-Unis, l'une est désignée comme 'Maximum storage' et une autre comme 'Normal storage'. Les définitions de ces deux variables, tels qu'indiquées sur le site (<http://nationalatlas.gov/metadata/dams00x020.faq.html>) où ces données ont été recueillies, sont les suivantes :

Maximum storage: The maximum storage in acre-feet. Maximum storage is the total storage space in a reservoir below the maximum attainable water surface elevation, including any surcharge storage. (Source: U.S. Army Corps of Engineers).

Normal storage: The normal storage in acre-feet. Normal storage is the total storage space in a reservoir below the normal retention level, including dead and inactive storage and excluding any flood control surcharge storage. A value of 0 may indicate that the normal storage is unknown or may indicate that the dam is normally dry. (Source: U.S. Army Corps of Engineers).

La première de ces données a été assimilée à la capacité de stockage du réservoir et la seconde au volume moyen de stockage. Lorsque certaines valeurs de 'Maximum storage' n'étaient pas disponibles la valeur 'Normal storage' a été utilisée pour le calcul de l'IRI. Dans la grande majorité des cas ces deux valeurs sont comparables. Cependant, dans certains cas, un écart important est observé entre ces valeurs (ce point sera de nouveau discuté au Chapitre 10).

Puisque le volume évacué est généralement inconnu, un autre indice a été défini applicable cette fois à une station et à l'ensemble des barrages en amont de cette station. L'*Impounded Runoff Index* modifié (IRI) s'exprime comme suit :

$$IRI = \frac{\text{Somme des volumes de rétention maximaux des barrages amont}}{\text{Volume annuel médian transitant à la station}} \quad (4.3)$$

L'indice IRI s'apparente à l'indice IRI' et met en balance les volumes de stockage des barrages en amont d'une station au volume transitant à cette station. Une valeur d'IRI élevée correspond à une situation où les capacités de stockage des barrages sont importantes par rapport aux volumes transitant à la station et correspond à une situation favorisant une influence des barrages sur les débits enregistrés à la station. Il est

important de constater que l'IRI utilisée tout au long de ce document fait référence à la définition de l'équation 4.3.

4.4. Stations hydrométriques retenues

Deux cent soixante-sept (267) stations hydrométriques, localisées au Québec et dans les États du Maine, du New-Hampshire, du Vermont et de New-York ont été initialement sélectionnées. Ces stations devaient : 1) avoir un minimum de cinq années de données valides (une année est valide si elle compte moins de 10 % de données manquantes); 2) ne pas contenir plus de cinq années consécutives non valides (une station non opérationnelle pendant plusieurs années est susceptible de conduire à des ruptures dans les séries des débits à cause de modifications dans l'appareillage ou dans le traitement des données); 3) être localisées entre les latitudes 43°N et 48°N (afin d'éviter de considérer des stations de régions climatiques trop différentes); et 4) être à l'exutoire de bassins versants de plus de 100 km².

Un examen minutieux de toutes les séries de débits disponibles a permis d'identifier diverses particularités de certaines séries qui ont conduit à leur élimination. Les sections suivantes dressent un portrait de ces différents cas. L'Annexe A présente la liste des stations non retenues pour fin d'analyse. À noter que deux stations n'ont pas été retenues (station 4270500, Chateaugay River Near Chateaugay, New York et station 1138500, Connecticut River At Wells River, Vermont) puisque les informations sur la station ou le barrage en amont de ces stations étaient incomplètes.

4.4.1. Valeurs nulles du débit

Certaines stations aux États-Unis présentent des périodes de débit nul pouvant s'étendre sur plusieurs mois, tel qu'illustré à la Figure 4.1. Un tel hydrogramme, bien qu'étonnant, n'est pas à proprement parler impossible. Cependant, il a été jugé plus prudent d'assimiler les valeurs nulles à des données manquantes car il nous était impossible de vérifier la validité de ces valeurs.

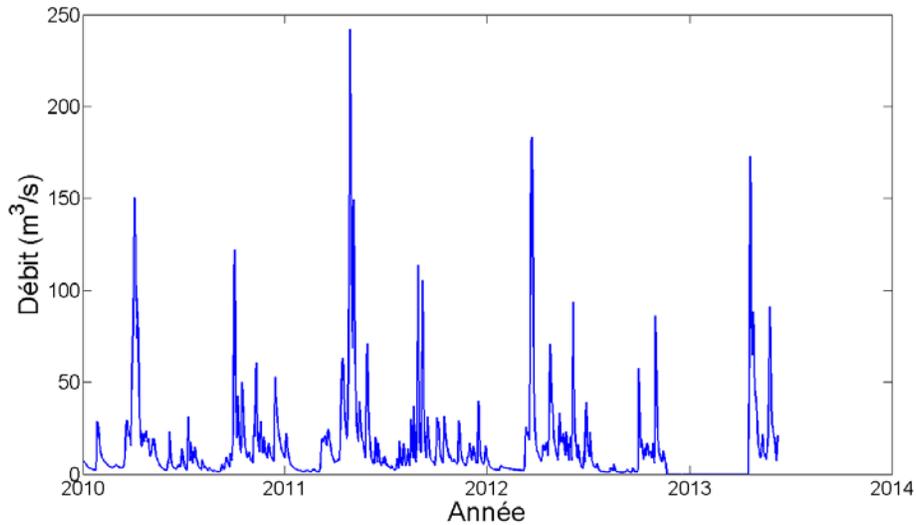


Figure 4.1 Exemple d'hydrogramme comportant une longue période de débit nul (station 1027200, North Branch Penobscot River near Pittston Farm, Maine).

4.4.2. Rupture dans les séries de débits

Certaines séries présentent des ruptures des débits moyens, minimaux ou maximaux. La Figure 4.2 illustre le cas de la station 1077000, où avant 1970, les débits ne sont jamais inférieurs à $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, alors que, par la suite, des débits inférieurs à cette valeur sont enregistrés à presque toutes les années. De même, les débits maximaux antérieurs à 1970 sont beaucoup plus faibles que pour la période postérieure à 1970. Puisque de tels comportements peuvent être indicateurs d'un changement d'instruments ou de perturbations du site, les stations présentant de telles ruptures n'ont pas été considérées dans la suite des analyses.

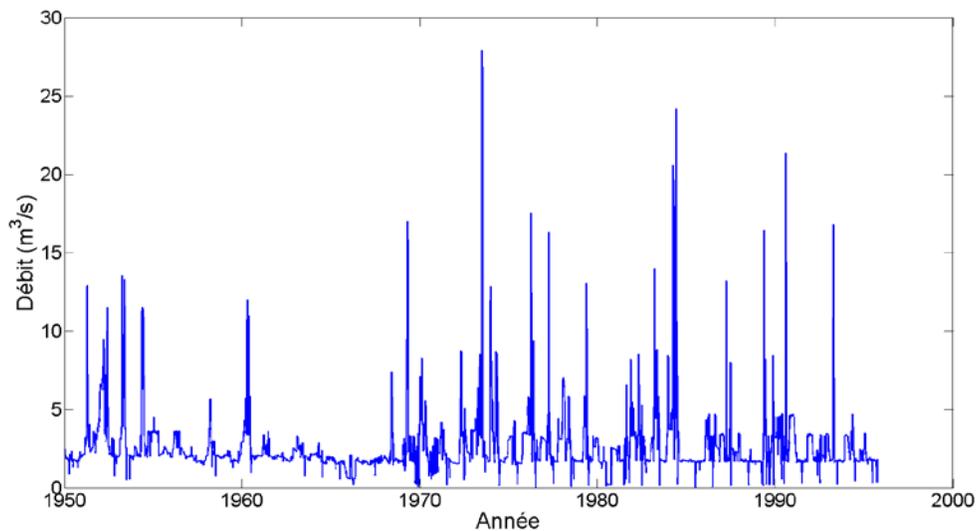
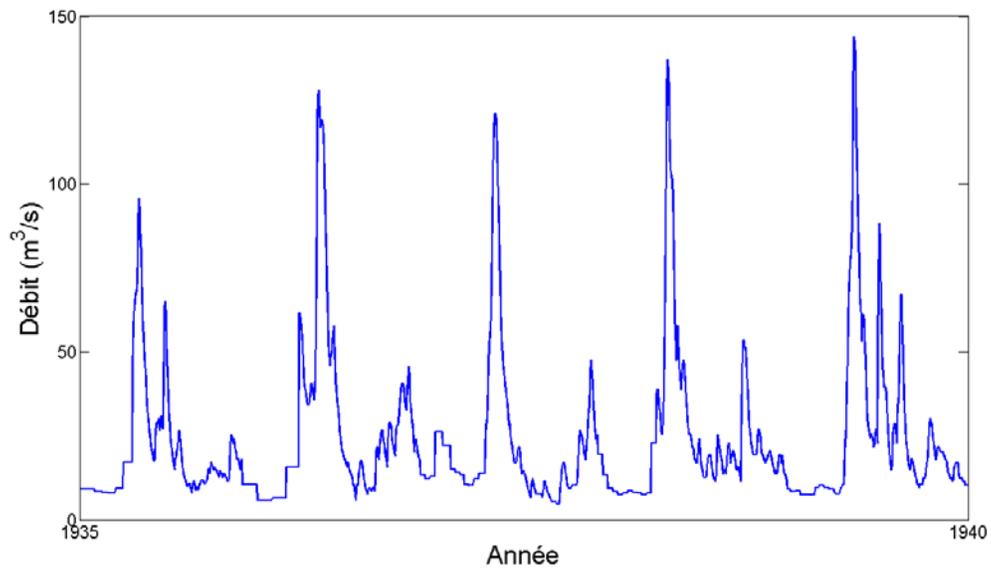


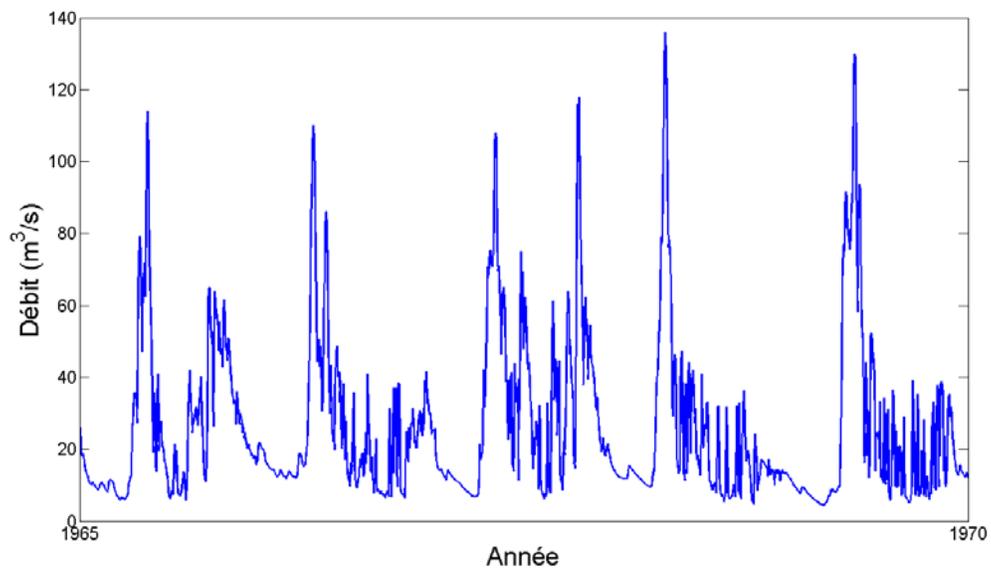
Figure 4.2 Exemple d'hydrogramme des débits quotidiens comportant une rupture (périodes antérieure et postérieure à 1970) dans les débits minimums et maximums (station 1077000, Squam River at Ashland, New-Hampshire). À noter que le barrage en amont de cette station (6808, Squam Lake) a été construit en 1856.

4.4.3. Hydrogrammes en paliers

Certaines séries présentent des hydrogrammes en paliers tel que celui présenté à la Figure 4.3. Puisqu'une telle situation peut résulter d'un changement dans la fréquence de prise de mesure, ces stations n'ont pas été retenues pour fin d'analyse.



(a)



(b)

Figure 4.3 Exemple d'hydrogramme en paliers à la station Matawin (Québec; station 050119) : a) pour la période 1935-1940; b) pour la période 1965-1970 qui ne présente pas de structures en paliers apparentes. À noter que le bassin en amont de cette station ne comporte aucun barrage.

4.5. Classification des stations retenues

Des 266 stations hydrométriques originales, 220 ont été retenues pour fin d'analyse. La liste des stations hydrométriques retenues est présentée à l'Annexe A. De ces stations, 137 sont localisées au Québec et 83 aux États-Unis. La Figure 4.4 présente les périodes d'enregistrements des débits à chacune des stations retenues dans le cadre de cette étude. Les données de débit antérieures à la construction du barrage ont été éliminées aux stations situées en aval d'un barrage (ces cas particuliers sont traités au Chapitre 9). De façon générale, les stations situées aux États-Unis ont été mises en place dans les années 50 alors qu'au Québec un fort contingent de stations a été mis en place dans les années 70. Toutefois, les stations avec les plus longs historiques sont situées au Québec, certaines ayant même débutées leurs opérations dans les années 40, pour une durée totale disponible de 70 ans. L'histogramme du nombre d'années d'opérations valides est présenté à la Figure 4.5. Les surfaces des bassins versants aux stations varient entre 100 et 18 000 km², à l'exception du bassin versant à la station en aval du barrage Carillon (143 000 km²). De façon générale, la durée moyenne d'opération des stations se situe autour de 20 à 30 ans (Figure 4.5).

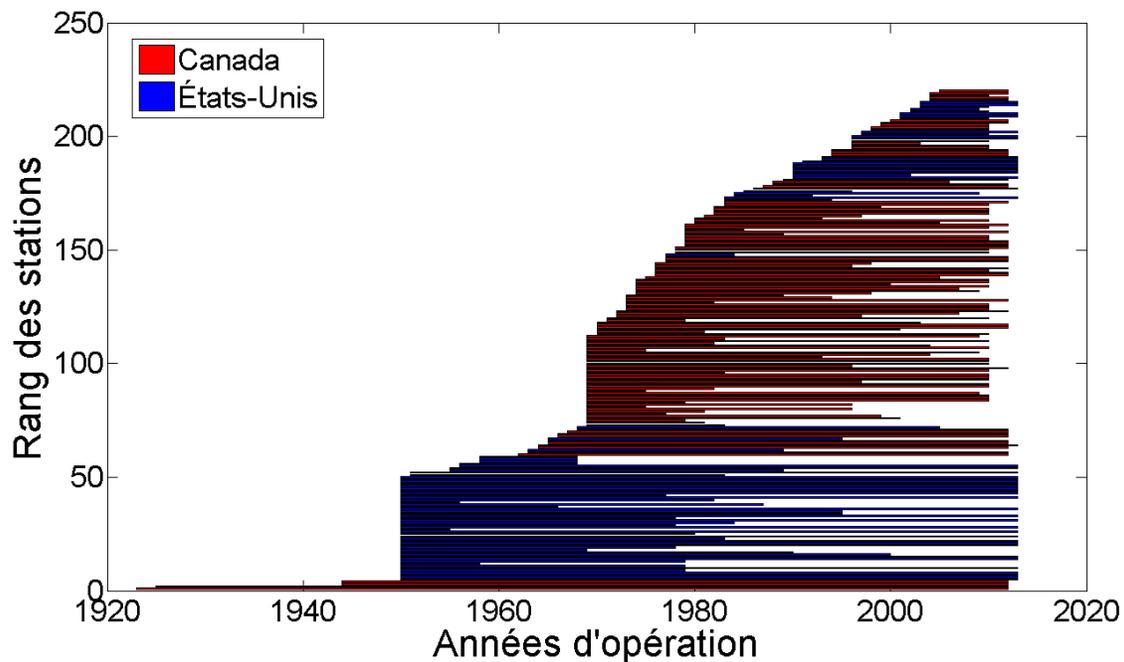


Figure 4.4 Années d'opération pour l'ensemble des stations retenues (le rang en ordonnées a été établi en fonction de l'année de mise en opération des stations).

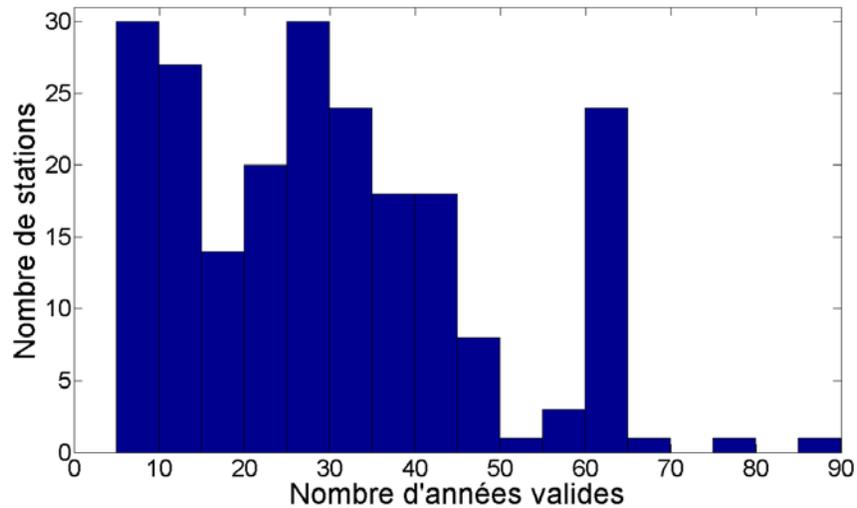


Figure 4.5 Histogramme du nombre d'années d'opération valides pour les stations retenues.

Les stations retenues ont été classées en deux groupes selon que l'on retrouve ou non un ou plusieurs barrages en amont. Les stations sans barrages en amont sont appelées stations naturelles alors que les autres sont désignées comme stations avec barrages.

4.5.1. Stations naturelles

La carte de la Figure 4.6 localise les stations naturelles. L'Annexe B présente la liste et les caractéristiques des 155 stations retenues dans cette catégorie. Ces stations sont utilisées comme stations de référence pour l'estimation des différents indices.

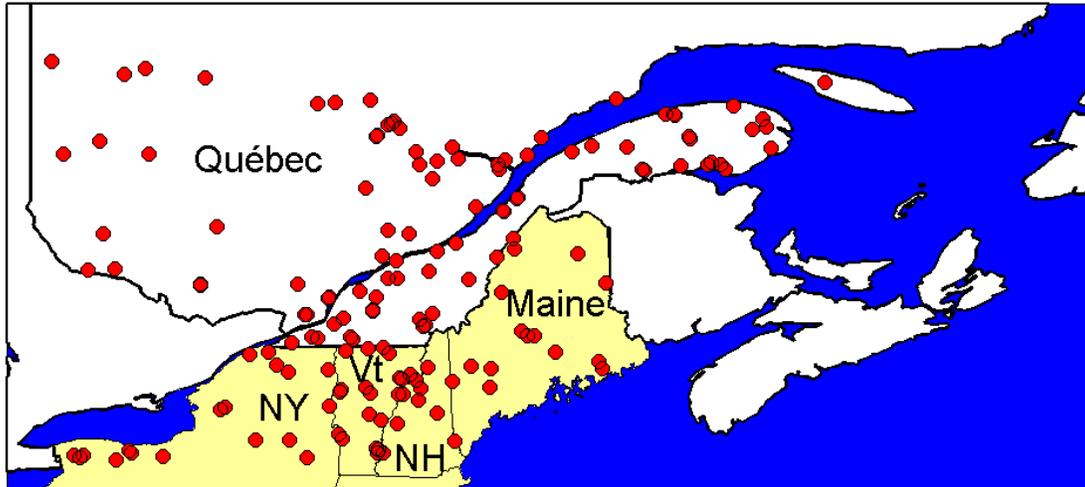


Figure 4.6 Localisation des stations dites naturelles.

4.5.2. Stations avec barrages

Les stations avec barrages ont été classées en trois groupes selon que ces stations faisaient parties des configurations suivantes : 1) une station en aval d'un barrage; 2) plusieurs stations en aval d'un barrage; 3) configuration mixte stations/barrages. Le premier groupe compte 36 couples station/barrage (Figure 4.7; Annexe C), le second 7 ensembles stations/barrage pour un total de 15 stations et 7 barrages (Figure 4.8; Annexe D) et le troisième 13 configurations mixtes stations/barrages pour un total de 42 barrages et 24 stations (Figure 4.9; Annexe E). A noter que pour les groupes 'plusieurs stations en aval d'un barrage' et 'configuration mixte station/barrage', si la partie la plus en amont est composée d'un barrage suivi d'une station, ce couple barrage-station est également considéré dans le groupe 'une station en aval d'un barrage'. Ainsi, une même station peut se retrouver dans deux groupes. À titre d'exemple, la station 30225 St-François, associée au barrage Jules-Allard, se trouve dans le groupe 'une station en aval d'un barrage' et dans le groupe 'configuration mixte station/barrage'.

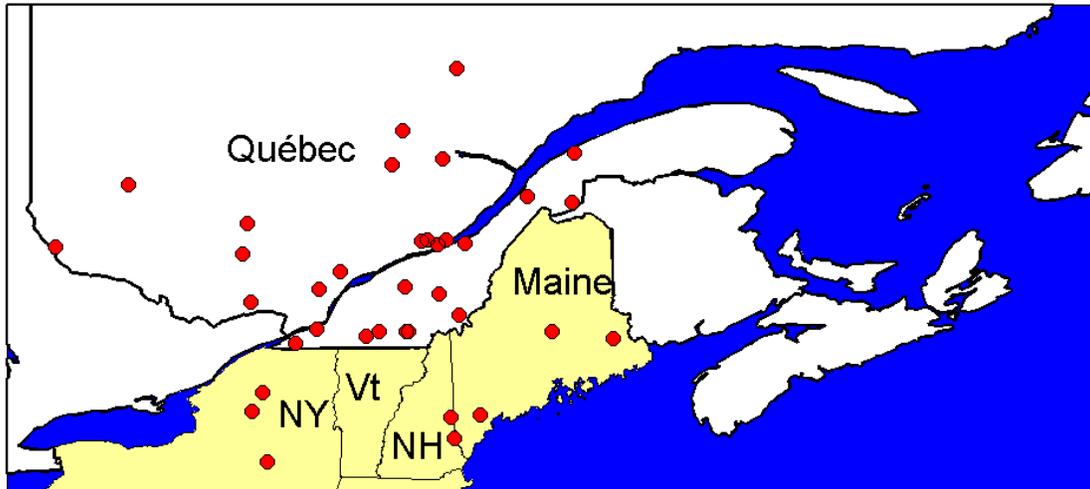


Figure 4.7 Carte des stations/barrages du groupe ‘une station en aval d’un barrage’ (36 couples station/barrage).

Le premier groupe permet de calculer les valeurs des différents indices dans le cas où la station est située tout juste en aval du barrage. En effet, les valeurs du rapport entre les superficies des bassins versants à la station et au barrage sont en grande majorité comprises entre 0,9 et 1, indiquant que les stations sont situées à proximité des ouvrages. Ce type de configuration fait en sorte que les débits mesurés à la station correspondent aux débits évacués par le barrage et permettent donc une estimation directe d’une éventuelle influence de ces derniers sur les débits mesurés.

La deuxième configuration (plusieurs stations en aval d’un barrage) permet d’analyser la décroissance de l’influence du barrage sur le régime d’écoulement en fonction de la distance entre ce dernier et la station hydrométrique. Enfin, la troisième configuration (une ou plusieurs stations en aval d’un groupe de barrages) est constituée de groupes de deux barrages ou plus ayant au moins une station de débit en aval. Ce type de configuration permet d’analyser l’influence combinée de plusieurs barrages sur le débit à une station.

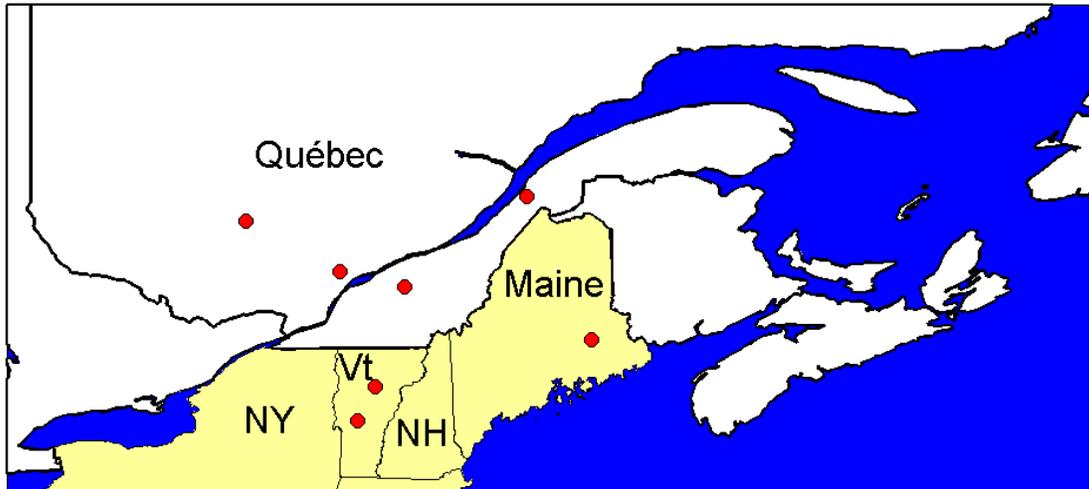


Figure 4.8 Carte des stations/barrages du groupe 'plusieurs stations en aval d'un barrage' (7 ensembles stations/barrage).

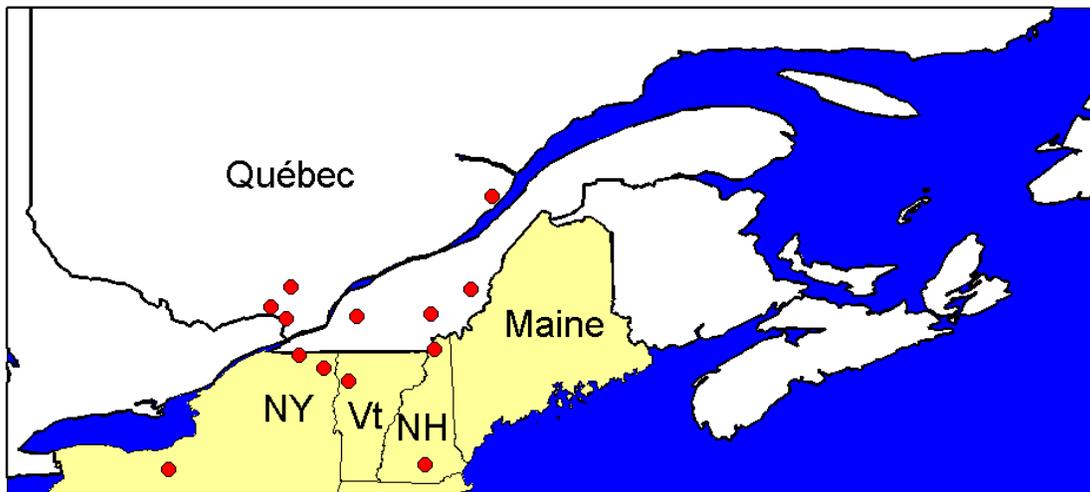


Figure 4.9 Carte des stations/barrages du groupe 'configurations mixtes stations/barrages' (13 configurations).

CHAPITRE 5 : STATIONS EN AVAL DE BARRAGES AVEC DATES D'OPÉRATION CONNUES

Ce chapitre rend compte des travaux réalisés à partir des stations situées à l'aval de barrages dont les dates d'opération sont connues. La liste et les caractéristiques de ces stations et barrages sont présentées au Tableau 5.1. Tous ces barrages sont opérés par la Direction des barrages publics du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Les fichiers des opérations à ces barrages contiennent diverses informations telles la date et l'heure d'opération, le nom de l'opérateur et certaines informations sur l'opération (p. ex. ouvertures de vannes). Seules les données relatives aux dates d'opération ont été considérées dans ce qui suit.

5.1. Analyse du nombre d'opération

L'aptitude à détecter les effets sur les débits de l'opération des barrages dépend de la fréquence à laquelle ces derniers sont opérés. La Figure 5.1 présente les box-plots du nombre d'opération par mois pour chacun de ces barrages. Comme on peut le voir ce nombre varie sensiblement d'un barrage à l'autre et le patron annuel des opérations varie selon le barrage. Ainsi tous les barrages connaissent, à des degrés divers, une recrudescence du nombre d'opération au printemps ou au début de l'été, opérations vraisemblablement destinées au contrôle des débits de crues printanières. Le nombre moyen annuel d'opérations varie sensiblement d'un barrage à un autre. À noter que les barrages Kiamika et Mitchinamecus sont opérés très peu souvent.

Tableau 5.1 Liste des barrages dont les dates d'opération sont connues et des stations situées en aval de ces barrages

Barrage	Usages ¹	Période d'opérations connues	Numéros stations en aval	Période d'opération station	Surface drainée (km ²)	Rapport surface drainée station/barrage	Débit médian annuel à la station (m ³ /s)	Indice IRI
Sartigan	IE	2005-2011	023429	1969-2012 ³	3070	1,00	60,1	0,002
			023402	1915-2012	5820	0,53	118,4	0,001
St-Didace	V	2005-2012	052605	2000-2013	836	1,00	16,5	0,05
Lac Ludger	V	1991-2011	040132 ²	1994-2012	39,1	1,00	0,82	0,11
			040122	1971-2012	311	0,13	7,02	0,013
			040110	1930-2012	1170	0,03	24,2	0,004
Mégantic	I	1992-2012	023427	1976-2012	775	1,00	16,3	0,12
Aylmer	IHV	1992-2011	030278	1977-2012	1730	0,99	37,5	0,18
Morin	H	1992-2011	022505	1944-2012	261	1,00	5,05	0,24
			022502/ 022513	1923-1961 1961-2012	1050	0,25	18,6	0,066
Portage-des-Roches	H	1992-2012	061004	1925-2012	3390	1,00	50,7	0,44
des Commissaires	H	1992-2012	061602	1972-2012	562	1,00	11,3	0,52
Kiamika	RIH	1992-2012	040627	1989-2012	883	0,79	16,95	0,81
Mitchinamecus	RIH	1992-2012	040619	1977-2012	1050	0,89	20,1	0,84
Jules-Allard	IHV	1992-2011	030225	1988-2012	1230	0,98	27,1	0,87
Choinière	R	1992-2011	030309	1978-2012	139	0,95	2,75	0,96
			030340	1983-2012	248	0,53	4,73	0,56

1. I : Inondation; V : Récréatif et Villégiature; E : Prise d'eau; H : Hydroélectricité; R : Régulation

2. Cette station n'est pas été considérée dans les analyses puisque la surface du bassin drainé est inférieure à 100 km².

3. Seules les données postérieures à 1979 ont été considérées pour analyse. En effet, avant 1975, la série est marquée par une période d'une dizaine d'année de données manquantes.

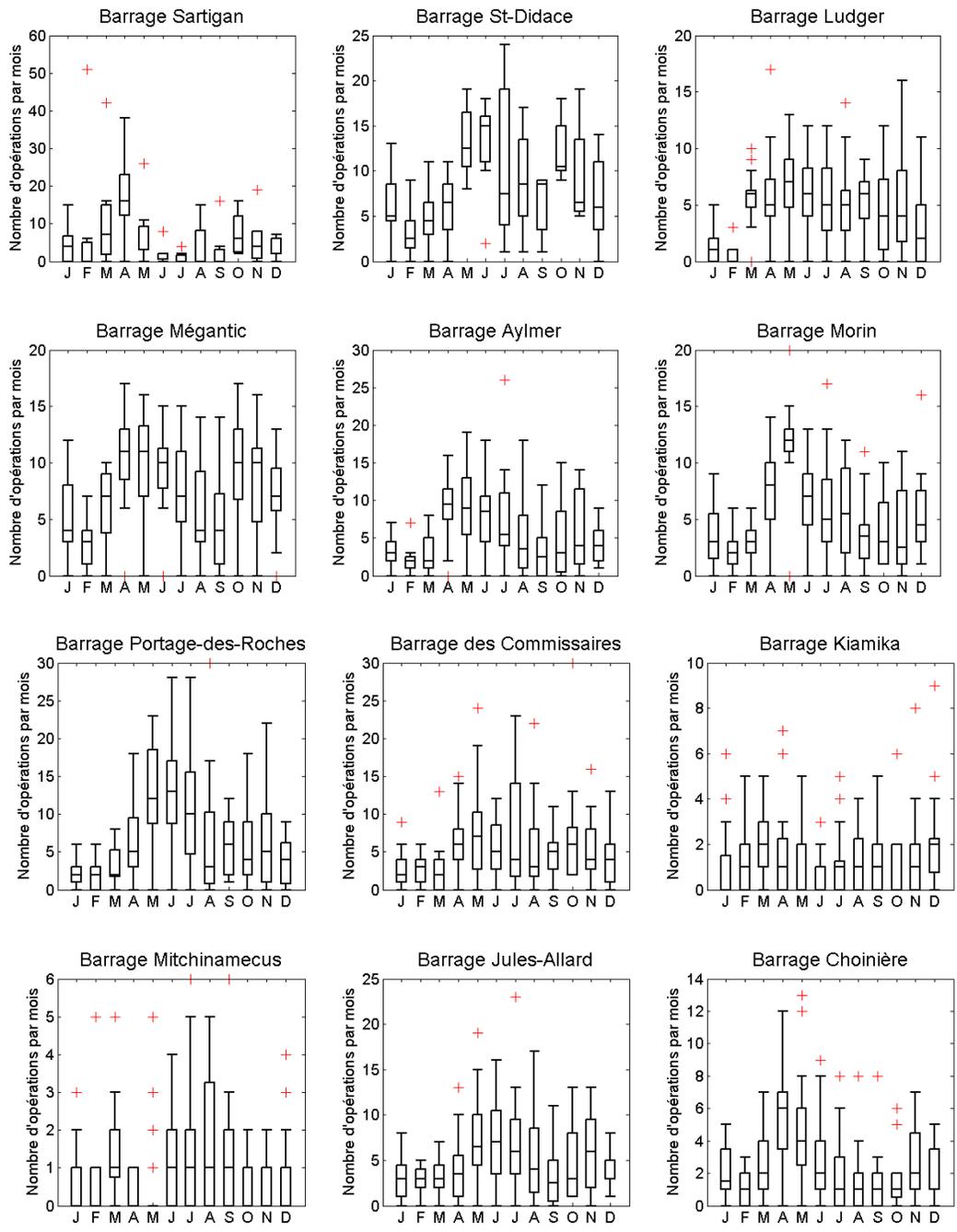


Figure 5.1 Box plots du nombre d'opérations par mois aux différents barrages dont les dates d'opérations sont connues.

L'une des questions que l'on peut se poser est : pour quelle gamme de débits les barrages sont-ils opérés ? Afin de répondre à cette question, les valeurs de débits mesurés à la station la plus près des barrages ont été classées en intervalles de valeurs $\Delta_{ij} = [Q_i, Q_j[$. Le nombre de valeurs de débits de chacun de ces intervalles correspondant à des jours où le barrage est opéré, n_{ij} , est dénombré et le rapport entre ce nombre et le nombre total de débit compris dans l'intervalle Δ_{ij} , N_{ij} , est estimé :

$$\eta_{ij} = \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \quad (5.1)$$

Le rapport η_{ij} correspond donc à la fraction de jours où le barrage a été opéré lorsque le débit mesuré à la station était inclus dans l'intervalle Δ_{ij} . La Figure 5.2 montre les histogrammes de ces fractions pour les différents barrages. Les débits d'opération des barrages se situent dans de nombreux cas dans les gammes de débits intermédiaires ou élevés. Certaines stations (p. ex. Jules-Allard) présente plus d'un mode, suggérant que les barrages sont opérés lorsque les débits se situent dans deux gammes de débits distincts (possiblement pour maintenir les débits évacués à certaines valeurs; voir la Section 6.1 à ce sujet).

5.2. Variations des débits quotidiens de jours consécutifs

L'opération des barrages a une incidence directe sur les valeurs de débits au moment où ces opérations sont effectuées. On peut donc penser que la série des débits quotidiens en sera modifiée et que ces modifications pourraient affecter les distributions des variations des débits de jours consécutifs. Afin de vérifier cette hypothèse, les variations de débits entre jours consécutifs $\Delta Q_{j,j+1} = (Q_{j+1} - Q_j)$ ont été estimées et classées selon que le barrage a été opéré ou non le jour j . La Figure 5.3 montre les fonctions de répartition de ces variations pour les jours avec et sans opération et pour l'ensemble des jours, l'idée étant de voir dans quelle mesure ces écarts varient en fonction de l'opération ou non du barrage.

Les graphiques de la Figure 5.3 suggèrent que l'opération des barrages a une incidence sur les variations de débit entre jours consécutifs. On constate en effet que l'opération semble favoriser une plus grande fréquence d'écartants négatifs $Q_{j+1} < Q_j$ et d'écartants positifs $Q_{j+1} > Q_j$. A l'échelle de l'ensemble des jours, cette variation sera d'autant plus importante que le barrage aura été souvent opéré. Un examen plus attentif montre que les écarts positifs ont tendance à se produire lorsque le débit au jour $j-1$, Q_{j-1} , est faible alors que les écarts sont négatifs lorsque Q_{j-1} est grand. Dans le premier cas, on peut penser que l'opération du barrage en période de faible hydraulité vise à soutenir les étiages et donc conduit à une augmentation des débits après opération ($Q_{j+1} > Q_j$) alors que lors de crue l'opération du barrage vise à stocker les eaux et résulte en une réduction des débits évacués ($Q_{j+1} < Q_j$).

Bien que prometteuses ces considérations n'ont pas été exploitées dans la suite de l'analyse. Pour ce faire, une analyse des variations de débit aux stations naturelles devrait être complétée et les résultats aux stations naturelles et aux stations avec barrage comparés. Une telle comparaison pourrait peut-être permettre de définir des indices hydrologiques directement et uniquement associés à l'opération des barrages.

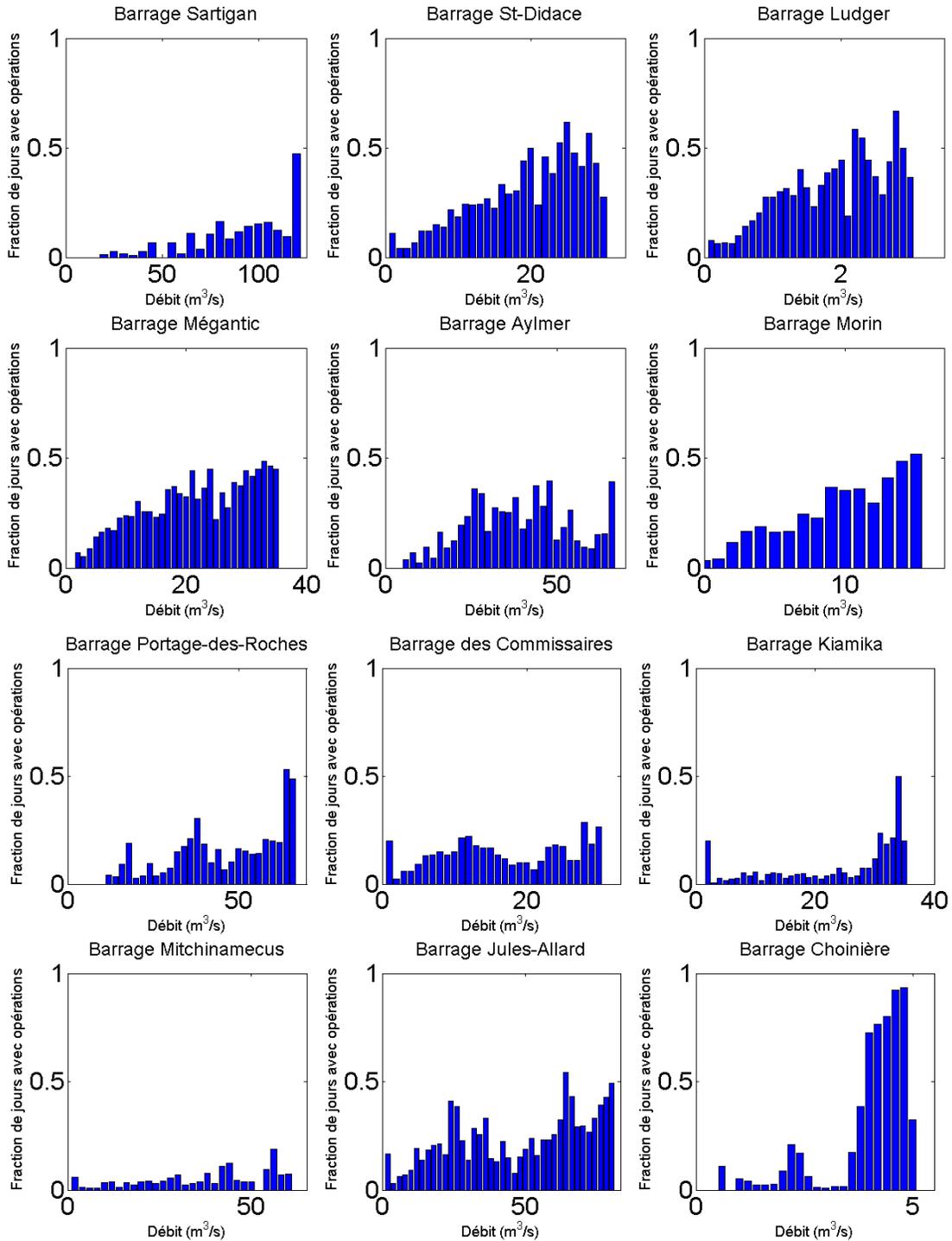


Figure 5.2 Histogrammes des fractions de jours où les barrages sont opérés par classes de valeurs de débits aux stations situées les plus près des barrages.

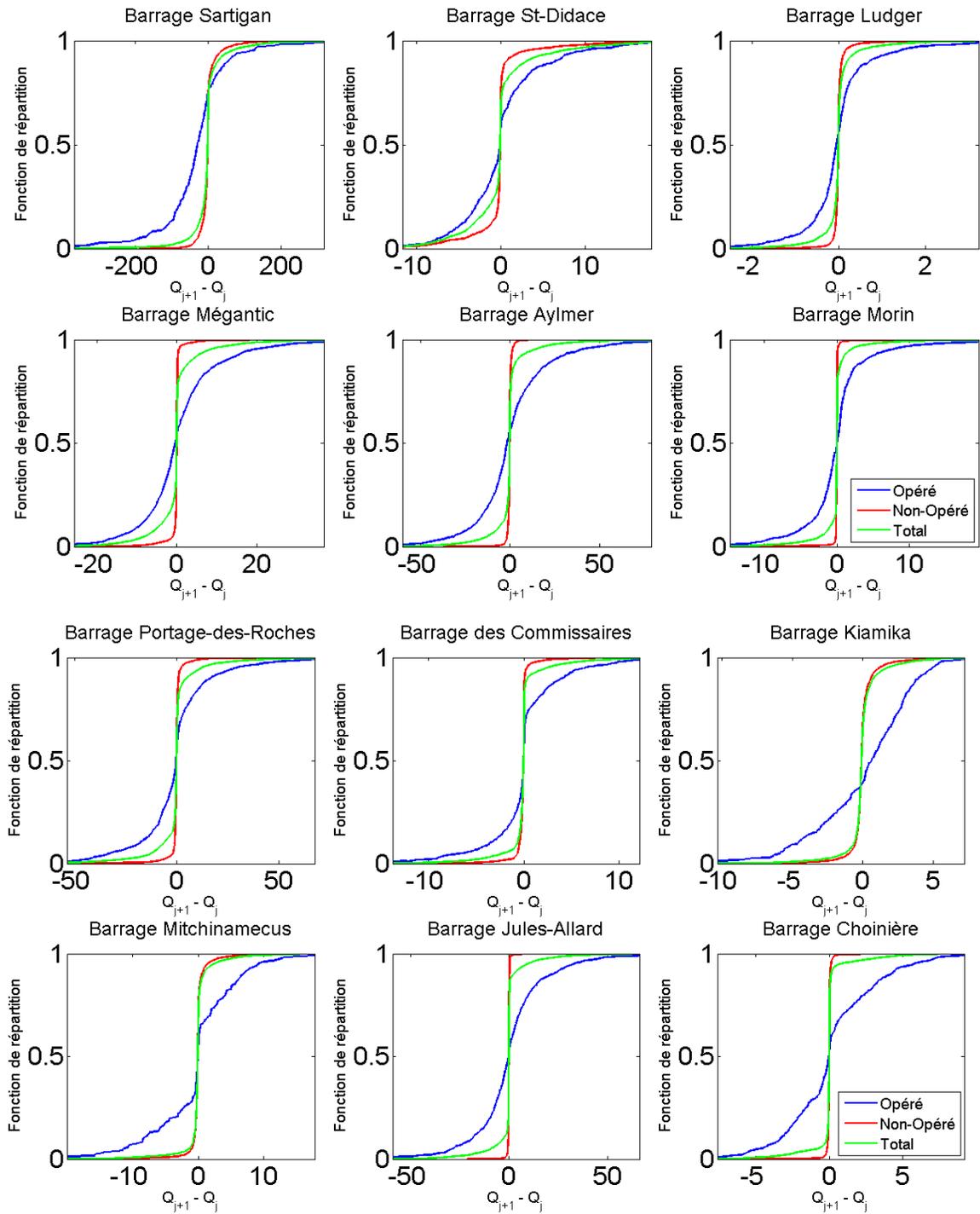


Figure 5.3 Fonctions de répartition des variations de débits entre jours consécutifs $\Delta Q_{j,j+1} = (Q_{j+1} - Q_j)$ pour les jours avec et sans opération du barrage et pour l'ensemble des jours aux stations situées en aval de ces barrages.

CHAPITRE 6 : CRITÈRES D'INFLUENCE CONSIDÉRÉS

Le présent chapitre décrit le test et les indices considérés et explique les raisons et la procédure ayant conduit à la sélection de ces derniers. Chaque section est consacrée à un test, un indice ou à un groupe d'indices. Ces derniers sont définis en fonction de certaines hypothèses relatives à l'influence que pourrait avoir l'opération des barrages sur les caractéristiques des distributions et des hydrogrammes des débits moyens quotidiens, hebdomadaires et mensuels. Les versions hebdomadaires et mensuelles des critères définis aux sections suivantes sont obtenues en considérant les séries des valeurs des débits moyens hebdomadaires et mensuels. Il est important de noter que certains indices demeurent exactement les mêmes aux échelles hebdomadaires et mensuelles. Autrement dit, dans ces cas, une station classée comme influencée à l'échelle quotidienne selon cet indice le sera également aux échelles hebdomadaires et mensuelles (ce point est discuté plus en détail au Chapitre 7 dans chacune des sections se rapportant aux critères retenus).

6.1. Test d'unimodalité

L'opération d'un barrage consiste souvent à sélectionner des ouvertures de vannes afin de maintenir un ou plusieurs débits spécifiques. Ces débits sont généralement imposés par les règles d'opération des barrages. L'examen des histogrammes des débits mesurés permet d'identifier ces débits. La Figure 6.1 présente un exemple d'histogramme des débits quotidiens pour la station 030309 située directement en aval du barrage Choinière (voir Annexe C). On remarque ainsi un mode autour de $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ et un autre autour de $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Comme nous le verrons, ce type de distribution n'est observé qu'exceptionnellement aux stations naturelles. Ces divers modes sont représentatifs des débits de gestion que l'opérateur de barrage tend à maintenir. Ainsi dans le cas du barrage Choinière, deux débits de gestion sont favorisés. Ces modes dans la distribution des débits seraient donc une signature de l'influence de l'opération des barrages sur les débits mesurés.

Un examen visuel de l'histogramme des débits permet généralement de repérer les cas où deux ou plusieurs modes sont présents. Toutefois, afin d'automatiser et standardiser

la méthode, des tests statistiques sont disponibles permettant de vérifier l'hypothèse d'unimodalité d'une distribution. Parmi ceux-ci, le test *dip* (Hartigan et Hartigan 1985) a été retenu dans le cadre de la présente étude. Ce test a été utilisé à de très nombreuses reprises dans la littérature et notamment en hydrologie (voir par exemple Zhang *et al.* 2003; Wolski *et al.* 2012).

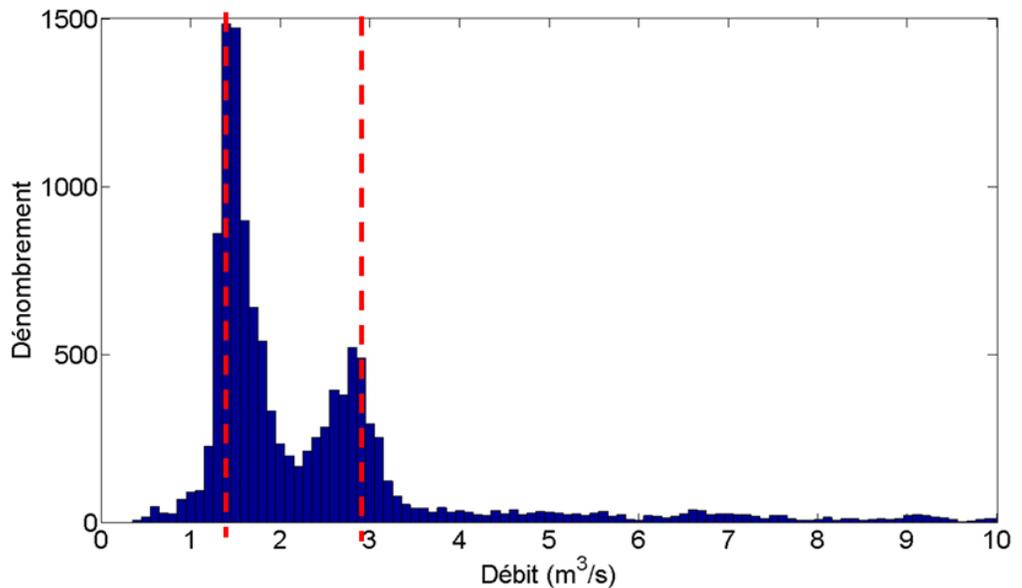


Figure 6.1 Histogramme des débits quotidiens pour la station 30309 directement en aval du barrage Choinière (Québec). Les lignes rouges pointillées montrent les deux modes.

Le test *dip*, que l'on désignera par test d'unimodalité dans ce qui suit, vérifie l'hypothèse selon laquelle la distribution considérée est unimodale. Le rejet de cette hypothèse signifie que la distribution est multimodale. Le test a été appliqué en considérant un niveau de confiance de 95 %.

La version Matlab développée par F. Mechler et datant de 2002 (<http://www.nicprice.net/diptest/>), laquelle est une transcription directe de l'algorithme proposé par Hartigan et Hartigan (1985), a été utilisée dans le cadre de ce projet. Le lecteur est invité à consulter ces références pour une description plus détaillée de ce test. Le programme du test d'unimodalité a d'abord été vérifié sur des échantillons fictifs

généralisés aléatoirement. Les résultats ayant été jugés satisfaisants, le test a ensuite été appliqué aux séries de débits mesurés.

6.1.1. Cas particuliers

De façon générale, les résultats concordent avec l'examen visuel. Toutefois, il a été constaté que certaines situations particulières pouvaient conduire à des résultats erronés. Les paragraphes suivants décrivent ces situations problématiques et les façons dont elles ont été traitées. Il est à noter que les cas de séries trop courtes (Section 6.1.1.1), de séries avec des ruptures (Section 6.1.1.2) et de séries avec des valeurs nulles (Section 6.1.1.3) ont déjà été considérés à la Section 4.3.

6.1.1.1. Séries trop courtes

Les stations ayant seulement quelques années peuvent facilement générer deux modes, particulièrement si deux régimes de précipitations sont présents dans les séries (p. ex. une période plus pluvieuse et une autre plus sèche). Par précaution, ce test ne devrait être appliqué qu'aux stations comportant plus de cinq ans de données (voir Section 4.3).

6.1.1.2. Rupture dans la série des débits journaliers

Les stations où des changements d'instruments, de procédures, de courbes de tarage ont eu lieu au fil du temps peuvent montrer des ruptures dans les séries des débits mesurés que ce soit au niveau du débit moyen ou encore du débit minimal enregistré. De telles inhomogénéités dans les séries peuvent résulter en l'apparition de plusieurs modes dans les distributions des débits. Bien que plusieurs tests statistiques aient été proposés pour détecter ces ruptures, les séries de débits avec des ruptures ont été identifiées suite à un examen visuel (voir Section 4.3).

6.1.1.3. Période prolongée avec débit nul

Les stations pour lesquelles le débit est nul sur de longues périodes ont tendance à avoir un mode supplémentaire à zéro qui ne peut donc résulter de l'opération des barrages. Ce phénomène se rencontre particulièrement pour les petits bassins. Deux critères ont donc été retenus afin d'éviter ce genre de situation. Le premier consiste à éliminer les stations en aval de bassins versants de moins de 100 km². Le deuxième

critère a consisté à assimiler les valeurs nulles à des données manquantes et à écarter les séries qui comportaient plus de cinq années consécutives de données manquantes.

6.1.1.4. Précision variable dans la mesure des données

De façon générale, la précision des débits archivés change en fonction de la valeur mesurée de débit. Les précisions pour les stations du Québec et des États-Unis sont présentées aux Tableaux 6.1 et 6.2. Ces changements de précision donnent une apparence en escalier à la fonction de répartition empirique (voir l'exemple de la Figure 6.2). Or, le test interprète ces petites discontinuités comme autant de petits modes de la distribution. Ce problème est important lorsque la moyenne annuelle des débits se situe près des valeurs où ce changement de précision survient.

Tableau 6.1 Précision du débit archivé en fonction de la fourchette de débit mesuré pour les stations du Québec.

Débit (m ³ /s)	Précision (m ³ /s)
[0,1, 1[	0,001
[1, 10[	0,01
[10, 100[	0,1
[100, 1000[	1
[1000, 10 000[	10

Tableau 6.2 Précision du débit archivé en fonction de la fourchette de débit mesuré pour les stations des États-Unis.

Débit (pi ³ /s)	Débit (m ³ /s)	Précision (pi ³ /s)
[1, 10[	[0,028, 0,28[	0,1
[10, 100[	[0,28, 2,8[	1
[100, 1000[	[2,8, 28[	1 ou 10
[1000, 5000[	[28, 140[	10 ou 100

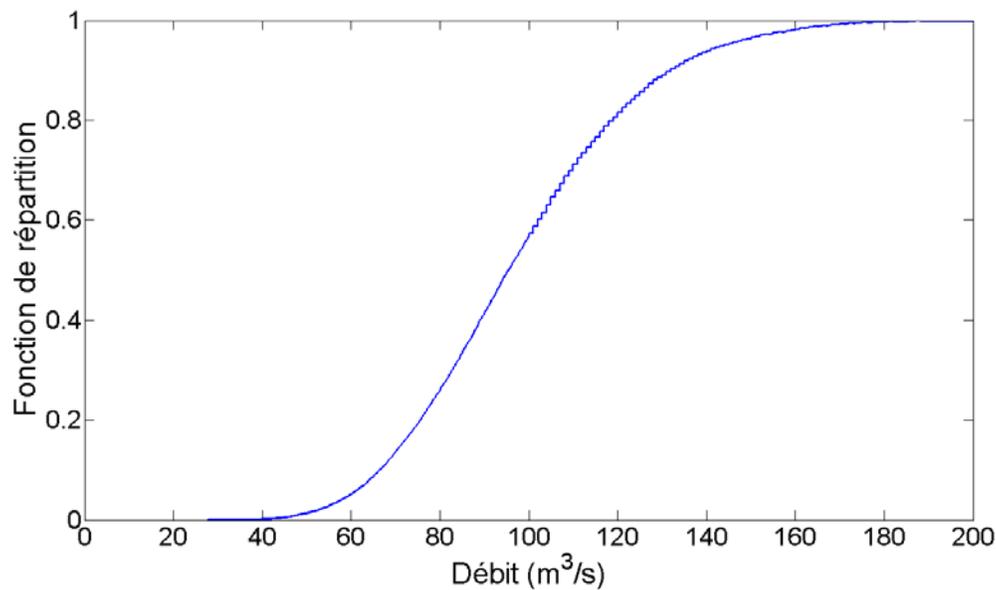


Figure 6.2 Exemple fictif de fonction de répartition des débits quotidiens à une station naturelle dont la précision est de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ pour des débits entre 40 et $100 \text{ m}^3/\text{s}$, puis de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ pour les débits supérieurs à $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Cette situation n'a pas posé de problèmes particuliers pour les stations du Québec. Toutefois, pour les États-Unis, plusieurs stations naturelles présentent des débits moyens autour de $1000 \text{ pi}^3/\text{s}$, ce qui a mené à la conclusion que certaines d'entre elles présentaient des distributions non-unimodales en raison du changement de résolution près de cette valeur (Tableau 6.2).

Une méthode simple permettant d'éviter ce problème consiste à ajouter à chaque valeur de débit un bruit aléatoire uniforme afin que toutes les valeurs aient le même nombre de chiffre significatif. Par exemple, pour des valeurs de débit allant de 50 à $1000 \text{ pi}^3/\text{s}$, la précision la plus faible étant de $10 \text{ pi}^3/\text{s}$, les valeurs dans cette gamme de débit ont été modifiées de la façon suivante :

$$Q_j^* = Q_j + 10 U(0,1) \quad (6.1)$$

où Q_j est le débit original au jour j (pi³/s), Q_j^* est le débit modifié pour le jour j (pi³/s) et $U(0,1)$ est la distribution uniforme des valeurs entre 0 et 1. Les débits modifiés arrondis au millième ont ainsi été retenus. Cette correction permet de lisser la fonction de répartition. Il est recommandé de systématiquement faire ce prétraitement sur les données de débit avant d'appliquer le test d'unimodalité.

6.2. Indices liés aux débits de crue

Le premier type d'indice cherche à quantifier l'impact de l'opération des barrages sur les débits de crue. L'hypothèse de base est que l'opération du barrage aura pour conséquence de laminier les crues et notamment la crue printanière. Plusieurs indices de crue peuvent ainsi être définis.

6.2.1. Indice 1 – Moyenne des rapports annuels du débit moyen de crue et du débit sur les autres mois

L'indice I_{C1} correspond à la moyenne interannuelle des rapports annuels des débits moyens en période de crue (mars, avril et mai) et la moyenne des débits durant les autres mois de l'année :

$$I_{C1} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\bar{Q}_{crue}^{(j)}}{\bar{Q}_{autres}^{(j)}} \quad (6.2)$$

où $\bar{Q}_{crue}^{(j)}$ est le débit moyen pendant la période de crue (mois de mars, avril et mai) de l'année j , $\bar{Q}_{autres}^{(j)}$ est le débit moyen pendant les autres mois de l'année j . N est le nombre d'années disponibles. L'effet de laminage des crues aura pour conséquence de diminuer les débits en période de crue et donc de diminuer cette valeur. Il est à noter que pour les stations situées entre 48°N et 50°N, les mois de crue considérés sont les mois d'avril, mai et juin en raison de la crue plus tardive dans cette région.

6.2.2. Indice 2 – Rapport du débit moyen en période de crue et du débit moyen des autres mois

L'indice I_{C2} correspond à la moyenne du débit moyen en période de crue (mars, avril et mai) pour toute la série de débit disponible et du débit moyen pendant les autres mois de l'année :

$$I_{C2} = \frac{\bar{Q}_{crue}}{\bar{Q}_{autres}} \quad (6.3)$$

où \bar{Q}_{crue} est le débit moyen journalier des mois de crue (mois de mars, avril et mai) de la série disponible, \bar{Q}_{autres} est le débit moyen journalier des autres mois de l'année. L'effet de laminage des crues aura pour conséquence de diminuer globalement le débit moyen en période de crue par rapport au débit moyen des autres mois et donc de diminuer cette valeur. Il est à noter que pour les stations situées entre 48°N et 50°N, les mois de crue considérés sont les mois d'avril, mai et juin en raison de la crue plus tardive dans cette région.

6.2.3. Indice 3 – Moyenne des rapports annuels du débit maximal et du débit moyen de crue

L'indice I_{C3} correspond à la moyenne interannuelle des rapports entre le débit maximal de crue pendant la période de crue (mars, avril et mai) et la moyenne des débits sur cette même période :

$$I_{C3} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{Q_{\max}^{(j)}}{\bar{Q}_{crue}^{(j)}} \quad (6.4)$$

où $Q_{\max}^{(j)}$ est le débit maximum enregistré pendant la période de crue (mois de mars, avril et mai) de l'année j , $\bar{Q}_{crue}^{(j)}$ est le débit moyen sur les autres jours de la période de crue pour l'année j et N est le nombre d'années disponibles. L'effet de laminage des crues aura pour conséquence de diminuer les débits maxima et donc de diminuer cette valeur. Il est à noter que pour les stations situées entre 48°N et 50°N, les mois de crue

considérés sont les mois d'avril, mai et juin en raison de la crue plus tardive dans cette région.

6.2.4. Indice 4 – Rapport maximal du débit maximal annuel et du débit moyen de crue

L'indice I_{C4} est défini comme la valeur maximale des rapports du débit annuel maximal de crue et de la valeur moyenne des débits en période de crue (mars, avril et mai excluant la valeur maximale de crue):

$$I_{C4} = \underset{j}{Max} \left\{ \frac{Q_{\max}^{(j)}}{\overline{Q}^{(j)}_{crue}} \right\} \quad (6.5)$$

Cet indice se base sur l'hypothèse que le barrage aura l'incidence la plus marquée sur le débit maximal enregistré au cours de toute la période d'enregistrement des débits.

6.2.5. Indice 5 - Coefficient de variation des débits maxima annuels

Le cinquième indice, I_{C5} , correspond au coefficient de variation des débits maxima annuels et est calculé comme suit :

$$I_{C5} = CV \left\{ \frac{Q_{\max}^{(j)}}{\overline{Q}^{(j)}_{crue}} \right\} \quad (6.6)$$

où $Q_{\max}^{(j)}$ est le débit maximum annuel. Dans une optique de contrôle des débits de crue par les barrages, la variabilité interannuelle des débits maxima annuels devrait diminuer et l'indice I_{C5} être plus petit que dans le cas où il n'y a aucun contrôle des débits de crue.

6.3. Indices liés aux étiages

Le deuxième type d'indice cherche à quantifier l'impact de l'opération des barrages sur les étiages. L'hypothèse de base est que l'opération d'un barrage pourra avoir pour

objectif, dans certains cas, de soutenir les débits d'étiage. Plusieurs indices d'étiage ont été considérés et s'inspirent largement des indices de crue présentés à la section précédente. Ces indices sont définis aux sections suivantes.

6.3.1. Indice 1 – Moyenne des rapports annuels du débit d'étiage et du débit sur le reste de l'année

L'indice I_{E1} correspond à la moyenne interannuelle des rapports annuels des débits moyens en période d'étiage (juillet et août) et la moyenne des débits durant les autres mois de l'année :

$$I_{E1} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\bar{Q}_{\text{étiage}}^{(j)}}{\bar{Q}_{\text{autres}}^{(j)}} \quad (6.7)$$

où $\bar{Q}_{\text{étiage}}^{(j)}$ est le débit moyen pendant la période d'étiage (mois de juillet et août) de l'année j , $\bar{Q}_{\text{autres}}^{(j)}$ est le débit moyen pendant les autres mois de l'année j et N est le nombre d'années disponibles. Le fait de soutenir les débits en période d'étiage devrait faire en sorte d'augmenter ce ratio aux stations influencées par un barrage.

6.3.2. Indice 2 – Rapport du débit moyen en période d'étiage et du débit moyen des autres mois

L'indice I_{E2} correspond à la moyenne du débit moyen en période d'étiage (juillet et août) pour toute la série de débit disponible et du débit moyen pendant les autres mois de l'année :

$$I_{E2} = \frac{\bar{Q}_{\text{étiage}}}{\bar{Q}_{\text{autres}}} \quad (6.8)$$

où $\bar{Q}_{\text{étiage}}$ est le débit moyen pendant les mois d'étiage (mois de juillet et août) de la série disponible, \bar{Q}_{autres} est le débit moyen durant les autres mois de l'année. Le soutien des étiages aura pour conséquence d'augmenter globalement le débit moyen en période

d'étiage par rapport au débit moyen des autres mois et donc d'augmenter la valeur de cet indice.

6.3.3. Indice 3 – Moyenne des rapports annuels du débit d'étiage 7 jours et du débit moyen en période d'étiage

L'indice I_{E3} correspond à la moyenne interannuelle des rapports entre le débit d'étiage 7 jours (valeurs minimales du débit moyen pendant 7 jours durant les mois de juillet et août) et la moyenne des débits pendant les mois d'étiage (juillet et août) :

$$I_{E3} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{Q_{7 \text{ jours}}^{(j)}}{\bar{Q}_{\text{étiage}}^{(j)}} \quad (6.9)$$

où $Q_{7 \text{ jours}}^{(j)}$ est le débit minimum moyen sur sept jours consécutifs pendant les mois de juillet et août de l'année j , $\bar{Q}_{\text{étiage}}^{(j)}$ est le débit moyen sur les autres jours de la période d'étiage pour l'année j et N est le nombre d'années disponibles. Le soutien des étiages aura pour conséquence d'augmenter ce rapport.

6.3.4. Indice 4 – Valeur minimale du rapport annuel du débit d'étiage 7 jours et du débit moyen d'étiage

L'indice I_{E4} est défini comme la valeur minimale du rapport annuel du débit d'étiage 7 jours et de la valeur moyenne des débits en période d'étiage (excluant la période de 7 jours où est enregistré le débit minimal 7 jours) :

$$I_{E4} = \underset{j}{\text{Min}} \left\{ \frac{Q_{7 \text{ jours}}^{(j)}}{\bar{Q}_{\text{étiage}}^{(j)}} \right\} \quad (6.10)$$

Cet indice se base sur l'hypothèse que l'influence du barrage sera la plus marquée lors de l'étiage le plus sévère de toute la période d'enregistrement.

6.3.5. Indice 5 - Coefficient de variation des débits minima d'étiage 7 jours

Le cinquième indice, I_{E5} , correspond au coefficient de variation des débits minima annuels d'étiage sur 7 jours et est calculé comme suit :

$$I_{E5} = CV \left\{ \frac{Q_{7 \text{ jours}}^{(j)}}{\bar{Q}_{\text{étiage}}^{(j)}} \right\} \quad (6.11)$$

où $Q_{7 \text{ jours}}$ est le débit minima annuel d'étiage sur 7 jours. La variabilité interannuelle de cette valeur devrait diminuer et l'indice I_{E5} être plus petit lorsque l'opération des barrages vise un soutien des débits d'étiage.

6.4. Indice combiné crue-étiage

Les résultats obtenus pour les indices de crue et d'étiage suggèrent de définir un indice qui combine à la fois de possibles effets sur la période de crue et la période d'étiage. Un tel indice permettrait de renforcer le signal de l'influence de l'opération des barrages sur les débits mesurés. Plusieurs options sont dès lors possible mais le plus naturel est de faire le rapport entre les débits moyens en période d'étiage et en période de crue :

$$I_{C-E} = \frac{\bar{Q}_{\text{étiage}}}{\bar{Q}_{\text{crue}}} \quad (6.12)$$

où $\bar{Q}_{\text{étiage}}$ est le débit moyen pour les mois de juillet et août et \bar{Q}_{crue} est le débit moyen pendant les mois de mars, avril et mai. Les mois de crue considérés pour les stations situées entre 48° et 50°N, sont les mois d'avril, mai et juin en raison de la crue plus tardive dans cette région.

6.5. Indice coefficient de variation

Cet indice mesure l'influence de l'opération des barrages à travers son impact sur la variabilité des débits. En effet, la capacité de stockage d'un barrage permet de laminer les débits de pointe, stocker une partie des volumes de crue et les restituer en période de faible hydraulité entraînant ainsi possiblement une diminution de la variabilité de la réponse hydrologique globale. L'indice retenu pour mesurer cette variabilité est le coefficient de variation des débits, I_{CV} , défini par :

$$I_{CV} = \frac{\sigma(Q)}{\bar{Q}} \quad (6.13)$$

où $\sigma(Q)$ est l'écart type de la série des débits et \bar{Q} la valeur moyenne des débits. Les débits considérés (journaliers, hebdomadaires ou mensuels) dépendront de l'échelle temporelle à l'étude. Bien que similaire dans une certaine mesure avec les indices précédents, car il tend à quantifier la variabilité de la réponse hydrologique, I_{CV} n'est pas spécifique à une période de l'année mais considère la réponse hydrologique annuelle.

6.6. Indice coefficient de corrélation

Les valeurs de débits enregistrés en une station sont temporellement corrélées entre elles. Cette autocorrélation des séries diminue au fur et à mesure que les deux valeurs sont mesurées à des temps distants l'un de l'autre (*lag*). Ainsi la corrélation entre les valeurs de débits à deux jours consécutifs sera plus grande que celle entre deux débits mesurés à dix jours d'écart. La présence et l'opération des barrages risquent de modifier ce schéma de corrélation et de fait augmente cette corrélation temporelle. Le critère de corrélation proposée, I_ρ , se calcule à partir de l'expression suivante :

$$I_\rho = \frac{\rho_{50}}{\rho_0} \quad (6.14)$$

où ρ_{50} et ρ_0 représentent respectivement la corrélation entre les débits séparés de 50 jours (*lag*) et la variance des débits. Ces coefficients se calculent à partir de l'équation :

$$\rho_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} (Q_i - \bar{Q})(Q_{i+k} - \bar{Q}) \quad (6.15)$$

où k représente l'intervalle de temps pour lequel on veut estimer l'autocorrélation, Q_j le débit au jour i , N la longueur de la série des débits journaliers et enfin \bar{Q} la moyenne des débits journaliers. Diverses valeurs de k ont été considérées et la valeur $k = 50$ jours a été retenue puisqu'elle permet, pour l'échantillon de stations disponible, de mieux distinguer les stations avec barrage en amont des stations en régime d'écoulement naturel.

CHAPITRE 7 : ÉTABLISSEMENT DES CRITÈRES D'INFLUENCE À PARTIR DES GROUPES DES STATIONS NATURELLES ET 'UNE STATION EN AVAL D'UN BARRAGE'

Le test d'unimodalité et les différents indices définis au Chapitre 6 ont été appliqués aux différentes stations. Préalablement, les stations ont été classées en différentes catégories selon leur latitude et la superficie des bassins versants en amont. L'examen du cas particulier que constitue les stations en aval de lacs est d'abord discuté à la Section 7.1 La Section 7.2 donne ensuite une description des catégories de latitude et de superficies considérées. Par la suite, les résultats relatifs au test d'unimodalité et aux indices sont présentés pour chacune de ces catégories. Le test d'unimodalité est traité à la Section 7.3, l'indice de crues à la Section 7.4, l'indice d'étiage à la Section 7.5, l'indice combiné crue-étiage à la Section 7.6, l'indice de variabilité des débits à la Section 7.7 et enfin l'indice de corrélation à la Section 7.8. La Section 7.9 dresse un résumé des résultats pour les différentes classes de stations naturelles et la section 7.10 présente l'ensemble des résultats pour le groupe une station en aval d'un barrage.

Les différents critères ont d'abord été appliqués aux séries de débits quotidiens. Trois des indices retenus, à savoir les indices de crue, d'étiage et de crue-étiage demeurent inchangés aux échelles hebdomadaires et mensuelles. Pour les deux autres (indices de variation et indice de corrélation), les séries des débits hebdomadaires et mensuels ont été construites en faisant respectivement la moyenne des débits quotidiens sur une base hebdomadaire et mensuelle. Le débit moyen hebdomadaire est estimé lorsque tous les débits quotidiens de la période considérée sont disponibles et valides, autrement le débit en question est considéré manquant. Pour le débit moyen mensuel, un seuil minimal de 70 % des débits quotidiens valides pour la période considérée a été imposé. Les différentes sections de ce chapitre se rapportant aux critères d'influence présentent d'abord les résultats des analyses pour les séries de débits quotidiens et ensuite pour les séries de débits moyens hebdomadaires et mensuels lorsque différents des résultats journaliers.

7.1. Considérations préliminaires : stations à l'exutoire de lacs

Les lacs peuvent modifier les débits en aval de façon similaire à un barrage. Un examen des stations naturelles localisées tout juste à la sortie de lacs a permis de montrer que, même si soumises à des conditions naturelles d'écoulement (absence de barrages), certaines stations présentent toutes les apparences de stations influencées (au sens décrit à ce chapitre). Ainsi, les stations 041903 et 042606, situées directement en aval des lacs Dumoine et Sairs, présentent des valeurs d'indices de crue, d'étiage, d'étiage-crue, de coefficient de variation (041903) et de corrélation (042606) qui s'apparentent aux valeurs observées pour les stations classées comme influencées. Les lacs en amont de ces deux stations sont relativement grands. Il est raisonnable de penser que, à l'instar des barrages, l'impact d'un lac dépend de sa capacité de stockage par rapport au débit caractéristique à son exutoire (voir Chapitre 10) et que, dès lors, le régime hydrologique des stations naturelles situées en aval de lacs de bonne dimension risque de s'apparenter davantage à un écoulement influencé par un barrage qu'à celui d'un écoulement dit naturel. Pour ces raisons, les deux stations précédentes (041903 et 042606) n'ont pas été considérées dans l'établissement des fourchettes de valeurs naturelles des indices d'influence.

Il est intéressant de noter que, pour le test d'unimodalité, la présence ou non de lacs ne semble pas déterminant.

7.2. Classification en fonction des latitudes et des superficies des bassins versants amonts

La Figure 7.1 présente les superficies des bassins versants en fonction de la latitude pour l'ensemble des stations hydrométriques retenues. Cette figure montre que les superficies des bassins versants tendent à augmenter lorsque la latitude augmente (les bassins jaugés du nord sont plus grands que ceux au sud).

Plusieurs statistiques des débits, et conséquemment plusieurs des indices définies au Chapitre 6, sont fortement corrélées à certaines caractéristiques telles la superficie du bassin versant et la latitude. Ainsi, par exemple, le débit moyen et la variabilité de la

réponse hydrologique dépendent de la superficie du bassin alors que la latitude a un impact majeur sur l'hydrogramme annuel et les cycles saisonniers. Afin de pouvoir comparer les indices aux différentes stations, ces dernières ont été regroupées en fonction de différentes classes de latitude et de superficies. L'objectif est de définir des classes pour lesquels les régimes d'écoulement des stations naturelles sont les plus homogènes possibles.

Le Tableau 7.1 illustre les différentes classes de latitude et de surface, de même que le nombre de stations dans chacune des classes pour les stations naturelles et les différentes configurations stations/barrages. Les limites définissant ces différentes classes demeurent, dans une certaine mesure, arbitraires. A noter que les résultats pour la classe de latitude-superficie ($[48,50[\text{ }^\circ\text{N}, \geq 4000 \text{ km}^2$) ne seront pas présentés puisque cette classe ne comporte aucune station avec barrage en aval (Tableau 7.1).

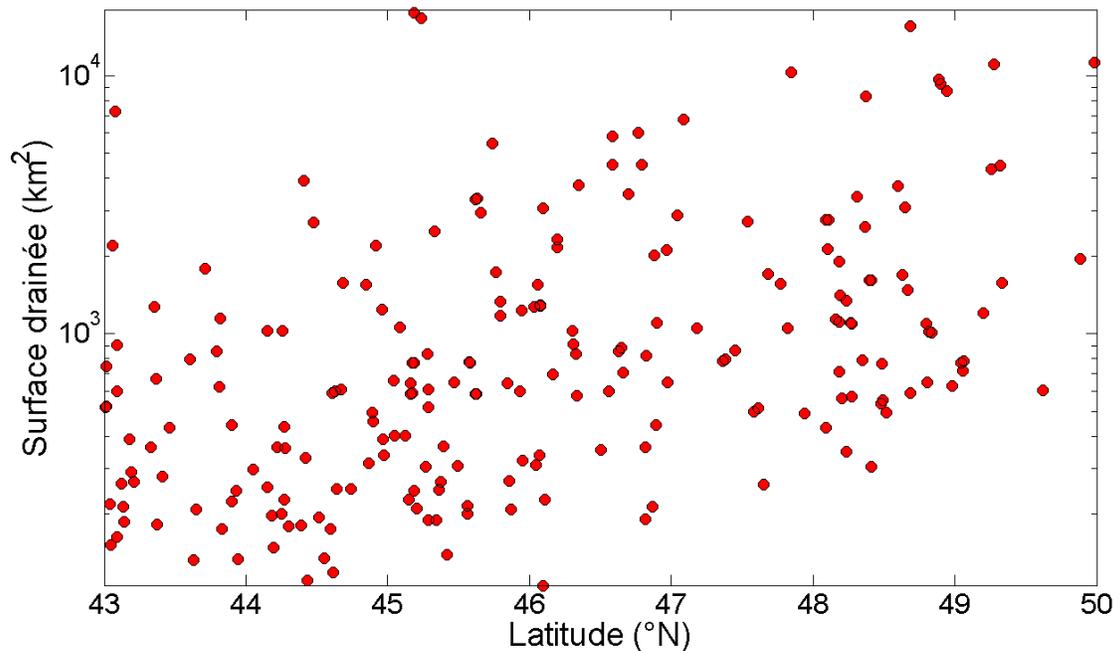


Figure 7.1 Superficies des bassins versant aux stations hydrométriques sous étude en fonction de la latitude.

Tableau 7.1 Nombre de stations pour les différentes classes de latitude et de superficie pour les stations naturelles et les différentes configurations stations/barrages. Les classes en gris sont celles considérées dans la suite de l'étude.

Groupe	Latitude (°N)	Superficie du bassin versant (km ²)		
		[100,1000[	[1000,4000[	≥ 4000
Stations naturelles	[43,44[	21	3	0
	[44,46[	47	5	0
	[46,48[	18	9	2
	[48,50[	17	21	12
'Une station en aval d'un barrage'	[43,44[	4	1	0
	[44,46[	8	4	0
	[46,48[	7	5	2
	[48,50[	1	4	0
'Plusieurs stations en aval d'un barrage'	[43,44[	2	0	0
	[44,46[	2	1	2
	[46,48[	3	4	1
	[48,50[	0	0	0
'Configurations mixtes stations/barrages'	[43,44[	2	0	1
	[44,46[	6	8	2
	[46,48[	2	2	1
	[48,50[	0	0	0

7.3. Test d'unimodalité

Le test d'unimodalité a d'abord été appliqué à l'ensemble des stations naturelles pour les séries de débits journaliers, hebdomadaires et mensuels. Une fois considérés les cas problématiques recensés à la Section 6.1.1, trois distributions des débits journaliers aux stations naturelles ont été classées non-unimodales au seuil de 95 % (Figure 7.2). Ces distributions correspondent aux stations Mistassini (062111; 49,32°N, -72,64°E; 4480 km²), Mégiscane (080717; 48,37°N, -77,12°E; 8310 km²) et Waswanipi (080718; 49,86°N, -77,19°E; 31964 km²). Ces stations ont en commun d'être situées au nord du Québec. L'application du test d'unimodalité à d'autres grands bassins situés dans des

latitudes supérieures à 51°N conduit également dans certains cas au rejet de l'hypothèse d'unimodalité. Une analyse détaillée des causes de cette non-unimodalité n'a pas été réalisée. Il n'est pas impossible qu'elle soit le résultat de conditions hydrologiques particulières par ailleurs tout à fait naturelles. Ce résultat montre qu'il faut demeurer prudent et que l'hypothèse d'unimodalité des distributions des débits journaliers pour les stations en régime naturel doit être vérifiée lorsque de nouvelles régions ou stations sont considérées. Il faut enfin noter qu'aucune des séries de débits moyens hebdomadaires ou mensuels aux stations naturelles n'est classée non-unimodale.

Les résultats de l'application du test d'unimodalité aux stations situées en aval de barrages (toutes configurations confondues) pour les distributions de débits journaliers, hebdomadaires et mensuels sont regroupés au Tableau 7.2 (seules les stations avec des distributions non-unimodales à l'une ou l'autre des résolutions temporelles sont présentées). Dix stations présentent des distributions non-unimodales uniquement pour les débits quotidiens, sept pour les débits quotidiens et hebdomadaires et une pour les débits quotidiens, hebdomadaires et mensuels. Ainsi, toutes les stations non-unimodales à l'échelle mensuelle sont également non-unimodales aux échelles hebdomadaire et quotidienne et toutes les stations non-unimodales à l'échelle mensuelle sont non-unimodales à l'échelle quotidienne.

L'unimodalité des distributions des débits mesurés aux stations naturelles et la non-unimodalité à certaines stations en aval de barrage, et ce à différentes échelles temporelles, montrent la pertinence de l'indicateur unimodalité pour caractériser l'influence des barrages sur les débits mesurés. De plus, le fait que lorsque la non-unimodalité est détectée à une résolution temporelle donnée (hebdomadaire ou mensuelle) alors les distributions aux résolutions plus fines sont également non-unimodales est conforme à l'intuition. L'indicateur unimodalité sera donc utilisé dans ce qui suit comme premier filtre permettant de quantifier le niveau d'influence des barrages sur les débits mesurés.

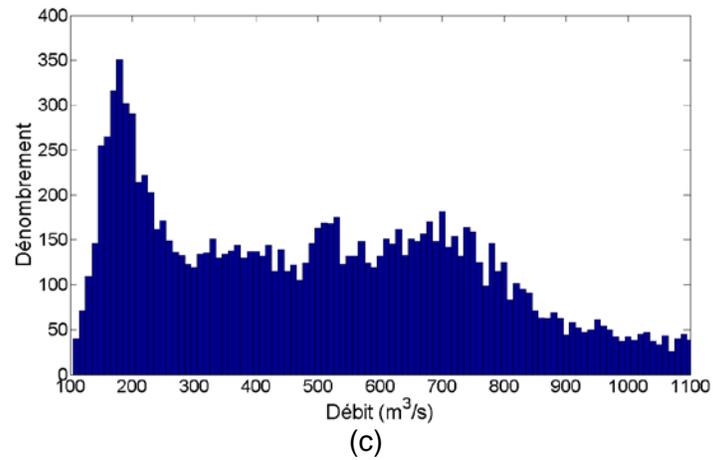
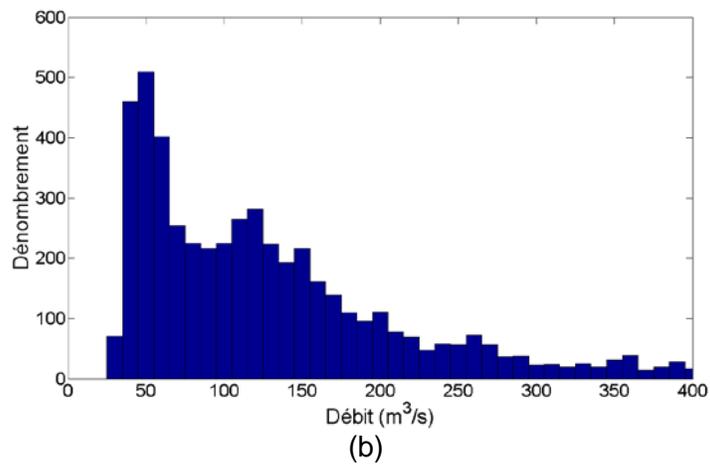
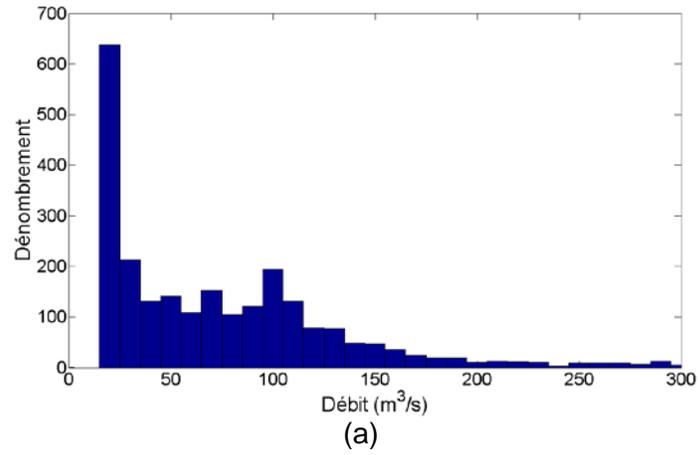


Figure 7.2 Histogrammes des débits journaliers (distributions non-unimodales) des stations naturelles : (a) Mistassini (062111; 49,32°N, -72,64°E; 4480 km²); (b) Mégiscane (080717; 48,37°N, -77,12°E; 8310 km²); et (c) Waswanipi (080718; 49,86°N, -77,19°E; 31964 km²).

Tableau 7.2 Liste des stations en aval d'un barrage dont les distributions des débits quotidiens, hebdomadaires ou mensuels sont non-unimodales (test d'unimodalité avec p-value < 0,05; les p-value en gras indiquent une distribution non-unimodale au seuil 95 %).

Numéro de la station	Nom du barrage	p-value (quotidien)	p-value (hebdo.)	p-value (mensuel)
048603	Kipawa	< 0,001	< 0,001	0,016
030225	Jules-Allard	< 0,001	0,030	0,782
040627	Kiamika	< 0,001	< 0,001	0,994
040619	Mitchinamecus	< 0,001	0,021	0,989
061004	Portage-des-Roches	0,031	0,032	0,961
1064000	Eel Weir	< 0,001	< 0,001	0,107
4257000	Stillwater - North Dam	< 0,001	< 0,001	1,000
043003	Bourque	0,004	0,638	1,000
050807	Duchesnay.	< 0,001	0,069	0,993
022505	Morin	< 0,001	0,953	1,000
030220	North Hatley	< 0,001	0,503	0,817
011707	Témiscouata	< 0,001	0,524	0,523
040406	X0002813	< 0,001	0,612	0,981
061602	Des Commissaires	< 0,001	0,571	0,936
4261000	Cranberry Lake	< 0,001	0,744	0,791
1072100	Milton Three Ponds Dam	0,009	0,991	0,997
1019000	West Grand Lake	< 0,001	0,404	0,78

7.4. Indice de crue

Les indices de crue définis au Chapitre 6 ont été comparés et l'indice permettant de mieux discriminer les stations naturelles des stations avec un barrage amont a été retenu. La Figure 7.3 présente les résultats pour l'indice de crue retenu et est utilisée afin d'expliquer l'approche utilisée (l'approche utilisée pour la sélection des autres indices étant similaire). Il convient de noter que cet indice (de même que les indices d'étiage -Section 7.5 - et de crue-étiage - Section 7.6), prend exactement la même forme lorsque les débits hebdomadaires et mensuels moyens sont considérés. Ainsi, selon cet indice lorsque les débits journaliers à une station sont influencés par le barrage, alors les débits hebdomadaires et mensuels le seront aussi.

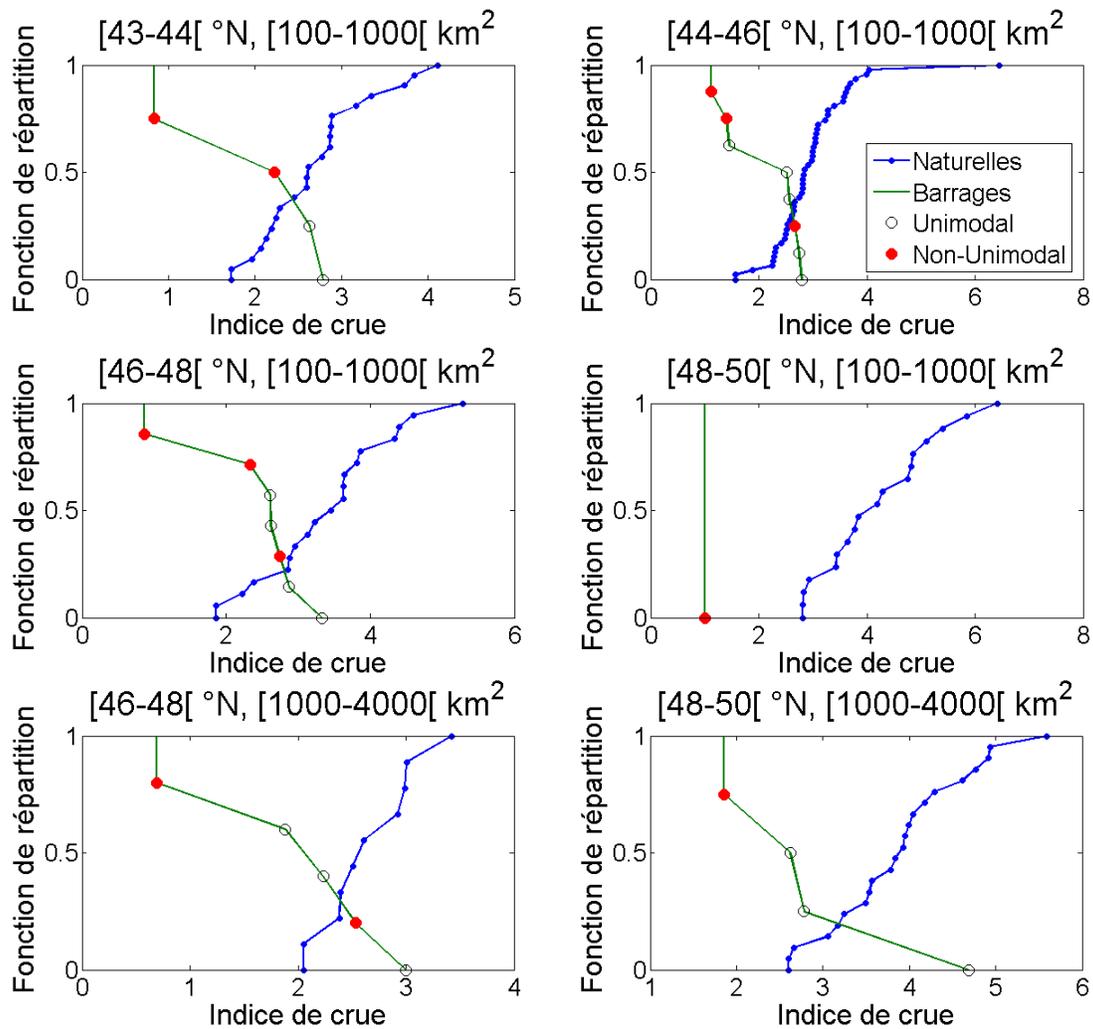


Figure 7.3 Fonctions de répartition (F) de l'indice de crue (I_{C2}) (quotidien, hebdomadaire et mensuel) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-surface. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits quotidiens sont non-unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits quotidiens unimodales.

La fonction de répartition de l'indice pour les stations naturelles définit la gamme de valeurs « naturelles » rencontrées pour ce type de stations. L'hypothèse de base est que, lorsque l'indice d'une station avec barrage en amont se trouve à l'extérieur de cette gamme de valeurs, alors les débits mesurés à cette station s'écartent suffisamment de la fourchette des valeurs aux stations dites naturelles pour conclure à l'influence effective du barrage sur ces débits. Considérant la classe contenant le plus grand nombre de stations, soit la classe de superficie [100,1000] km² et de latitude [44,46]° N. (graphique du haut à droite de la Figure 7.3), 38 % des stations avec barrage (3/8) présente des indices I_{C2} inférieures aux valeurs des stations naturelles. Bien que moins discriminant pour les autres classes de stations, certaines valeurs de cet indice sont tout de même inférieures aux valeurs des stations naturelles. Le caractère plus ou moins discriminatoire d'un indice est déterminé par la fraction des stations avec barrages qui se trouvent à l'extérieur de la fourchette des valeurs des stations naturelles. Dans le cas des indices de crue définis au Chapitre 6, l'indice I_{C2} est le plus discriminatoire et est donc retenu pour la suite des analyses.

7.5. Indice d'étiage

La sélection de l'indice d'étiage s'est effectuée selon la même procédure que pour l'indice de crue. De tous les indices considérés, l'indice I_{E2} apparaît comme le plus discriminatoire. La Figure 7.4 présente les fonctions de répartition pour les stations naturelles et avec barrages (groupe 'une station en aval d'un barrage') pour les différentes classes de surfaces et de latitudes. Près de 38 % (3/8) des stations avec barrage de la classe de superficie [100,1000] km² et de latitude [44, 46]°N présentent dans ce cas des valeurs de l'indice d'étiage plus grandes que les valeurs aux stations naturelles. Tout comme l'indice de crue, les valeurs de l'indice d'étiage restent les mêmes aux échelles hebdomadaires et mensuelles.

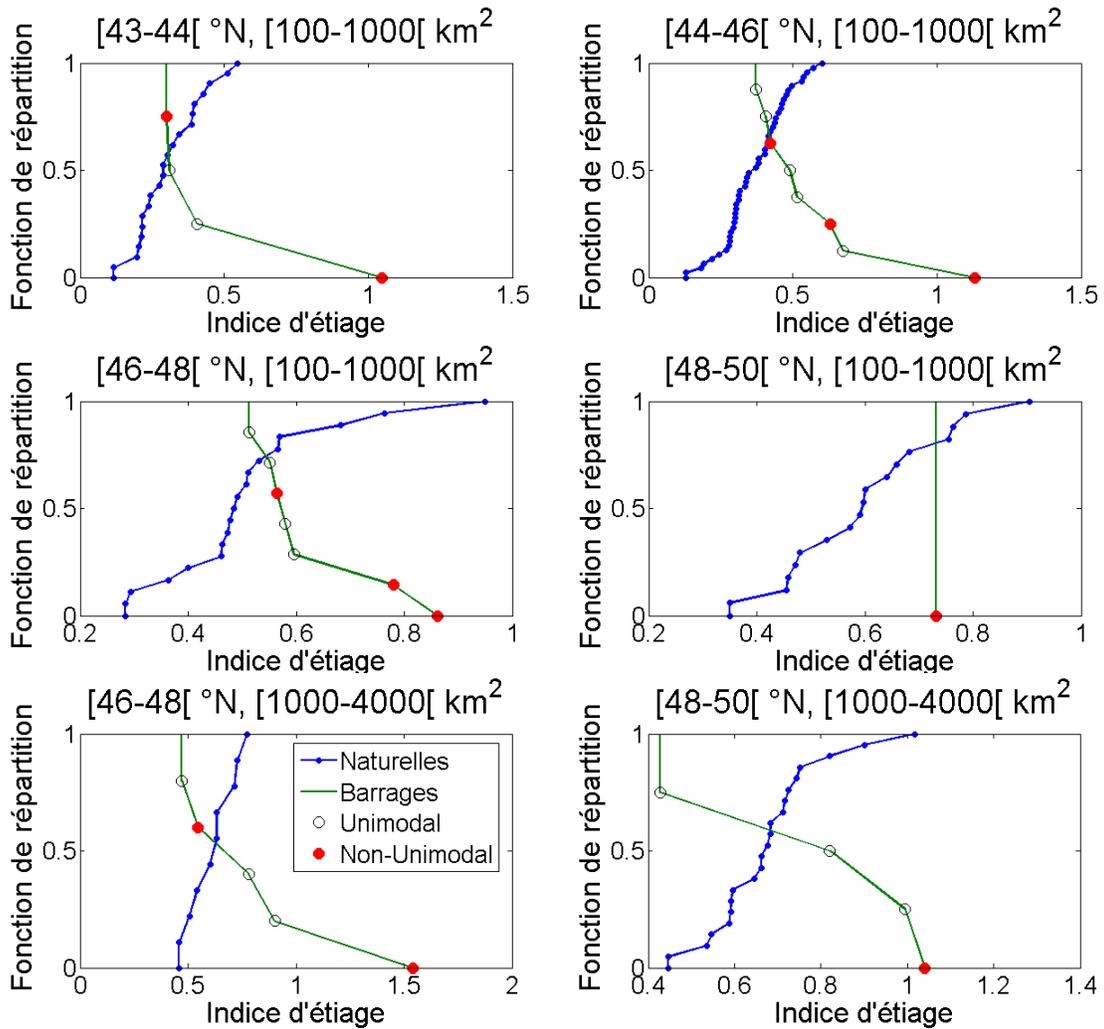


Figure 7.4 Fonctions de répartition (F) de l'indice d'étiage (I_{E2}) (quotidien, hebdomadaire et mensuel) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-superficie. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits quotidiens sont non-unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits quotidiens unimodales.

7.6. Indice crue-étiage

La Figure 7.5 présente les fonctions de répartition pour les stations naturelles et avec barrages (groupe 'une station en aval d'un barrage') pour l'indice combiné crue-barrage. Bien que cet indice ne permette pas de distinguer l'influence des barrages pendant les périodes de crue et d'étiage, puisqu'il examine l'effet combiné de ces deux influences, l'hypothèse est que le signal pourrait être plus fort que lorsque les deux indices sont considérés séparément. Les résultats sont toutefois similaires à ceux obtenus pour

l'indice d'étiage et l'indice de crue. En effet, la fraction de stations avec barrages ayant des valeurs d'indices inférieures aux valeurs naturelles est de 3/8 pour l'indice de crue (Figure 7.3), 3/8 pour l'indice d'étiage (Figure 7.4) et de 3/8 pour l'indice combiné (Figure 7.5), dans le cas des stations avec barrage de la classe de superficie [100,1000] km² et de latitude [44, 46]°N. Les valeurs de cet indice demeurent inchangées aux échelles hebdomadaires et mensuelles.

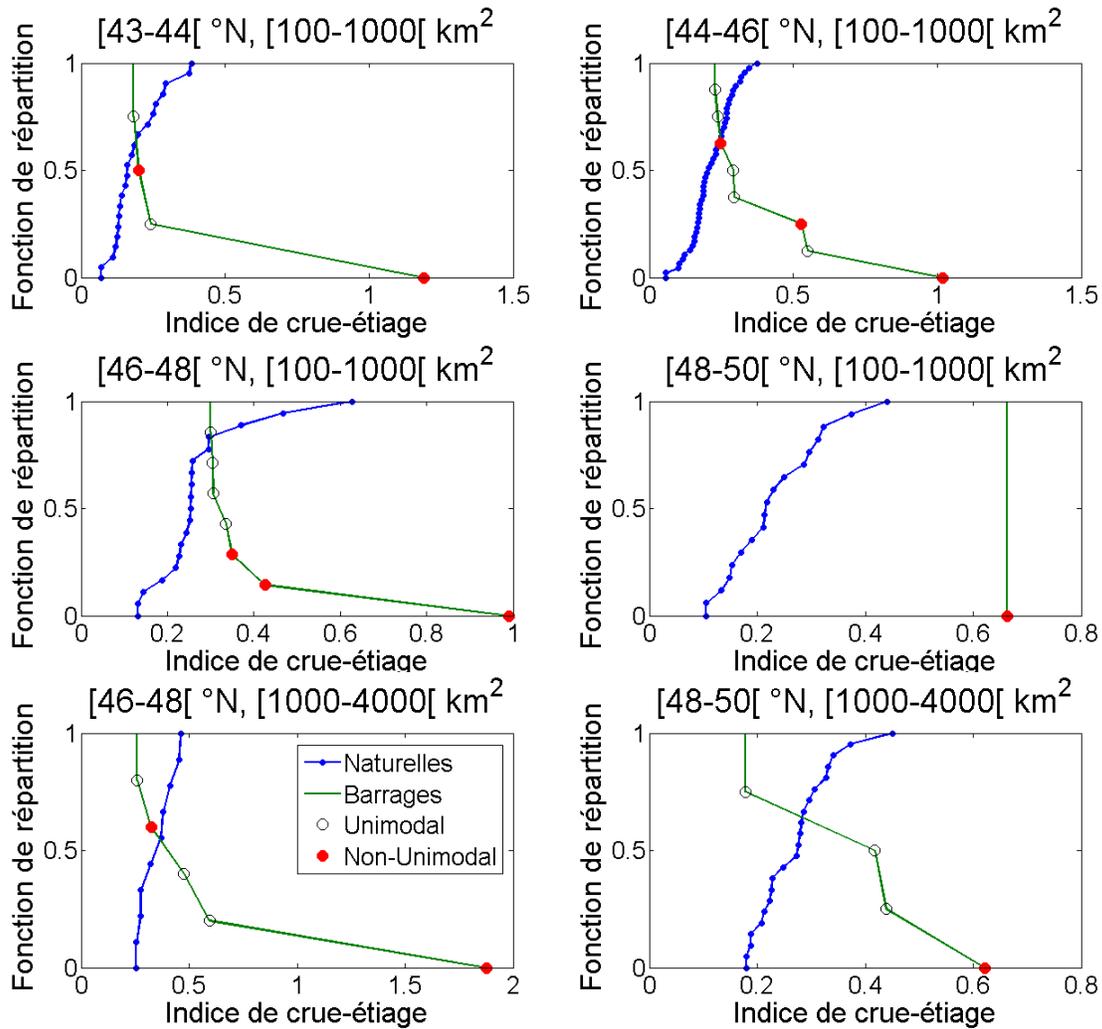


Figure 7.5 Fonctions de répartition (F) de l'indice combiné crue-étiage (I_c) (quotidien, hebdomadaire et mensuel) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-superficie. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits quotidiens sont non-unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits quotidiens unimodales.

7.7. Indice coefficient de variation

La Figure 7.6 présente les fonctions de répartition pour les stations naturelles et avec barrages (groupe une station en aval d'un barrage) pour l'indice coefficient de variation à l'échelle quotidienne. On constate que pour les stations avec barrage, certaines valeurs sont inférieures aux valeurs minimales observées dans les différentes classes latitude-superficie, suggérant que la présence des barrages tend à diminuer globalement la variabilité de la réponse hydrologique. Le pouvoir discriminant de cet indice demeure somme toute modeste. En effet, seulement six stations avec barrages sur un total de 29 stations (environ 20 %) ont des coefficients de variations à l'extérieur des valeurs des stations naturelles.

Les Figures 7.7 et 7.8 présentent les fonctions de répartition pour les stations naturelles et avec barrages pour l'indice coefficient de variation aux échelles hebdomadaire et mensuelle respectivement.

7.8. Indice coefficient de corrélation

Les fonctions de répartition aux stations naturelles et avec barrages (groupe 'une station en aval d'un barrage') pour l'indice coefficient de corrélation sont présentées aux Figures 7.9 (échelle quotidienne), 7.10 (échelle hebdomadaire) et 7.11 (échelle mensuelle). Globalement le coefficient de corrélation semble croître légèrement aux stations situées en aval de barrage. C'est donc dire que la présence du barrage tendrait à faire augmenter l'autocorrélation sur 50 jours des séries de débits quotidiens. A noter toutefois que deux stations avec barrage possèdent des valeurs légèrement inférieures à la valeur minimale de leur classe respective (latitude-superficie [46,48[°N, [1000,4000] km², et [44,46[°N, [100,1000] km²). Ces stations ont été classées comme influencées puisqu'il est permis de penser que la présence du barrage et son opération pourrait avoir comme conséquence de décorrélérer les séries dans certains cas.

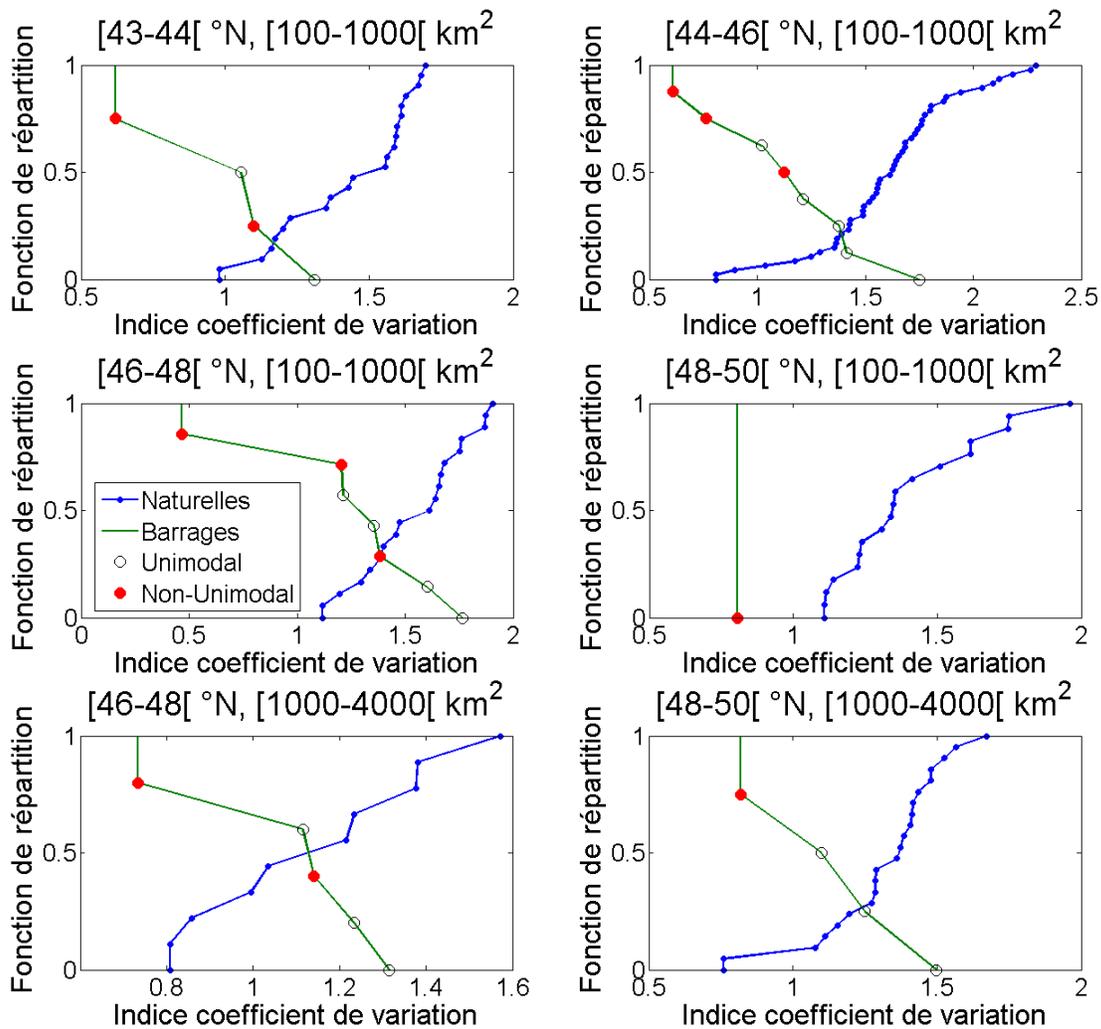


Figure 7.6 Fonctions de répartition (F) de l'indice coefficient de variation (I_{cv}) (quotidien) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-surface. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits quotidiens sont non-unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits quotidiens unimodales.

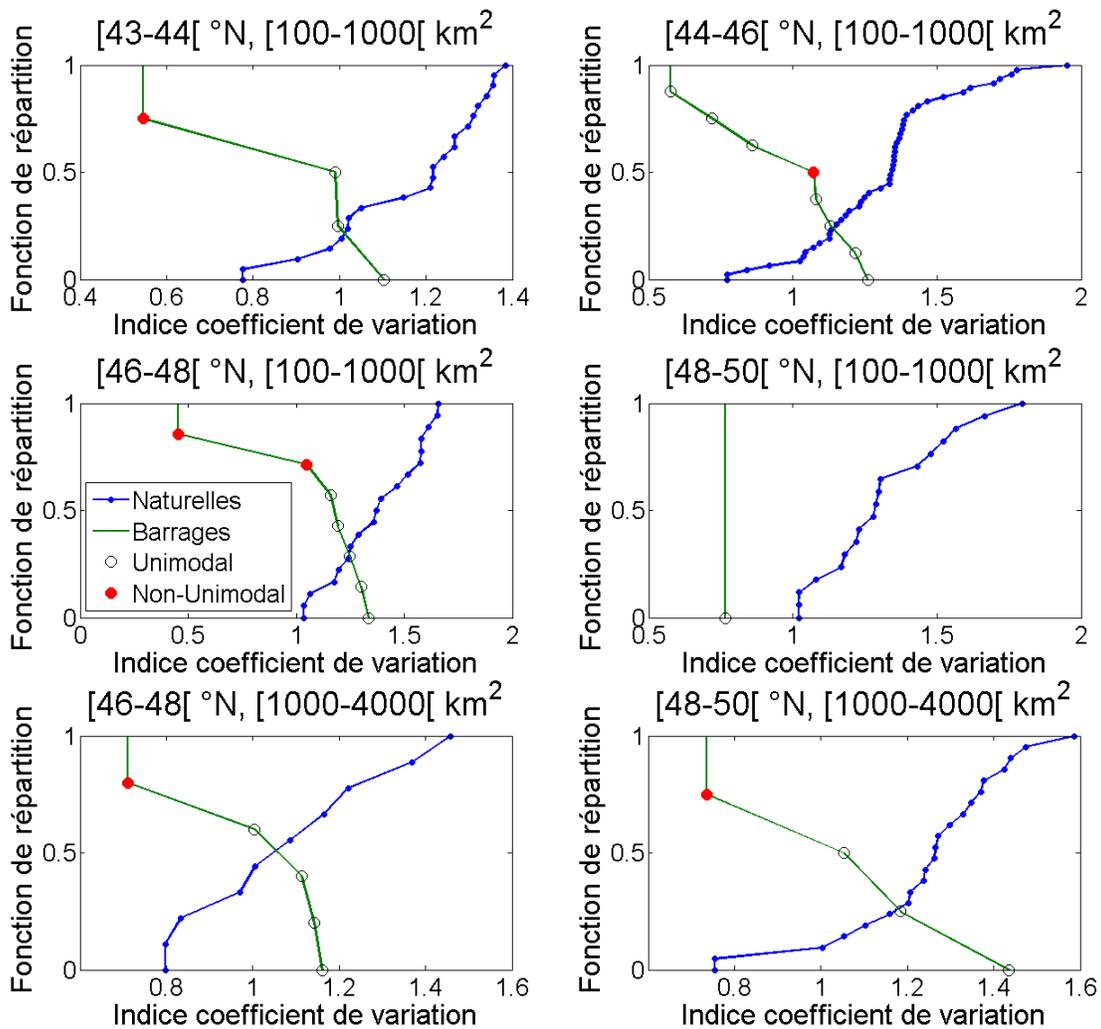


Figure 7.7 Fonctions de répartition (F) de l'indice coefficient de variation (I_{cv}) (hebdomadaire) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-superficie. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits hebdomadaires sont unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits hebdomadaires non-unimodales.

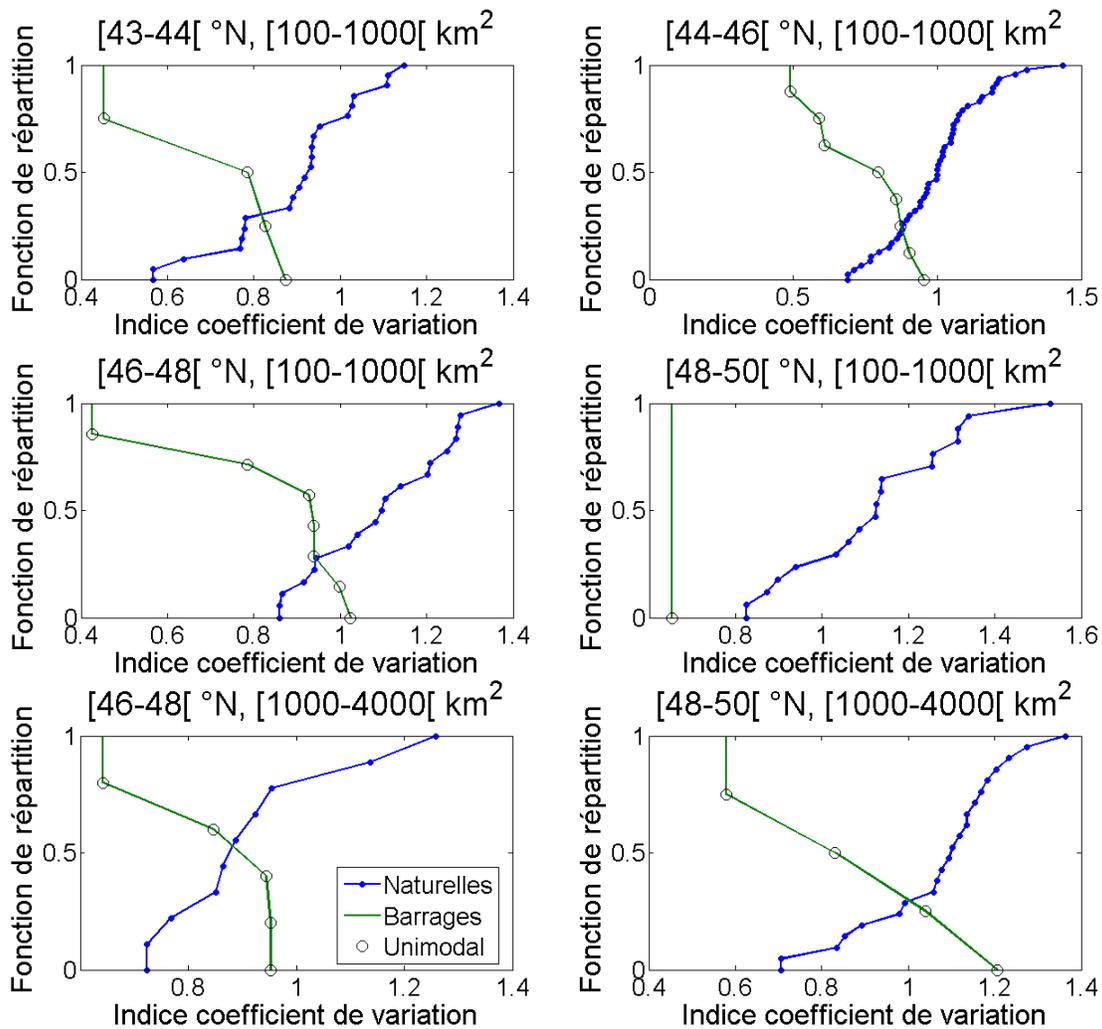


Figure 7.8 Fonctions de répartition (F) de l'indice coefficient de variation (I_{cv}) (mensuel) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-surface. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits mensuels sont unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits mensuels non-unimodales.

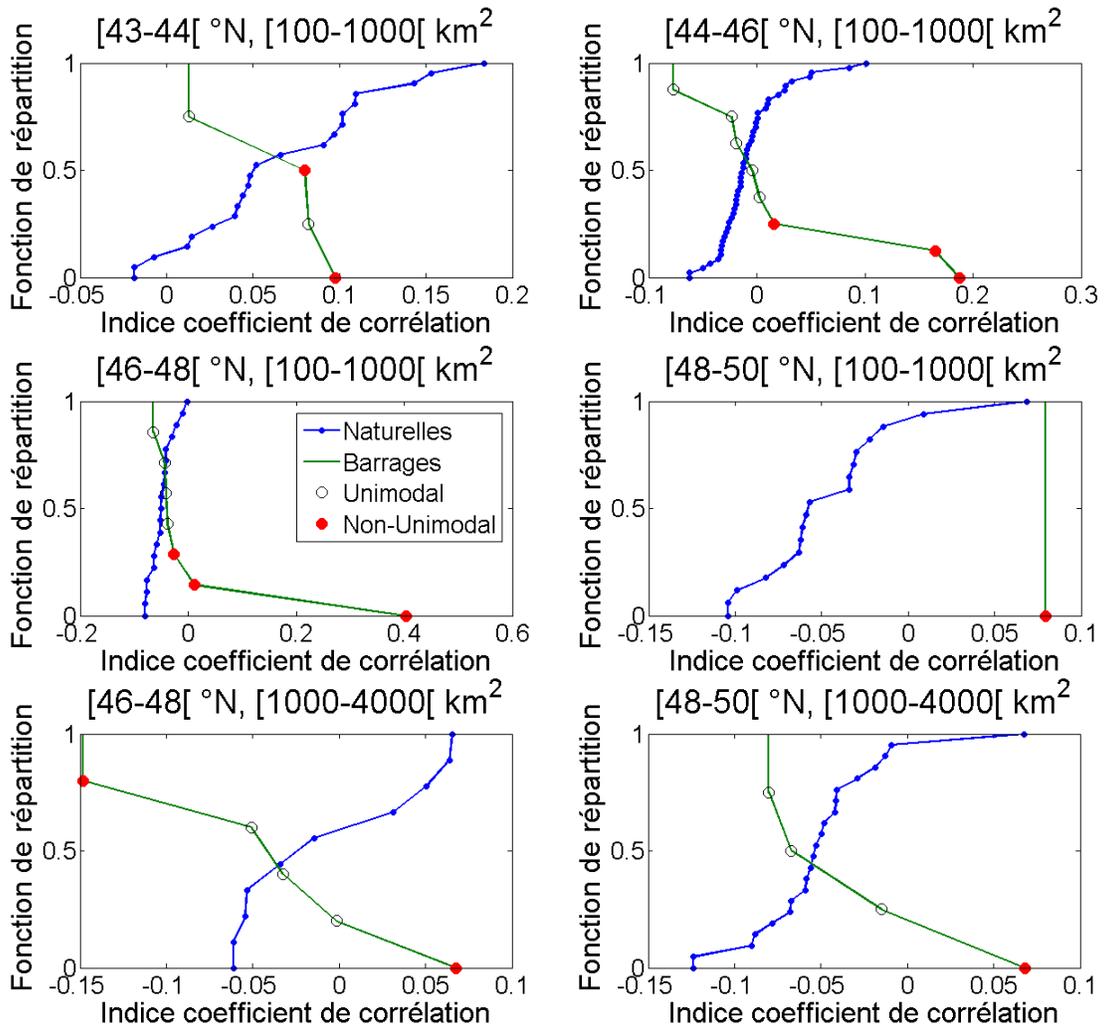


Figure 7.9 Fonctions de répartition (F) de l'indice coefficient de corrélation (I_ρ) (quotidien) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-surface. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits quotidiens sont unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits quotidiens non-unimodales.

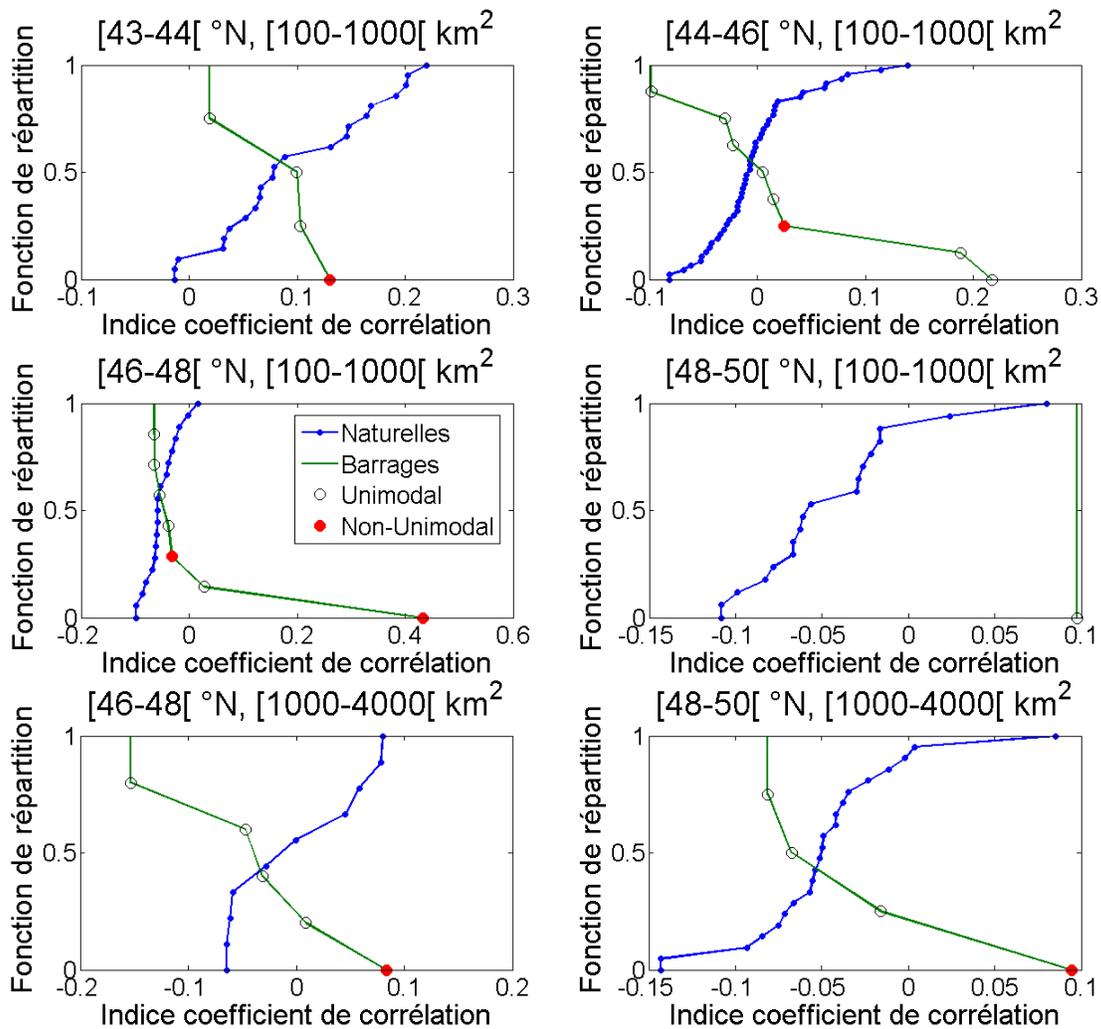


Figure 7.10 Fonctions de répartition (F) de l'indice coefficient de corrélation (I_ρ) (hebdomadaire) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-surface. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits hebdomadaires sont non-unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits hebdomadaires unimodales.

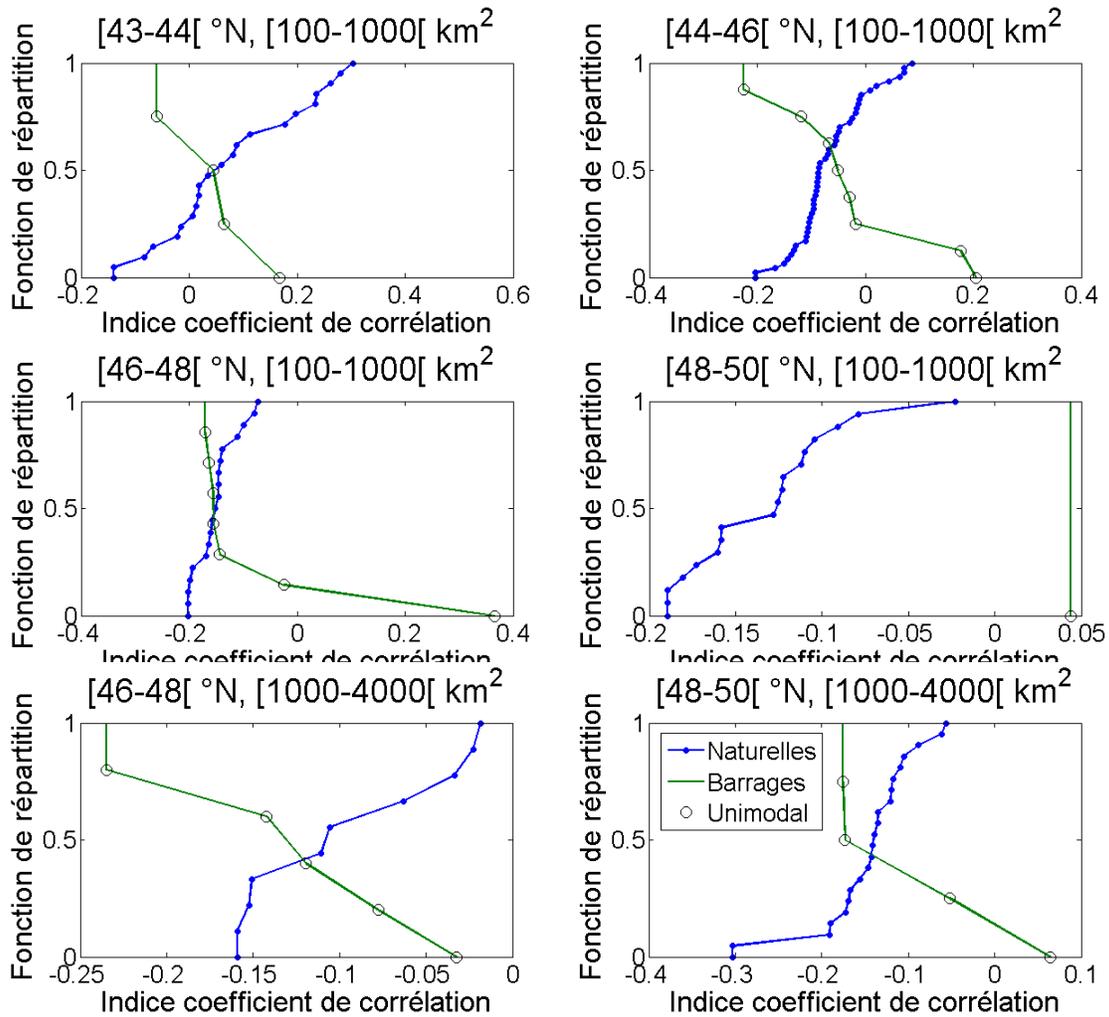


Figure 7.11 Fonctions de répartition (F) de l'indice coefficient de corrélation (I_p) (mensuel) pour les stations naturelles (courbes bleues) et fonctions de répartition complémentaire (1-F) des stations du groupe une station en aval d'un barrage (courbes vertes) pour les différentes classes latitude-surface. Les points rouges identifient les stations dont les distributions des débits mensuels sont non-unimodales alors que les cercles identifient les stations avec distributions de débits mensuels unimodales.

7.9. Valeurs représentatives des indices en régime naturel d'écoulement

Les valeurs des différents indices aux stations naturelles ont permis de définir les gammes de valeurs représentatives des régimes naturelles pour chacune des classes de latitude-superficie et chacune des échelles temporelles. Ces valeurs sont regroupées aux Tableaux 7.3 (échelle quotidienne), 7.4 (échelle hebdomadaire) et 7.5 (échelle mensuelle) et les Figures 7.12 et 7.13 présentent les versions graphiques de ces mêmes résultats. L'examen de la Figure 7.12 montre très bien les variations de certains indices entre classes de latitude. Ainsi, pour l'indice étiage les valeurs diminuent de façon globale lorsque la latitude diminue, suggérant une propension à avoir des étiages plus sévères au sud. Pour le coefficient de corrélation, l'effet inverse est observé, à savoir une augmentation de cet indice lorsque la latitude diminue ce qui tendrait à indiquer une corrélation plus importante des séries de débit pour les régions plus au sud. Considérant que le coefficient de corrélation utilise un décalage de 50 jours, il n'est pas surprenant de voir la corrélation augmenter puisqu'un des éléments clef définissant la corrélation à cette échelle temporelle est précisément la crue printanière qui sera moins importante et moins bien synchronisée au sud.

L'effet des classes de superficie sur les indices est moins probant puisqu'un nombre restreint de classes a été défini en raison du nombre insuffisants de stations dans certaines classes. Ainsi pour la classe de latitude $[48,50]^\circ\text{N}$, une augmentation de la superficie entraîne une diminution des indices de crue et du coefficient de variation, une diminution des indices d'étiage et de crue-étiage alors que l'effet sur l'indice de corrélation reste incertain. À noter enfin que les fourchettes de valeurs des indices en régime naturel pour les classes latitude-superficie $[46,48]^\circ\text{N}$, $[100,4000] \text{ km}^2$ et $[48,50]^\circ\text{N}$, $\geq 4000 \text{ km}^2$ sont très certainement sous-estimées puisqu'elles ont été estimées à partir d'échantillons de 10 et 12 stations respectivement.

Tableau 7.3 Valeurs minimales et maximales des fourchettes de valeurs pour les débits quotidiens aux stations en régime naturel d'écoulement pour les différentes classes de latitude et de superficie. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N ; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N ; L4 : [48,50[°N ; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km². Les fourchettes des valeurs pour les indices calculés à partir des débits quotidiens, hebdomadaires et mensuels sont les mêmes pour les indices de crue, d'étiage et de crue-étiage.

Indice	Classe latitude-superficie						
	(L1,S1)	(L2,S1)	(L3,S1)	(L4,S1)	(L3,S2)	(L4,S2)	(L4,S3)
Crue	[1,72, 4,12]	[1,57, 6,44]	[1,86, 5,29]	[2,81, 6,41]	[2,05, 3,42]	[2,60, 5,59]	[1,74, 3,54]
Étiage	[0,12, 0,55]	[0,13, 0,60]	[0,28, 0,95]	[0,35, 0,90]	[0,46, 0,77]	[0,45, 1,02]	[0,72, 1,22]
Crue - étiage	[0,07, 0,38]	[0,06, 0,37]	[0,13, 0,63]	[0,11, 0,44]	[0,26, 0,46]	[0,18, 0,45]	[0,34, 0,66]
Coefficient de variation	[0,98, 1,70]	[0,81, 2,29]	[1,12, 1,91]	[1,11, 1,96]	[0,81, 1,57]	[0,76, 1,67]	[0,64, 1,33]
Coefficient de corrélation	[-0,02, 0,18]	[-0,06, 0,10]	[-0,08, -0,00]	[-0,10, 0,07]	[-0,06, 0,07]	[-0,12, 0,07]	[-0,07, 0,12]

Tableau 7.4 Valeurs minimales et maximales des fourchettes de valeurs pour les débits hebdomadaires aux stations en régime naturel d'écoulement pour les différentes classes de latitude et de superficie. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N ; L4 : [48,50[°N ; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km². Les fourchettes des valeurs pour les indices calculés à partir des débits quotidiens, hebdomadaires et mensuels sont les mêmes pour les indices de crue, d'étiage et de crue-étiage (voir Tableau 7.3).

Indice	Classe latitude-superficie						
	(L1,S1)	(L2,S1)	(L3,S1)	(L4,S1)	(L3,S2)	(L4,S2)	(L4,S3)
Coefficient de variation	[0,78, 1,38]	[0,77, 1,95]	[1,04, 1,66]	[1,02, 1,80]	[0,80, 1,46]	[0,75, 1,59]	[0,63, 1,28]
Coefficient de corrélation	[-0,01, 0,22]	[-0,08, 0,14]	[-0,10, 0,02]	[-0,11, 0,08]	[-0,06, 0,08]	[-0,14, 0,09]	[-0,07, 0,14]

Tableau 7.5 Valeurs minimales et maximales des fourchettes de valeurs pour les débits mensuels aux stations en régime naturel d'écoulement pour les différentes classes de latitude et de superficie. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N; L4 : [48,50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km². Les fourchettes des valeurs pour les indices calculés à partir des débits quotidiens, hebdomadaires et mensuels sont les mêmes pour les indices de crue, d'étiage et de crue-étiage (voir Tableau 7.3).

Indice	Classe latitude-superficie						
	(L1,S1)	(L2,S1)	(L3,S1)	(L4,S1)	(L3,S2)	(L4,S2)	(L4,S3)
Coefficient de variation	[0.57, 1.15]	[0.69, 1.44]	[0.86, 1.37]	[0.82, 1.53]	[0.72, 1.26]	[0.71, 1.36]	[0.60, 1.03]
Coefficient de corrélation	[-0.14, 0.30]	[-0.20, 0.09]	[-0.20, -0.07]	[-0.19, -0.02]	[-0.16, -0.02]	[-0.30, -0.06]	[-0.20, -0.02]

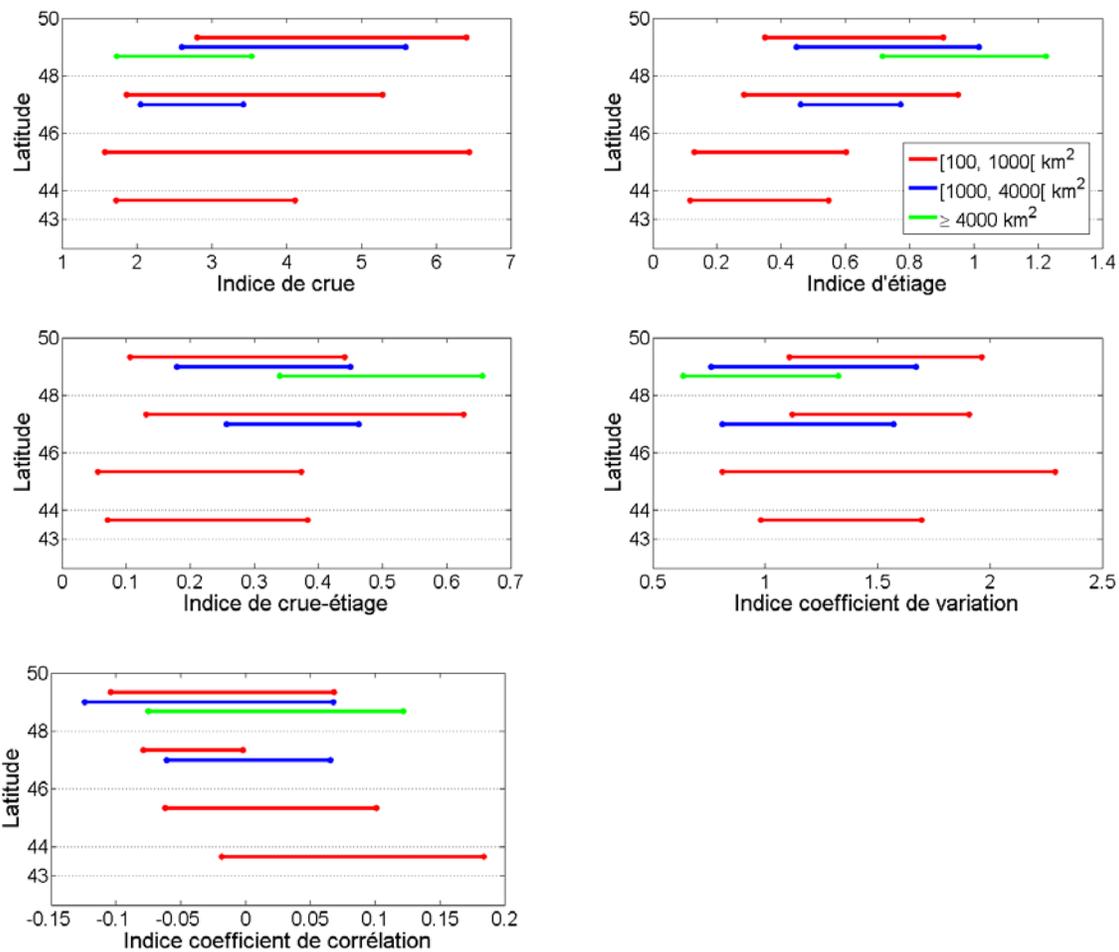
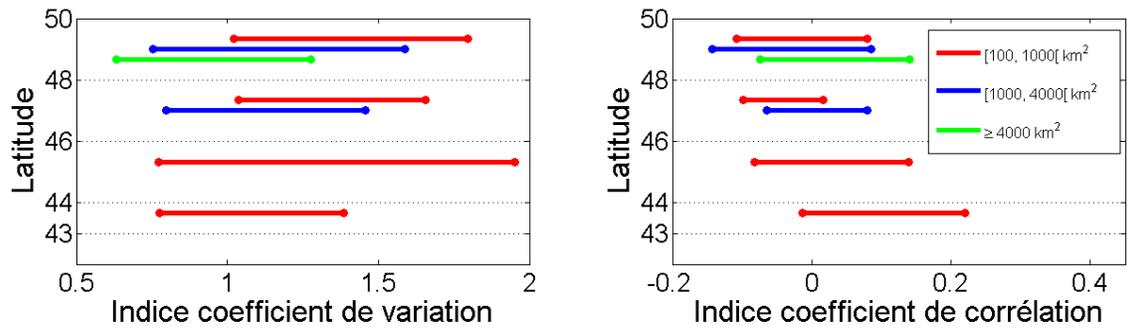
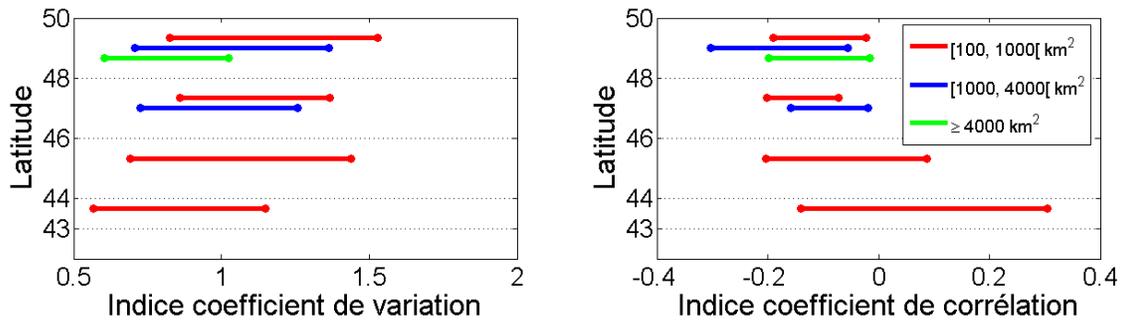


Figure 7.12 Fourchettes des valeurs des indices en régime naturel à l'échelle quotidienne pour les différentes classes de latitude-superficie.



(a)



(b)

Figure 7.13 Fourchettes des valeurs des indices coefficient de variation et de corrélation en régime naturel aux échelles (a) hebdomadaires et (b) mensuelles pour les différentes classes de latitude-superficie.

7.10. Synthèse des résultats pour le groupe ‘une station en aval d’un barrage’

Les Tableaux 7.6, 7.7 et 7.8 résument l'ensemble des résultats des différents indices aux 29 stations du groupe une station en aval d'un barrage pour les débits quotidiens, hebdomadaires et mensuels respectivement. Le fait de considérer et de combiner les résultats des différents indices permet de déterminer une possible influence des barrages à travers plusieurs caractéristiques de la réponse hydrologique. Dès lors une station sera dite influencée si au moins un critère (test ou indices) indique une influence. Rappelons que pour un indice spécifique, il y a influence si la valeur de cet indice est à l'extérieure de la fourchette de valeurs aux stations naturelles.

Le Tableau 7.9 présente les résultats aux stations pour les différentes échelles temporelles. Des 29 stations du groupe une station en aval d'un barrage 15 ($\approx 52\%$) sont classées comme influencées à l'échelle quotidienne, 13 à l'échelle hebdomadaire ($\approx 45\%$), 14 à l'échelle mensuelle ($\approx 48\%$). Le test d'unimodalité s'avère le plus sensible puisque 12 stations sont influencées selon ce test, et trois stations sont classées influencées uniquement par ce test. L'indice crue-étiage vient au second rang avec 10 stations influencées. Il est par ailleurs rassurant de constater que toutes les stations influencées selon cet indice le sont également soit par l'indice étiage, soit par l'indice crue ou par les deux indices. Certes les indices de crue et d'étiage pourraient être éliminés au profit de l'indice crue-étiage mais l'utilisation de deux indices distincts permet de discerner l'influence distincte sur les étiages ou les crues, ce qui peut s'avérer intéressant pour certaines applications. Enfin, les indices des coefficients de variation et de corrélation sont influencés pour 6 et 8 stations respectivement à l'échelle quotidienne et 9 et 9 à l'échelle mensuelle. Seulement deux stations identifiées comme influencées par l'un ou l'autre de ces indices n'ont pas également été classées influencées par un autre indice/test. A priori ces indices pourraient donc être éliminés puisqu'apparemment ils apportent peu d'informations supplémentaires par rapport aux autres critères.

La station 051001 en aval du barrage des Marches Naturelles a été classée dans la catégorie influencée selon les indices étiages et crue-étiage. Il est important de noter toutefois que le nombre de stations naturelles utilisées pour cette classe de latitude-superficie ($[46,48]^\circ\text{N}$, $[100,4000] \text{ km}^2$ ou L3,S2) est seulement de 9 et que donc les fourchettes de valeurs naturelles risquent d'être sous-estimées (ce que suggère d'ailleurs la Figure 7.12 pour les indices de crue et d'étiage). Considérant les valeurs des indices d'étiage (0,78 pour la station 051001 alors que la valeur minimale des stations naturelles est de 0,77) et de l'indice de crue-étiage (0,48 pour la station 051001 alors que la valeur minimale des stations naturelles est de 0,46), on peut penser que cette station serait possiblement classée non-influencée si l'échantillon de stations naturelles était plus grand. Pour les autres stations de cette même classe de latitude-superficie, les valeurs des indices sont, dans plusieurs cas, largement à l'extérieur des fourchettes naturelles et donc l'effet de sous-échantillonnage est moins critique.

Tel que mentionnée à la Section 4.2, le volume moyen de stockage du réservoir (*'Normal storage'*) est disponible pour les barrages aux États-Unis. Même si cette valeur

est comparable dans de très nombreux cas à la capacité du réservoir (*'Maximum storage'*), certains barrages présentent de très grandes différences entre ces deux valeurs. C'est le cas notamment du barrage Brownville (7302) en amont de la station 1033500 - groupe (L2,S1). Dans le cas du barrage Brownville, les volumes maximal et moyen sont respectivement de $31,6 \times 10^6$ et $0,414 \times 10^6 \text{m}^3$ (ratio de 76 pour 1). Ces différences suggèrent que ce réservoir est nettement sous-utilisé et que la capacité effective de stockage est bien inférieure à la capacité maximale du réservoir. Cette différence a une incidence sur l'interprétation à donner à l'indice IRI puisque, malgré un IRI relativement élevé, la capacité effectivement utilisée est nettement moindre que la capacité maximale de réserve.

Tableau 7.6 Tableau comparatif des différents indices du groupe de stations 'une station en aval d'un barrage' (débits quotidiens). Les zones en gris indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N; L4 : [48,50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².

Classe latitude-superficie	Numéro de station	Critère d'évaluation de l'influence des barrages					
		Test d'unimodalité (p-value)	Indice				
			Crue	Étiage	Crue-étiage	Coefficient de variation	Coefficient de corrélation
(L1,S1)	1348000	0,17	2,79	0,31	0,18	1,31	0,01
	1065000	1,00	2,63	0,41	0,24	1,05	0,08
	1072100	< 0,001	2,23	0,30	0,20	1,10	0,08
	4257000	< 0,001	0,84	1,05	1,19	0,62	0,10
(L2,S1)	030215	1,00	2,52	0,49	0,29	1,38	0,00
	030314	1,00	2,56	0,37	0,23	1,75	-0,02
	1033500	1,00	2,74	0,41	0,24	1,41	-0,02
	023427	1,00	2,80	0,51	0,29	1,21	0,00
	030220	< 0,001	2,67	0,42	0,25	1,13	0,02
	4261000	< 0,001	1,40	0,63	0,53	0,61	0,19
	030351	0,60	1,44	0,67	0,55	1,02	-0,08
	1019000	< 0,001	1,12	1,13	1,02	0,77	0,16
(L3,S1)	023106	0,92	3,33	0,60	0,30	1,60	-0,04
	030106	1,00	2,61	0,51	0,30	1,76	-0,04
	052605	0,95	2,62	0,58	0,34	1,21	-0,04
	050904	1,00	2,87	0,55	0,31	1,36	-0,06
	050807	< 0,001	2,33	0,56	0,35	1,20	-0,03
	022505	< 0,001	2,74	0,78	0,43	1,38	0,01
	040627	< 0,001	0,86	0,86	0,99	0,46	0,40

(L3,S2)	051001	1,00	2,23	0,78	0,48	1,32	-0,03
	052212	1,00	3,00	0,47	0,26	1,23	-0,05
	050801	0,96	1,88	0,90	0,59	1,12	0,00
	011707	< 0,001	2,53	0,55	0,32	1,14	-0,15
	040619	< 0,001	0,69	1,54	1,88	0,73	0,07
(L4,S1)	061602	< 0,001	1,00	0,73	0,66	0,81	0,08
(L4,S2)	022003	1,00	4,69	0,43 ¹	0,18	1,50	-0,08
	061801	1,00	2,62	0,82	0,42	1,10	-0,07
	062209	1,00	2,78	0,99	0,44	1,25	-0,02
	061004	< 0,001	1,85	1,04	0,62	0,82	0,07
Nombre de stations influencés	15	12	9	8	10	6	8

1. Bien que cet indice soit en deçà de la valeur en régime naturel (le seuil pour cette catégorie est de 0,45), elle a été classée comme non influencée. En effet, une valeur d'indice d'étiage inférieure au régime naturel veut dire que la présence et l'opération du barrage en amont auraient pour conséquence de rendre les étiages plus sévères. Bien que cette possibilité ne puisse être formellement exclue, elle a été jugé peu probable.

Tableau 7.7 Tableau comparatif des différents indices du groupe de stations 'une station en aval d'un barrage' (débits hebdomadaires). Les zones en gris indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44[°N; L2 : [44, 46[°N; L3 : [46, 48[°N; L4 : [48, 50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².

Classe latitude-superficie	Numéro de station	Critère d'évaluation de l'influence des barrages						
		Test d'unimodalité (p-value)	Indice				Coefficient de variation	Coefficient de corrélation
			Crue	Étiage	Crue-étiage			
(L1,S1)	1348000	0,988	2,79	0,31	0,18	1,10	0,02	
	1065000	0,990	2,63	0,41	0,24	1,00	0,10	
	1072100	0,991	2,23	0,30	0,20	0,99	0,10	
	4257000	< 0,001	0,84	1,05	1,19	0,55	0,13	
(L2,S1)	030215	0,981	2,52	0,49	0,29	1,08	0,01	
	030314	1,000	2,56	0,37	0,23	1,26	-0,03	
	1033500	1,000	2,74	0,41	0,24	1,22	-0,02	
	023427	1,000	2,80	0,51	0,29	1,13	0,01	
	030220	0,028	2,67	0,42	0,25	1,07	0,03	
	4261000	0,751	1,40	0,63	0,53	0,58	0,22	
	030351	0,602	1,44	0,67	0,55	0,86	-0,10	
	1019000	0,156	1,12	1,13	1,02	0,72	0,19	
(L3,S1)	023106	1,000	3,33	0,60	0,30	1,34	-0,05	
	030106	1,000	2,61	0,51	0,30	1,30	-0,06	
	052605	0,998	2,62	0,58	0,34	1,16	-0,04	
	050904	0,959	2,87	0,55	0,31	1,25	-0,07	
	050807	0,054	2,33	0,56	0,35	1,05	-0,03	
	022505	0,850	2,74	0,78	0,43	1,19	0,03	
	040627	0,001	0,86	0,86	0,99	0,45	0,43	

(L3,S2)	051001	0,972	2,23	0,78	0,48	1,14	-0,03
	052212	0,998	3,00	0,47	0,26	1,16	-0,05
	050801	1,000	1,88	0,90	0,59	1,00	0,01
	011707	0,546	2,53	0,55	0,32	1,11	-0,15
	040619	0,009	0,69	1,54	1,88	0,71	0,08
(L4,S1)	061602	0,509	1,00	0,73	0,66	0,77	0,10
(L4,S2)	022003	1,000	4,69	0,43 ¹	0,18	1,44	-0,08
	061801	1,000	2,62	0,82	0,42	1,05	-0,07
	062209	0,991	2,78	0,99	0,44	1,18	-0,02
	061004	0,022	1,85	1,04	0,62	0,74	0,09
Nombre de stations influencés	13	5	9	8	10	7	9

1. Bien que cet indice soit en deçà de la valeur en régime naturel (le seuil pour cette catégorie est de 0,45), elle a été classée comme non influencée. En effet, une valeur d'indice d'étiage inférieure au régime naturel veut dire que la présence et l'opération du barrage en amont auraient pour conséquence de rendre les étiages plus sévères. Bien que cette possibilité ne puisse être formellement exclue, elle a été jugé peu probable.

Tableau 7.8 Tableau comparatif des différents indices du groupe de stations ‘une station en aval d’un barrage’ (débits mensuels). Les zones en gris indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d’unimodalité ou l’indice considéré (valeurs à l’extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44[°N; L2 : [44, 46[°N; L3 : [46, 48[°N; L4 : [48, 50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².

Classe latitude-superficie	Numéro de station	Critère d'évaluation de l'influence des barrages					
		Test d'unimodalité (p-value)	Indice				
			Crue	Étiage	Crue-étiage	Coefficient de variation	Coefficient de corrélation
(L1,S1)	1348000	0,996	2,79	0,31	0,18	0,87	-0,06
	1065000	0,975	2,63	0,41	0,24	0,83	0,04
	1072100	0,997	2,23	0,30	0,20	0,79	0,06
	4257000	0,999	0,84	1,05	1,19	0,45	0,17
(L2,S1)	030215	0,976	2,52	0,49	0,29	0,80	-0,02
	030314	0,989	2,56	0,37	0,23	0,90	-0,05
	1033500	0,973	2,74	0,41	0,24	0,95	-0,12
	023427	0,998	2,80	0,51	0,29	0,86	-0,07
	030220	0,908	2,67	0,42	0,25	0,87	-0,03
	4261000	0,747	1,40	0,63	0,53	0,49	0,21
	030351	0,832	1,44	0,67	0,55	0,59	-0,22
	1019000	0,822	1,12	1,13	1,02	0,61	0,18
(L3,S1)	023106	0,968	3,33	0,60	0,30	1,02	-0,16
	030106	0,460	2,61	0,51	0,30	1,30	-0,16
	052605	0,231	2,62	0,58	0,34	0,94	-0,14
	050904	0,975	2,87	0,55	0,31	1,00	-0,17
	050807	0,981	2,33	0,56	0,35	0,79	-0,16
	022505	1,000	2,74	0,78	0,43	0,94	-0,02
	040627	0,996	0,86	0,86	0,99	0,43	0,37

(L3,S2)	051001	0,753	2,23	0,78	0,48	0,95	-0,12
	052212	1,000	3,00	0,47	0,26	0,94	-0,14
	050801	0,980	1,88	0,90	0,59	0,85	-0,08
	011707	0,594	2,53	0,55	0,32	0,95	-0,23
	040619	0,991	0,69	1,54	1,88	0,64	-0,03
(L4,S1)	061602	0,963	1,00	0,73	0,66	0,65	0,04
(L4,S2)	022003	0,998	4,69	0,43 ¹	0,18	1,21	-0,17
	061801	0,969	2,62	0,82	0,42	0,83	-0,18
	062209	0,116	2,78	0,99	0,44	1,04	-0,05
	061004	0,949	1,85	1,04	0,62	0,58	0,06
Nombre de stations influencés	14	0	9	8	10	9	9

1. Bien que cet indice soit en deçà de la valeur en régime naturel (le seuil pour cette catégorie est de 0,45), elle a été classée comme non influencée. En effet, une valeur d'indice d'étiage inférieure au régime naturel veut dire que la présence et l'opération du barrage en amont auraient pour conséquence de rendre les étiages plus sévères. Bien que cette possibilité ne puisse être formellement exclue, elle a été jugé peu probable.

Tableau 7.9 Tableau comparatif des résultats aux différentes stations pour les différentes échelles temporelles. Les zones en gris indiquent des stations influencées pour l'échelle temporelle considérée. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44[°N; L2 : [44, 46[°N; L3 : [46, 48[°N; L4 : [48, 50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km². Les stations de chaque groupe latitude-superficie sont ordonnées par ordre croissant des valeurs d'IRI.

Classe latitude-superficie	Numéro de station	IRI	Rapport Superficie station/barrage	Usage ⁴	Résultat de l'analyse d'influence		
					Échelle quotidienne	Échelle hebdomadaire	Échelle mensuelle
(L1,S1)	1348000	0,012	1,00	H			
	1065000	0,097	1,08	I			
	1072100	0,114	1,00	V			
	4257000	0,597	1,00	IHV			
(L2,S1)	030215	0,005	0,99	E			
	030314	0,025	0,96	RIE			
	1033500	0,049	0,93	A			
	023427	0,122	1,00	I			
	030220	0,139	1,00	V			
	4261000	0,294	1,03	IHEV			
	030351	0,329	1,04	R			
	1019000	2,126	0,71	H			
(L3,S1)	023106	0,005	0,97	H			
	030106	0,02	1,01 ²	EV			
	052605	0,051	1,00	V			
	050904	0,063	0,47	E			
	050807	0,173	1,00	V			
	022505	0,244	1,00	H			
	040627	0,814	0,79	RIH			

(L3,S2)	051001	0,002	1,00 ¹	H			
	052212	0,008	0,99	HV			
	050801	0,032	0,11	H			
	011707	0,069	0,96	H			
	040619	0,841	0,89	RIH			
(L4,S1)	061602	0,524	1,00	H			
(L4,S2)	022003	< 0,001	0,98	H			
	061801	0,001	1,00 ¹	H			
	062209	0,031	1,00 ²	H			
	061004	0,442	1,00	H			
Nombre de stations influencées					15	13	14

1. La donnée de superficie en amont du barrage est manquante. Un examen de la position du barrage et de la station du même nom montre que la station est située tout juste en aval du barrage. La superficie du bassin en amont du barrage a donc été fixée égale à celle de la station et le rapport des surfaces station/barrage est donc 1.
2. Il est mentionné dans le fichier de données transmis que : « Le 25 septembre 2003, le bassin versant à la station a été réduit à 1955 km² dû à la dérivation d'une partie de l'écoulement par un ouvrage appartenant à Hydro-Québec.» Ne pouvant présumer des conséquences de cette affirmation sur la superficie du bassin versant en amont du barrage, le rapport des superficies barrage/station a été fixé à 1.
3. Bien que la station soit bel et bien en aval du barrage, la valeur disponible de la superficie en amont du barrage est légèrement supérieure à la superficie en amont de la station.
4. Voir Tableau 4.1 pour la liste des usages.

CHAPITRE 8 : APPLICATION AUX GROUPES 'PLUSIEURS STATIONS EN AVAL D'UN BARRAGE' ET 'CONFIGURATIONS MIXTES STATIONS/BARRAGES'

Le présent chapitre présente les résultats de l'application des critères d'influence tels que définis aux chapitres précédents aux groupes plusieurs stations en aval d'un barrage et aux configurations mixtes stations/barrages. Les listes des stations et des barrages de même que leurs caractéristiques sont présentées aux Annexes D et E respectivement. De plus, les cas plus particuliers de la rivière Yamaska et de la rivière du Nord sont présentés aux Annexes F et G.

8.1. Groupe 'plusieurs stations en aval d'un barrage'

Les Tableaux 8.1, 8.2 et 8.3 présentent les résultats des différents critères pour les stations du groupe 'plusieurs stations en aval d'un barrage' aux échelles quotidiennes, hebdomadaires et mensuelles respectivement. Ces résultats devraient permettre de voir l'impact de la distance entre barrage et station (ou encore du rapport entre les superficies amont barrage/station) sur le niveau d'influence des barrages.

Un examen du Tableau 8.1 montre que les stations influencées sont celles se trouvant les plus près des barrages. Dans quatre cas, seule la station la plus en près du barrage est influencée et dans trois cas aucune des stations en aval du barrage n'est influencée. Ces résultats sont cohérents avec l'hypothèse voulant que l'influence du barrage s'amenuise au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ce dernier. Cette distance (représentée ici par le rapport superficie amont barrage/station) n'est pas seule en jeu, d'autres facteurs jouant un rôle dans la plus ou moins grande influence des barrages (voir Chapitre 10).

L'examen des Tableaux 8.1, 8.2 et 8.3 permet de constater que toutes les stations, sauf une, influencées à l'échelle quotidienne le sont également aux échelles hebdomadaire et mensuelle et que celles qui ne le sont pas, ne le sont pas également à ces deux dernières échelles. Bien que ce résultat ne soit pas à proprement parler contre-intuitif, il faut toutefois se souvenir que les seuls critères qui permettent de distinguer les influences aux échelles hebdomadaire et mensuelle de l'influence à l'échelle quotidienne sont le test d'unimodalité et les indices du coefficient de variation et de corrélations.

Tableau 8.1 Tableau comparatif des différents indices du groupe 'plusieurs stations en aval d'un barrage' (débits quotidiens). Les zones en gris indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les stations classées influencées sont en gris. Les classes latitude-superficie en gras correspondent aux classes pour lesquelles il n'a pas été possible de définir des fourchettes de valeurs en régime naturel.

Barrage amont	Numéro station/barrage	Rapport superficie amont barrage/station	Classe ¹ (Latitude, Surface)	Critère d'évaluation de l'influence des barrages					
				Test d'unimodalité (p-value)	Indice				
					Crue	Étiage	Crue-étiage	Coefficient de variation	Coefficient de corrélation
Morin	022505	1,00	(L3,S1)	< 0,001	2,74	0,78	0,43	1,38	0,01
	022502_022513	0,25	(L3,S2)	1,00	3,53	0,52	0,26	1,45	-0,03
Mitchinamecus	040619	0,89	(L3,S2)	< 0,001	0,69	1,54	1,88	0,73	0,07
	040624	0,21	(L3,S3)	1,00	-	-	-	-	-
St-Didace	052605	1,00	(L3,S1)	1,00	2,62	0,58	0,34	1,21	-0,04
	052601	0,81	(L3,S2)	1,00	3,00	0,47	0,26	1,24	-0,05
Beudet	030106	1,01 ³	(L3,S1)	1,00	2,61	0,51	0,30	1,76	-0,04
	030103	0,22	(L3,S2)	1,00	2,62	0,48	0,29	1,56	-0,05
Chittenden Reservoir	4281500	0,31	(L1,S1)	0,99	1,85	0,59	0,42	0,88	0,19
	4282000	0,05	(L1,S1)	1,00	2,42	0,46	0,28	1,12	0,05
Wrightsville	4285500	0,98	(L2,S1)	0,20	3,05	0,39	0,22	1,31	-0,02
	4286000	0,17	(L2,S2)	1,00	-	-	-	-	-
Nicatous Stream Dam	1035000	0,24	(L2,S1)	0,81	2,38	0,48	0,30	0,90	0,14
	1036000	0,01	(L2,S3)	0,45	-	-	-	-	-
	1034500	0,01	(L2,S3)	1,00	-	-	-	-	-

1. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44]°N; L2 : [44, 46]°N; L3 : [46,48]°N; L4 : [48, 50]°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000,4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².

2. Une autre station (040132) se trouve tout juste en aval du barrage mais n'a pas été considérée puisque le bassin couvre une superficie de moins de 100 km².

3. Bien que la station soit bel et bien en aval du barrage, la valeur disponible de la superficie en amont du barrage est légèrement supérieure à la superficie en amont de la station.

Tableau 8.2 Tableau comparatif des différents indices du groupe 'plusieurs stations en aval d'un barrage' (débits hebdomadaires). Les zones en gris indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les stations classées influencées sont en gris. Les classes latitude-superficie en gras correspondent aux classes pour lesquelles il n'a pas été possible de définir des fourchettes en régime naturel.

Barrage amont	Numéro station/barrage	Rapport superficie amont barrage/station	Classe ¹ (Latitude, Surface)	Critère d'évaluation de l'influence des barrages					
				Test d'unimodalité (p-value)	Indice				
					Crue	Étiage	Crue-étiage	Coefficient de variation	Coefficient de corrélation
Morin	022505	1,00	(L3,S1)	0,85	2,74	0,78	0,43	1,19	0,03
	022502_022513	0,25	(L3,S2)	1,00	3,53	0,52	0,26	1,36	-0,03
Mitchinamecus	040619	0,89	(L3,S2)	0,02	0,69	1,54	1,88	0,71	0,08
	040624	0,21	(L3,S3)	1,00	-	-	-	-	-
St-Didace	052605	1,00	(L3,S1)	0,89	2,62	0,58	0,34	1,16	-0,04
	052601	0,81	(L3,S2)	1,00	3,00	0,47	0,26	1,19	-0,04
Beudet	030106	1,01 ³	(L3,S1)	1,00	2,61	0,51	0,30	1,30	-0,06
	030103	0,22	(L3,S2)	1,00	2,62	0,48	0,29	1,22	-0,07⁴
Chittenden Reservoir	4281500	0,31	(L1,S1)	0,99	1,85	0,59	0,42	0,70	0,27
	4282000	0,05	(L1,S1)	1,00	2,42	0,46	0,28	0,96	0,07
Wrightsville	4285500	0,98	(L2,S1)	0,93	3,05	0,39	0,22	1,19	-0,01
	4286000	0,17	(L2,S2)	1,00	-	-	-	-	-
Nicatous Stream Dam	1035000	0,24	(L2,S1)	0,97	2,38	0,48	0,30	0,88	0,15
	1036000	0,01	(L2,S3)	0,91	-	-	-	-	-
	1034500	0,01	(L2,S3)	1,00	-	-	-	-	-

1. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44]°N; L2 : [44, 46]°N; L3 : [46, 48]°N; L4 : [48, 50]°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000,4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².
2. Une autre station (040132) se trouve tout juste en aval du barrage mais n'a pas été considérée puisque le bassin couvre une superficie de moins de 100 km².
3. Bien que la station soit bel et bien en aval du barrage, la valeur disponible de la superficie en amont du barrage est légèrement supérieure à la superficie en amont de la station.
4. A noter que cette valeur (-0,07) se trouve tout juste inférieure à la limite inférieure des valeurs correspondant aux stations naturelles (-0,06).

Tableau 8.3 Tableau comparatif des différents indices du groupe 'plusieurs stations en aval d'un barrage' (débits mensuels). Les zones en gris indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les stations classées influencées sont en gris. Les classes latitude-superficie en gras correspondent aux classes pour lesquelles il n'a pas été possible de définir des fourchettes de valeurs en régime naturel.

Barrage amont	Numéro station/barrage	Rapport superficie amont barrage/station	Classe ¹ (Latitude, Surface)	Critère d'évaluation de l'influence des barrages					
				Test d'unimodalité (p-value)	Indice				
					Crue	Étiage	Crue-étiage	Coefficient de variation	Coefficient de corrélation
Morin	022505	1,00	(L3,S1)	1,00	2,74	0,78	0,43	0,94	-0,02
	022502_022513	0,25	(L3,S2)	0,99	3,53	0,52	0,26	1,10	-0,12
Mitchinamecus	040619	0,89	(L3,S2)	0,98	0,69	1,54	1,88	0,64	-0,03
	040624	0,21	(L3,S3)	1,00	-	-	-	-	-
St-Didace	052605	1,00	(L3,S1)	0,35	2,62	0,58	0,34	0,94	-0,14
	052601	0,81	(L3,S2)	0,99	3,00	0,47	0,26	1,02	-0,13
Beaudet	030106	1,01 ³	(L3,S1)	0,46	2,61	0,51	0,30	1,30	-0,16
	030103	0,22	(L3,S2)	1,00	2,62	0,48	0,29	1,22	-0,15
Chittenden Reservoir	4281500	0,31	(L1,S1)	0,96	1,85	0,59	0,42	0,58	0,31
	4282000	0,05	(L1,S1)	0,95	2,42	0,46	0,28	0,76	0,05
Wrightsville	4285500	0,98	(L2,S1)	1,00	3,05	0,39	0,22	0,95	-0,09
	4286000	0,17	(L2,S2)	1,00	-	-	-	-	-
Nicatous Stream Dam	1035000	0,24	(L2,S1)	1,00	2,38	0,48	0,30	0,78	0,10
	1036000	0,01	(L2,S3)	0,93	-	-	-	-	-
	1034500	0,01	(L2,S3)	1,00	-	-	-	-	-

1. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44]°N; L2 : [44, 46]°N; L3 : [46, 48]°N; L4 : [48, 50]°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000,4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².
2. Une autre station (040132) se trouve tout juste en aval du barrage mais n'a pas été considérée puisque le bassin couvre une superficie de moins de 100 km².
3. Bien que la station soit bel et bien en aval du barrage, la valeur disponible de la superficie en amont du barrage est légèrement supérieure à la superficie en amont de la station.

8.2. Groupe 'configurations mixtes stations/barrages'

Les Tableaux 8.4, 8.5 et 8.6 présentent les résultats des différents critères pour les stations du groupe des configurations mixtes stations/barrages aux échelles quotidiennes, hebdomadaires et mensuelles respectivement. L'examen de ces tableaux permet de dégager un certain nombre de constats.

En général, les stations de ce groupe se trouvent dans de grands bassins versants. De ce fait, plusieurs stations appartiennent aux classes de superficie [1000,4000 [km² et ≥ 4000 km². Ces classes, tels que mentionnés à la Section 7.2, comptent peu de stations naturelles et dès lors les fourchettes de valeurs des indices en régime naturel demeurent approximatives. Les paragraphes suivants commentent les résultats obtenus à l'échelle quotidienne pour chacune des configurations (Tableau 8.4).

Pour la configuration 1 (barrage Jules-Allard en amont), la station en aval du barrage Weedon (station Saint-François - III) illustre un cas typique de station influencée non pas par le barrage directement en amont, mais plutôt par d'autres barrages plus importants situés en amont de ce barrage. En effet, le barrage de Weedon représente moins de 0,1 % de la capacité totale de stockage en amont de cette station, comparativement à 77 % et 23 % pour les barrages Jules-Allard et Aylmer respectivement.

Pour la configuration 2 (barrage Carillon en amont), le fait que la station des Prairies est non influencée peut s'expliquer par le faible IRI à cette station (IRI de 0,005; voir Annexe E). Il faut se souvenir également que plusieurs autres barrages se trouvent en amont de ce premier barrage mais ne semblent pas avoir d'influence sur les débits à cette station.

Aucune des stations de la configuration 3 (barrage *Weare Reservoir Aka Horace Lake* en amont) ne serait influencée. Il est à noter que dans le cas du barrage Everett Dam, le volume de stockage (*'Maximum storage'*) indiqué dans le fichier consulté est de 161 585 880 m³, alors que le volume normal (*'Normal storage'*) est de 1 233 480 m³. Généralement pour l'ensemble des barrages américains considérés ces deux valeurs sont relativement similaires. Dans le cas présent, on note une différence marquée entre celles-ci (rapport de 131 pour 1). Le fait qu'il existe une si grande différence pourrait

indiquer que, pour des raisons diverses, la capacité de stockage effectivement utilisée est nettement inférieure à la capacité maximale, ce qui impliquerait que le IRI effectif est beaucoup plus petit que l'IRI « théorique ». Ainsi, en considérant le '*Normal storage*' au lieu du '*Maximum storage*', l'IRI serait plutôt de 0,14 et de 0,064 (au lieu de 1,99 et 0,62) pour les stations 1090800 et 1091500 respectivement. Au final, cela implique que les valeurs d'IRI sont moyennement faibles pour les deux stations de cette configuration, ce qui pourrait expliquer l'absence d'influence observée.

La station en aval de la configuration 4 (*Second Connecticut Lake Dam* en amont) est classée comme influencée. Cela s'explique par le fait que l'IRI (0,69) pour cette station est relativement élevé

La station en aval de la configuration 5 (groupe avec le *Waterloo Dam* en amont) ne serait pas influencée (seul le test d'unimodalité est considéré). A noter que dans ce cas la station a un IRI de 0,39.

La station de la configuration 6 (avec le barrage *Bolton Falls Dam* en amont) présente une valeur d'IRI très faible (0,0201) ce qui cohérent avec le résultat selon lequel cette station serait non-influencée.

Les six barrages de la configuration 7 (barrage *Bartlett Carry Dam* en amont) s'additionnent pour un IRI total de 0,16 à la station 4273500. Au final, cette valeur est moyennement élevée et explique pourquoi l'influence demeure négligeable.

La situation est relativement similaire pour la configuration 8 (avec *Forge Dam* comme barrage amont) avec des barrages se combinant pour un IRI très faible à la station (de l'ordre de 0,04) laquelle est non influencée.

La station en aval de la configuration 9 (barrage des *Érables* en amont) est classée comme influencée et ce malgré une valeur d'IRI relativement faible (IRI de 0,003). Les indices étiage et crue-étiage à cette station se trouvent en effet légèrement à l'extérieur des valeurs en régime naturel (valeur de 0,80 pour l'indice étiage pour une valeur maximale de 0,77 en régime naturel et de 0,48 pour l'indice crue-étiage pour une valeur maximale de 0,46 en régime naturel). Il convient de noter que cette station appartient à

la classe latitude-superficie (L3,S2) pour laquelle les fourchettes des valeurs en régime naturel ont été estimées à partir d'un échantillon de seulement 9 stations.

Les stations du groupe 10 (barrage Mégantic en Amont) présentent des IRI moyennement élevés (IRI de 0,12; station 023427) et faibles (IRI de 0,03 et 0,02; stations 023429 et 023402, respectivement), ce qui explique l'absence d'influence dans ces cas.

La configuration 11 est composée de petits barrages conduisant à un IRI relativement faible (0,004) à la station 040204 ce qui explique l'absence d'influence.

Dans le cas de la configuration 12, les barrages Choinière, Lac Brome et, dans une moindre mesure, Waterloo conduisent à des IRI variant de 1,02 (station 030309) à 0,07 (station 030345) de l'amont vers l'aval. On constate ici la disparation de l'influence au fur et à mesure que les apports provenant des barrages à la station s'amenuise. Les trois stations ayant un IRI élevé (IRI de 1,02, 0,59 et 0,33; stations 030309, 030340 et 030351 respectivement) sont en effet influencées, tandis que les deux stations ayant un IRI moyennement élevé (IRI de 0,10 et 0,07; stations 030341 et 030345 respectivement) ne le sont pas.

L'ensemble des barrages de la configuration 13 se combinent pour des IRI moyennement élevés de 0,12 et 0,04 aux stations 040122 et 040110 respectivement. De ces deux stations, seulement la station ayant l'IRI le plus élevé (040122) est considérée influencée. De plus, elle l'est uniquement pour l'indice du coefficient de variation.

Malgré la diversité des configurations retenues, les analyses précédentes montrent un très fort lien entre les IRI des barrages amont et la plus ou moins grande influence de ceux-ci sur les débits aux stations. Cet argumentaire sera repris au Chapitre 10.

Une comparaison des résultats aux différentes échelles montrent que les stations classées comme influencées ou non influencées à l'échelle quotidienne demeurent dans cette même catégorie aux échelles hebdomadaire et mensuelle. Cette règle souffre de deux exceptions pour les configurations 1 et 8. Pour la configuration 1, l'influence demeure présente pour les deux stations les plus en amont à l'échelle hebdomadaire

(les trois stations sont influencées à l'échelle quotidienne) et aucune n'est influencée à l'échelle mensuelle. A noter que seul le test d'unimodalité a été appliqué à ce cas. Pour la configuration 8, la station en aval n'est pas influencée aux échelles quotidienne et hebdomadaire mais devient influencée à l'échelle mensuelle, résultat surprenant au regard des analyses précédentes. Cependant, seul l'indice du coefficient de variation indique une influence à l'échelle mensuelle.

Tableau 8.4 Tableau comparatif des différents indices du groupe de configurations mixtes stations/barrages (débits quotidiens). Les lignes consécutives en gris ou en blanc correspondent à une séquence de stations et de barrages. Les séquences stations/barrages sont ordonnées depuis l'amont vers l'aval. Les valeurs des critères d'influence en gras indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les stations classées influencées sont en gras. Les classes latitude-superficie en gras correspondent aux classes pour lesquelles il n'a pas été possible de définir des fourchettes de valeurs en régime naturel.

Configuration #	Numéro station/barrage	Nom station/barrage	IRI ¹	Classe ² (Latitude, Surface)	Critère d'évaluation de l'influence des barrages					
					Test d'unimodalité (p-value)	Indice				
						Crue	Étiage	Crue-étiage	Coefficient de variation	Coefficient de corrélation
1	X0003925	Barrage Jules-Allard	---	---						
	030225	Station Saint-François (I)	0,87	(L2,S2)	< 0,001	-	-	-	-	-
	X0002572	Barrage Aylmer	---	---						
	030278	Station Saint-François (II)	0,81	(L2,S2)	< 0,001	-	-	-	-	-
	X0002574	Barrage de Weedon	---	---						
	030284	Station Saint-François (III)	0,47	(L2,S2)	< 0,001	-	-	-	-	-
2	X0004816 ³	Barrage de Carillon	---	---						
	043301	Station des Prairies	0,005	(L2,S3)	0,997	-	-	-	-	-
3	6622	Weare Reservoir Aka Horace Lake	---	---						
	6614	Everett Dam	---	---						
	1090800	Piscataquog River BI Everett Dam,	1,99	(L1,S1)	0,940	3,38	0,20	0,11	1,67	0,08

		Nr E Weare								
	6588	Gregg S Falls	---	---						
	1091500	Piscataquog River Near Goffstown	0,62	(L1,S1)	0,975	3,31	0,18	0,10	1,34	0,13
4	7264	Second Connecticut Lake Dam	---	---						
	7250	First Connecticut Lake Dam	---	---						
	7238	Murphy Dam (Francis Lake)	---	---						
	1129200	Connecticut R Below Indian Stream Nr Pittsburg	0,64	(L2,S1)	0,01	1,05	0,75	0,75	0,69	0,06
5	6540	Waterloo Dam	---	---						
	6545	Seneca Falls Dam	---	---						
	6558	Mud Lock C&s Canal Dam	---	---						
	4235600	Seneca River (Érie Canal) Near Port Byron	0,39	(L1,S3)	1,00	-	-	-	-	-
6	6997	Bolton Falls Dam	---	---						
	7051	Essex No. 19 Dam	---	---						
	4290500	Winooski River Near Essex Junction, Vt	0,02	(L2,S2)	0,743	-	-	-	-	-
7	6962	Bartlett Carry	---	---						

		Dam								
	6988	Lake Flower Dam	---	---						
	7030	Franklin Falls Dam	---	---						
	7061	Union Falls Dam	---	---						
	7110	High Falls Dam	---	---						
	7136	Kent Falls Dam	---	---						
	4273500	Saranac River At Plattsburgh	0,16	(L2,S2)	1,00	-	-	-	-	-
8	7173	Forge Dam	---	---						
	7190	High Falls Dam	---	---						
	7197	Chateaugay Chasm Dam	---	---						
	4270510	Chateaugay River Below Chateaugay	0,04	(L2,S1)	0,99	2,27	0,51	0,32	0,89	0,03
9	X0001149	Barrage des Érables	---	---						
	X0001115	Barrage de Clermont	---	---						
	051502	Malbaie	0,003	(L3,S2)	1,00	2,32	0,80	0,48	1,23	-0,01
10	X0002489	Barrage Mégantic	---	---						
	023427	Chaudière	0,12	(L2,S1)	1,00	2,80	0,51	0,29	1,21	0,00
	X0003912	Barrage Sartigan	---	---						
	023429	Chaudière	0,03	(L3,S2)	1,00	3,04	0,49	0,27	1,52	-0,04
	023402	Chaudière	0,02	(L3,S3)	1,00	---	---	---	---	---
11	X0005410	Barrage	---	---						

		Chapleau								
	X0004957	Barrage Chute-Bell	---	---						
	040204	Rouge	0,004	(L2,S3)	1,00	---	---	---	---	---
12	X0005737	Barrage De Waterloo	---	---						
	X0005756	Barrage De Choinière	---	---						
	030309	Yamaska Nord	1,02	(L2,S1)	0,00	1,76	0,62	0,45	0,97	0,08
	030340	Yamaska Nord	0,59	(L2,S1)	1,00	1,95	0,58	0,40	1,20	0,00
	X0005651	Barrage Lac-Brome	---	---						
	030351	Yamaska	0,33	(L2,S1)	0,60	1,44	0,67	0,55	1,02	-0,08
	030341	Penman	0,10	(L2,S2)	0,50	---	---	---	---	---
	030345	Yamaska	0,07	(L2,S2)	0,96	---	---	---	---	---
13	X0005203	Barrage Du Lac Ludger	---	---						
	X0005179	Barrage De La Montagne-Noire	---	---						
	X0005201	Barrage Papineau	---	---						
	X0005226	Barrage Brûlé	---	---						
	X0005241	Barrage Manitou	---	---						
	X0005255	Barrage Cornu	---	---						
	X0005204	Barrage Des Sables	---	---						
	040122	Du Nord	0,12	(L3,S1)	0,99	2,57	0,55	0,32	1,11	-0,04
	X0004974	Barrage Théodore	---	---						
040110	Du Nord	0,04	(L2,S2)	1,00	---	---	---	---	---	

1. L'IRI est calculé en considérant le volume total de stockage des barrages en amont de la station et le débit médian à cette même station.
2. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44[°N; L2 : [44, 46[°N; L3 : [46, 48[°N; L4 : [48, 50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000,4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².
3. Bien que cette configuration ne comporte qu'un barrage et une station, elle est classée dans le groupe puisque plusieurs autres barrages dont les caractéristiques sont inconnues se trouvent en amont de ce premier barrage.

Tableau 8.5 Tableau comparatif des différents indices du groupe de configurations mixtes stations/barrages (débits hebdomadaires). Les lignes consécutives en gris ou en blanc correspondent à une séquence de stations et de barrages. Les séquences stations/barrages sont ordonnées depuis l'amont vers l'aval. Les valeurs des critères d'influence en gras indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les stations classées influencées sont en gras. Les classes latitude-superficie en gras correspondent aux classes pour lesquelles il n'a pas été possible de définir des fourchettes de valeurs en régime naturel.

Configuration #	Numéro station/barrage	Nom station/barrage	IRI ¹	Classe ² (Latitude, Surface)	Critère d'évaluation de l'influence des barrages					
					Test d'unimodalité (p-value)	Indice				
						Crue	Étiage	Crue-étiage	Coefficient de variation	Coefficient de corrélation
1	X0003925	Barrage Jules-Allard	---	---						
	030225	Station Saint-François	0,87	(L2,S2)	0,017	-	-	-	-	-
	X0002572	Barrage Aylmer	---	---						
	030278	Station Saint-François	0,81	(L2,S2)	< 0,006	-	-	-	-	-
	X0002574	Barrage De Weedon	---	---						
	030284	Station Saint-François	0,47	(L2,S2)	0,591	-	-	-	-	-
2	X0004816 ³	Barrage De Carillon	---	---						
	043301	Station Des Prairies	0,005	(L2,S3)	0,996	-	-	-	-	-
3	6622	Weare Reservoir Aka Horace Lake	---	---						
	6614	Everett Dam	---	---						
	1090800	Piscataquog River BI	1,99	(L1,S1)	0,974	3,38	0,20	0,11	1,54	0,10

		Everett Dam, Nr E Weare								
	6588	Gregg S Falls	---	---						
	1091500	Piscataquog River Near Goffstown	0,62	(L1,S1)	1,00	3,31	0,18	0,10	1,21	0,16
4	7264	Second Connecticut Lake Dam	---	---						
	7250	First Connecticut Lake Dam	---	---						
	7238	Murphy Dam (Francis Lake)	---	---						
	1129200	Connecticut R Below Indian Stream Nr Pittsburg	0,64	(L2,S1)	0,948	1,05	0,75	0,75	0,60	0,08
5	6540	Waterloo Dam	---	---						
	6545	Seneca Falls Dam	---	---						
	6558	Mud Lock C&s Canal Dam	---	---						
	4235600	Seneca River (Érie Canal) Near Port Byron	0,39	(L1,S3)	0,897	-	-	-	-	-
6	6997	Bolton Falls Dam	---	---						
	7051	Essex No. 19 Dam	---	---						
	4290500	Winooski River Near Essex	0,02	(L2,S2)	1,00	-	-	-	-	-

		Junction, Vt								
7	6962	Bartlett Carry Dam	---	---						
	6988	Lake Flower Dam	---	---						
	7030	Franklin Falls Dam	---	---						
	7061	Union Falls Dam	---	---						
	7110	High Falls Dam	---	---						
	7136	Kent Falls Dam	---	---						
	4273500	Saranac River At Plattsburgh	0,16	(L2,S2)	0,998	-	-	-	-	-
8	7173	Forge Dam	---	---						
	7190	High Falls Dam	---	---						
	7197	Chateaugay Chasm Dam	---	---						
	4270510	Chateaugay River Below Chateaugay	0,04	(L2,S1)	1,00	2,27	0,51	0,32	0,83	0,04
9	X0001149	Barrage des Érables	---	---						
	X0001115	Barrage de Clermont	---	---						
	051502	Malbaie	0,003	(L3,S2)	0,998	2,32	0,80	0,48	1,14	0,01
10	X0002489	Barrage Mégantic	---	---						
	023427	Chaudière	0,12	(L2,S1)	1,00	2,80	0,51	0,29	1,13	0,01
	X0003912	Barrage Sartigan	---	---						

	023429	Chaudière	0,03	(L3,S2)	1,00	3,04	0,49	0,27	1,30	-0,04
	023402	Chaudière	0,02	(L3,S3)	1,00	---	---	---	---	---
11	X0005410	Barrage Chapleau	---	---						
	X0004957	Barrage Chute-Bell	---	---						
	040204	Rouge	0,004	(L2,S3)	1,00	---	---	---	---	---
12	X0005737	Barrage De Waterloo	---	---						
	X0005756	Barrage De Choinière	---	---						
	030309	Yamaska Nord	1,02	(L2,S1)	0,00	1,76	0,62	0,45	0,83	0,11
	030340	Yamaska Nord	0,59	(L2,S1)	0,99	1,95	0,58	0,40	0,97	0,02
	X0005651	Barrage Lac-Brome	---	---						
	030351	Yamaska	0,33	(L2,S1)	0,84	1,44	0,67	0,55	0,86	-0,10
	030341	Penman	0,10	(L2,S2)	1,00	---	---	---	---	---
030345	Yamaska	0,07	(L2,S2)	1,00	---	---	---	---	---	
13	X0005203	Barrage Du Lac Ludger	---	---						
	X0005179	Barrage De La Montagne-Noire	---	---						
	X0005201	Barrage Papineau	---	---						
	X0005226	Barrage Brûlé	---	---						
	X0005241	Barrage Manitou	---	---						
	X0005255	Barrage Cornu	---	---						
X0005204	Barrage Des Sables	---	---							

	040122	Du Nord	0,12	(L3,S1)	1,00	2,57	0,55	0,32	1,01	-0,03
	X0004974	Barrage Théodore	---	---						
	040110	Du Nord	0,04	(L2,S2)	0,99	---	---	---	---	---

1. L'IRI est calculé en considérant le volume total de stockage des barrages en amont de la station et le débit médian à cette même station.
2. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44[°N; L2 : [44, 46[°N; L3 : [46, 48[°N; L4 : [48, 50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000,4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².
3. Bien que cette configuration ne comporte qu'un barrage et une station, elle est classée dans le groupe puisque plusieurs autres barrages dont les caractéristiques nous sont inconnues se trouvent en amont de ce premier barrage.

Tableau 8.6 Tableau comparatif des différents indices du groupe de configurations mixtes stations/barrages (débits mensuels). Les lignes consécutives en gris ou en blanc correspondent à une séquence de stations et de barrages. Les séquences stations/barrages sont ordonnées depuis l'amont vers l'aval. Les valeurs des critères d'influence en gras indiquent des valeurs suggérant une influence du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les stations classées influencées sont en gras. Les classes latitude-superficie en gras correspondent aux classes pour lesquelles il n'a pas été possible de définir des fourchettes de valeurs en régime naturel.

Configuration #	Numéro station/barrage	Nom station/barrage	IRI ¹	Classe ² (Latitude, Surface)	Critère d'évaluation de l'influence des barrages					
					Test d'unimodalité (p-value)	Indice				
						Crue	Étiage	Crue-étiage	Coefficient de variation	Coefficient de corrélation
1	X0003925	Barrage Jules-Allard	---	---						
	030225	Station Saint-François	0,87	(L2,S2)	0,773	-	-	-	-	-
	X0002572	Barrage Aylmer	---	---						
	030278	Station Saint-François	0,81	(L2,S2)	0,252	-	-	-	-	-
	X0002574	Barrage De Weedon	---	---						
	030284	Station Saint-François	0,47	(L2,S2)	0,981	-	-	-	-	-
2	X0004816 ³	Barrage De Carillon	---	---						
	043301	Station Des Prairies	0,005	(L2,S3)	1,00	-	-	-	-	-
3	6622	Weare Reservoir Aka Horace Lake	---	---						
	6614	Everett Dam	---	---						
	1090800	Piscataquog River Bl Everett Dam,	1,99	(L1,S1)	0,691	3,38	0,20	0,11	1,28	0,10

		Nr E Weare								
	6588	Gregg S Falls	---	---						
	1091500	Piscataquog River Near Goffstown	0,62	(L1,S1)	0,941	3,31	0,18	0,10	1,02	0,11
4	7264	Second Connecticut Lake Dam	---	---						
	7250	First Connecticut Lake Dam	---	---						
	7238	Murphy Dam (Francis Lake)	---	---						
	1129200	Connecticut R Below Indian Stream Nr Pittsburg	0,64	(L2,S1)	1,00	1,05	0,75	0,75	0,47	0,10
5	6540	Waterloo Dam	---	---						
	6545	Seneca Falls Dam	---	---						
	6558	Mud Lock C&s Canal Dam	---	---						
	4235600	Seneca River (Érie Canal) Near Port Byron	0,39	(L1,S3)	0,901	-	-	-	-	-
6	6997	Bolton Falls Dam	---	---						
	7051	Essex No. 19 Dam	---	---						
	4290500	Winooski River Near Essex Junction, Vt	0,02	(L2,S2)	0,925	-	-	-	-	-

7	6962	Bartlett Carry Dam	---	---						
	6988	Lake Flower Dam	---	---						
	7030	Franklin Falls Dam	---	---						
	7061	Union Falls Dam	---	---						
	7110	High Falls Dam	---	---						
	7136	Kent Falls Dam	---	---						
	4273500	Saranac River At Plattsburgh	0,16	(L2,S2)	1,00	-	-	-	-	-
8	7173	Forge Dam	---	---						
	7190	High Falls Dam	---	---						
	7197	Chateaugay Chasm Dam	---	---						
	4270510	Chateaugay River Below Chateaugay	0,04	(L2,S1)	0,946	2,27	0,51	0,32	0,67	-0,01
9	X0001149	Barrage des Érables	---	---						
	X0001115	Barrage de Clermont	---	---						
	051502	Malbaie	0,003	(L3,S2)	0,745	2,32	0,80	0,48	0,99	-0,07
10	X0002489	Barrage Mégantic	---	---						
	023427	Chaudière	0,12	(L2,S1)	1,00	2,80	0,51	0,29	0,86	-0,07
	X0003912	Barrage Sartigan	---	---						
	023429	Chaudière	0,03	(L3,S2)	0,87	3,04	0,49	0,27	0,99	-0,12

	023402	Chaudière	0,02	(L3,S3)	0,99	---	---	---	---	---
11	X0005410	Barrage Chapleau	---	---						
	X0004957	Barrage Chute-Bell	---	---						
	040204	Rouge	0,004	(L2,S3)	0,34	---	---	---	---	---
12	X0005737	Barrage De Waterloo	---	---						
	X0005756	Barrage De Choinière	---	---						
	030309	Yamaska Nord	1,02	(L2,S1)	0,79	1,76	0,62	0,45	0,63	0,14
	030340	Yamaska Nord	0,59	(L2,S1)	1,00	1,95	0,58	0,40	0,70	0,02
	X0005651	Barrage Lac- Brome	---	---						
	030351	Yamaska	0,33	(L2,S1)	0,88	1,44	0,67	0,55	0,59	-0,22
	030341	Penman	0,10	(L2,S2)	1,00	---	---	---	---	---
030345	Yamaska	0,07	(L2,S2)	0,71	---	---	---	---	---	
13	X0005203	Barrage Du Lac Ludger	---	---						
	X0005179	Barrage De La Montagne- Noire	---	---						
	X0005201	Barrage Papineau	---	---						
	X0005226	Barrage Brûlé	---	---						
	X0005241	Barrage Manitou	---	---						
	X0005255	Barrage Cornu	---	---						
	X0005204	Barrage Des Sables	---	---						
	040122	Du Nord	0,12	(L3,S1)	0,95	2,57	0,55	0,32	0,80	-0,12

	X0004974	Barrage Théodore	---	---						
	040110	Du Nord	0,04	(L2,S2)	0,72	---	---	---	---	---

1. L'IRI est calculé en considérant le volume total de stockage des barrages en amont de la station et le débit médian à cette même station.
2. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44[°N; L2 : [44, 46[°N; L3 : [46, 48[°N; L4 : [48, 50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000,4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².
3. Bien que cette configuration ne comporte qu'un barrage et une station, elle est classée dans le groupe puisque plusieurs autres barrages dont les caractéristiques nous sont inconnues se trouvent en amont de ce premier barrage.

CHAPITRE 9 : APPLICATION AUX STATIONS AVEC DÉBITS MESURÉS AVANT ET APRÈS CONSTRUCTION DU BARRAGE

Comme la revue de littérature présentée au Chapitre 2 l'a montré, un grand nombre d'études s'intéressant à l'impact des barrages sur les débits ont utilisé des stations pour lesquelles les débits mesurés couvrent les périodes antérieures et postérieures à la construction du barrage. Dans le cas présent, considérant le nombre relativement restreint de cas de ce type, il a plutôt été décidé de comparer les stations soumises à des régimes d'écoulement naturel aux stations situées en aval de barrage et d'ainsi identifier un ensemble de critères qui permettrait de caractériser l'influence des barrages sur le régime d'écoulement (voir Chapitres 6 et 7). Il demeure toutefois pertinent et intéressant d'appliquer l'approche proposée au cas des stations pour lesquelles les débits avant et après construction d'un barrage sont connus, ce à quoi s'attarde le présent chapitre. La Section 9.1 dresse la liste des stations appartenant à cette catégorie. Les séries antérieures à la construction du barrage font ensuite l'objet d'analyses préliminaires à la Section 9.2 (les séries postérieures ont déjà fait l'objet de telles analyses) afin de s'assurer qu'elles répondent aux critères de sélection définies. La Section 9.3 rapporte et discute des résultats de la comparaison des critères d'influence entre les périodes antérieures et postérieures à la construction des barrages et enfin la Section 9.4 présente un résumé des principaux constats de cette analyse.

9.1. Liste des stations avec mesures de débits avant et après construction d'un barrage

Le Tableau 9.1 présente la liste des 12 stations pour lesquelles les débits mesurés couvrent les périodes antérieures et postérieures à la construction du barrage. Il est important de noter que la date de construction du barrage correspond à l'année indiquée dans le répertoire des barrages du CEHQ (<http://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/>).

Tableau 9.1 Liste et caractéristiques des stations pour lesquelles les débits mesurés couvrent les périodes avant et après la construction du barrage en amont (les stations en gris sont celles qui n’ont pas été retenues pour la suite de l’analyse; voir Section 9.2).

Numéro de la station	Nom de la station	Barrage associé	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Années disponibles avant construction du barrage	Années disponibles après construction du barrage	Classe ¹ (Latitude, Surface)
030309	Yamaska Nord	Choinière	45,42	-72,61	1968-1977	1978-2012	(2,1)
030225	Saint-François	Jules-Allard	45,94	-71,28	1968-1987	1988-2012	(2,2)
022502_022513	Du Loup	Morin (Aval)	47,82	-69,52	1923-1943	1944-2012	(3,2)
052601	Maskinongé	St-Didace (Aval)	46,30	-73,10	1925-1978	1979-2012	(3,2)
061004	Chicoutimi	Portage-des-Roches	48,31	-71,21	1910-1924	1925-2012	(4,2)
061602	Ouiatchouan	des Commissaires	48,20	-72,24	1966-1971	1972-2012	(4,1)
030215	Coaticook	Waterville	45,28	-71,90	1959-1978	1979-2012	(2,1)
030220	Massawippi	North Hatley	45,28	-71,96	1952-1964	1965-2012	(2,1)
062209	Manouane	Principal Manouane	49,88	-70,93	1979-2003	2004-2012	(4,2)
043301	Des Prairies	de Carillon	45,52	-73,85	1922-1962	1963-2012	(2,3)
061801	Petite Rivière Péribonca	X0007895	48,80	-72,03	1974-1998	1999-2012	(4,2)
023402	Chaudière	Sartigan (Aval)	46,59	-71,21	1915-1967	1968-2012	(3,3)

1. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N; L4 : [48,50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000,4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².

9.2. Examen préliminaire des séries de débits disponibles

Il importe avant d'estimer les critères d'influence de procéder à un examen préliminaire des séries disponibles afin d'identifier des situations s'apparentant aux cas présentés à la Section 4.3. L'examen des périodes postérieures à la construction des barrages ayant déjà été réalisé, les séries de débits antérieures à la construction du barrage ont fait l'objet d'une analyse visuelle exhaustive. Ce travail est essentiel d'autant plus que, comme le montre le Tableau 9.1, ces périodes débutent dans certains cas dans les années 1910-1940.

Le Tableau 9.2 présente la liste des stations du Tableau 9.1 qui n'ont pas été retenues pour la suite des analyses (ces stations sont en gris dans le Tableau 9.1). Des 12 stations originales, seules sept présentent des séries répondant aux critères de sélection et de qualité définis à la Section 4.3. Il est à noter que les deux années antérieures à l'année de construction du barrage telle qu'indiquée dans le *Répertoire des barrages* n'ont pas été considérées comme des années « valides ». En effet, l'examen des séries de débits à certaines stations (par exemple la station en aval du barrage des Commissaires) montre que les débits peuvent avoir été modifiés avant l'année indiquée suggérant que les travaux de construction du barrage peuvent avoir influencés le régime d'écoulement avant la mise en eau proprement dite du barrage. Ainsi une période tampon de deux ans a été fixée afin de s'assurer que la période antérieure à la construction du barrage soit effectivement exempte de toute influence.

Tableau 9.2 Liste des stations non retenues pour fin d'analyse.

Numéro station	Nom station	Nom barrage	Raison
030225	Saint-François	Jules-Allard	Débit en palier
022502_022513	Du Loup	Morin (Aval)	Débit en palier
062209	Manouane	Principal Manouane	La construction du barrage semble avoir eu un impact majeur sur l'hydrologie du bassin versant
061004	Chicoutimi	Portage-des-Roches	Longue période de données manquantes
061602	Ouiatchouan	des Commissaires	Série trop courte

Il convient de noter que la station Yamaska Nord (numéro 030309) a été retenue même si la période antérieure à la construction du barrage ne comporte que quatre années valides. A noter également que la station Manouane (numéro 062209) n'a pas été considérée puisque les notes retrouvées dans le *Répertoire des barrages* laissent entendre que la construction de ce barrage s'est accompagnée de réaménagements importants de la zone en aval du bassin versant.

9.3. Comparaison des critères d'influence des périodes avant et après construction des barrages

Le Tableau 9.3 présente les résultats des critères pour les périodes avant et après construction des barrages pour les sept stations retenues. De ces stations, deux appartiennent à des classes latitude-superficie pour lesquelles les fourchettes de valeurs des indices en régime naturel n'ont pu être établies (ces classes sont indiquées en gras dans le Tableau 9.3; les valeurs des indices sont tout de même présentées au Tableau 9.3). Dans tous les cas, les valeurs des critères pour la période avant construction des barrages sont conformes avec celles d'un régime d'écoulement naturel. Pour la période après construction des barrages, seules deux stations, appartenant au groupe (L2,S1), sont classées dans la catégorie influencée. Pour les stations des groupes latitude-superficie dont les fourchettes de valeurs en régime naturel n'ont pas été déterminées - groupes (L2,S3) et (L3,S3) – les variations des indices entre les périodes pré et post-construction des barrages demeurent dans plusieurs cas relativement faibles et pas nécessairement dans le sens anticipé. Enfin, il est important de constater que les stations influencées après construction du barrage sont celles situées juste en aval des barrages (rapports superficie station/barrage supérieures à 0,95) et possédant les plus grandes valeurs d'IRI, à savoir 0,964 pour la station 030309 et 0,139 pour la station 030220.

Tableau 9.3 Tableau comparatif des différents critères avant et après construction des barrages aux sept stations retenues pour les débits quotidiens. Les cellules en gris indiquent des valeurs suggérant une influence de l'opération du barrage pour le test d'unimodalité ou l'indice considéré (valeurs à l'extérieur de la fourchette de valeurs des stations naturelles). Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N; L4 : [48,50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100,1000[km²; S2 : [1000,4000[km²; S3 : ≥ 4000 km². Les classes de latitude-superficie en gras correspondent aux classes pour lesquelles les fourchettes de valeurs en régime naturel n'ont pu être établies. Pour une station donnée, la première ligne des critères (6 colonnes de droite) correspond aux valeurs pour la période avant construction du barrage alors que la deuxième ligne correspond aux valeurs pour la période après construction du barrage.

Classe latitude-superficie	Numéro de station	IRI	Rapport Superficie station/barrage	Usage ²	Critère d'évaluation de l'influence des barrages					
					Test d'unimodalité (p-value)	Indice				
						Crue	Étiage	Crue-étiage	Coefficient de variation	Coefficient de corrélation
(L2, S1)	030309	0,964	0,95	R	0,632	3,77	0,33	0,17	1,53	-0,08
					< 0,001	1,76	0,62	0,45	0,97	0,08
	030215	0,005	0,99	E	1,000	3,10	0,46	0,25	1,42	0,00
					1,000	2,52	0,49	0,29	1,38	0,00
	030220	0,139	1,00	V	0,862	3,43	0,44	0,23	1,22	-0,01
					< 0,001	2,67	0,42	0,25	1,13	0,02
(L2,S3)	043301	0,005	0,97	H	0,684	1,54	0,88	0,66	0,43	0,23
					1,000	1,49	0,75	0,59	0,35	0,26
(L3,S2)	052601	0,045	0,81	V	1,000	3,73	0,38	0,19	1,36	-0,04
					1,000	3,00	0,47	0,26	1,24	-0,05
(L3,S3)	023402	0,001	0,53	IE	0,920	3,52	0,45	0,23	1,46	-0,01
					1,000	3,41	0,49	0,25	1,54	-0,04
(L4,S2)	061801	0,001	1,00 ¹	H	0,982	3,34	0,69	0,33	1,17	-0,05
					1,000	2,62	0,82	0,42	1,10	-0,07

1. La donnée de superficie en amont du barrage est manquante. Un examen de la position du barrage et de la station du même nom montre que la station est située tout juste en aval du barrage. La superficie du bassin en amont du barrage a donc été fixée égale à celle de la station et le rapport des surfaces station/barrage est donc 1.

2. Voir Tableau 4.1 pour la liste des usages.

9.4. Conclusion

Des douze stations possédant des séries mesurées couvrant les périodes antérieures et postérieures à la construction de barrage situés en aval, il appert que, pour des raisons diverses, seules les séries à sept stations peuvent être effectivement utilisées pour comparer les critères d'influence avant et après construction des barrages. Cette comparaison montre que : 1) les critères d'influence indiquent, comme attendu, que ces stations ne sont pas influencées avant la construction des barrages (régime naturel d'écoulement); 2) deux de ces stations sont classées comme influencées après la construction du barrage. Ces deux stations ont en commun de posséder les IRI les plus élevées et de se trouver immédiatement en aval de leur barrage respectif.

CHAPITRE 10 : ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES BARRAGES EN FONCTION DE LEURS CARACTÉRISTIQUES ET DE LA PHYSIOGRAPHIE DES BASSINS

Les chapitres précédents ont défini un ensemble de critères permettant de caractériser l'influence des barrages sur des stations situées en aval. Il faut évidemment disposer dans ce cas des débits mesurés en ces stations sur une période suffisamment longue puisque ces critères sont estimés à partir de ces séries. Qu'en est-il cependant si l'on veut estimer l'influence d'un barrage sur une section de rivière en aval, par exemple, dans l'optique d'y installer une station de jaugeage ? Est-il possible d'évaluer cette influence à partir de certaines caractéristiques physiographiques du bassin et du barrage ? Le présent chapitre entend examiner cette question à travers une analyse critique des résultats des chapitres précédents.

10.1. Relation entre influence des barrages et IRI

L'analyse des résultats pour les critères d'influence aux stations des différents groupes décrits aux Chapitres 7, 8 et 9 a permis d'identifier un paramètre clef déterminant l'influence d'un barrage sur les débits d'une station donnée, soit l'*Impounded Runoff Index* (IRI) (voir la Section 4.3 et notamment l'équation 4.3). Il est important de noter que la définition de l'indice IRI utilisé dans le cadre des présents travaux diffère de celle originellement proposé dans la littérature (équation 4.2). L'IRI utilisé dans la présente étude correspond au rapport entre la capacité totale de stockage des barrages situés en amont d'une station et le volume médian annuel transitant par cette station, un IRI élevé signifiant que les barrages situés en amont sont capables de stocker un volume important d'eau par rapport au débit transitant à la station.

La Figure 10.1 regroupe l'ensemble des résultats des stations des groupes 'une station en aval d'un barrage', 'plusieurs stations en aval d'un barrage' et 'configurations mixtes barrages/stations'. A noter que toutes les stations des différentes classes superficieu-latitude sont considérées, même les stations des classes où seul le test d'unimodalité a

été utilisé pour déterminer l'influence du barrage sur les débits mesurés (voir Tableau 7.1).

Un premier examen de la Figure 10.1 permet de constater que, tel qu'attendu, les couples station-barrages ayant de grands IRI sont plus susceptibles d'être influencés. Bien qu'une majorité de stations respectent cette règle quelques exceptions sont à mentionner (indiquées par les nombres et les flèches à la Figure 10.1). Les paragraphes suivants présentent une discussion de ces cas. Par ailleurs, on observe que le type d'utilisation du barrage semble avoir peu d'influence comparativement à l'IRI.

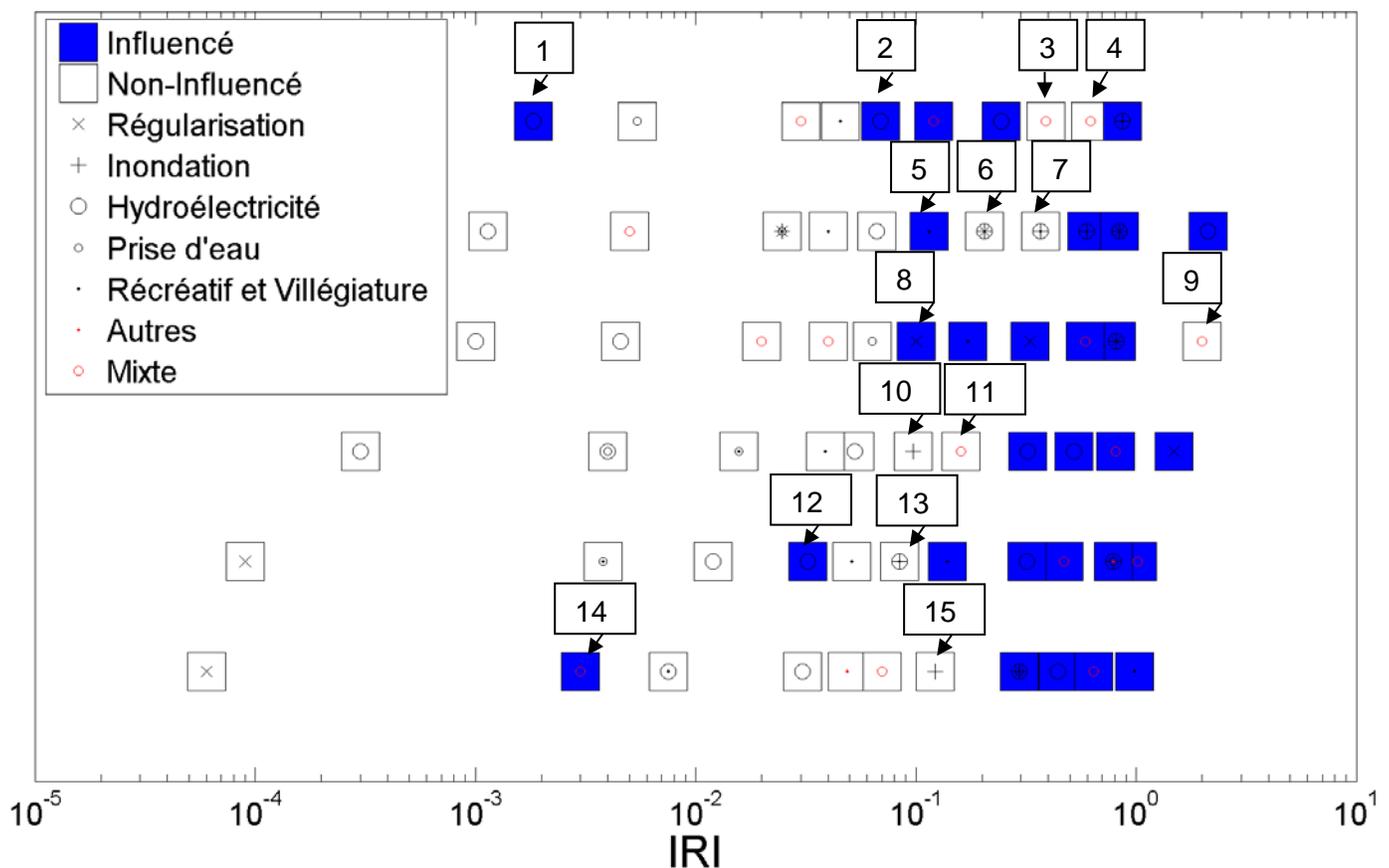


Figure 10.1 Rapport des superficies en amont des barrages et des stations en fonction de l'IRI et du type d'utilisation du barrage, pour les stations des catégories une station en aval d'un barrage, plusieurs stations en aval d'un barrage et configurations mixtes stations/barrages, ces derniers étant identifiés par le terme 'mixte' dans la légende (débits quotidiens). Les symboles en bleu correspondent aux stations influencées alors que les symboles blancs aux stations non influencées. Les stations de toutes les classes superficie-latitude sont considérées. Une séparation verticale a été imposée afin d'éviter une superposition des stations. Les cas identifiés par des nombres sont discutés dans le texte.

1) Cas 1 (IRI de 0,002) : Il s'agit de la station en aval du barrage Marches-Naturelles (numéro 051001). Tel que discuté à la section 7.2, les valeurs limites des indices pour la classe de latitude-superficie à laquelle appartient cette station ([46,48[°N, [100,4000] km² ou L3,S2) sont déterminés à partir de seulement neuf stations naturelles, et donc l'étendue des valeurs des régimes naturelles est possiblement sous-estimée. Considérant les valeurs des indices d'étiage (0,78 pour la station 051001 alors que la valeur minimale des stations naturelles est de 0,77) et de l'indice de crue-étiage (0,48 pour la station 051001 alors que la valeur minimale des stations naturelles est de 0,46), on peut penser que cette station serait possiblement classée non-influencée si l'échantillon de stations naturelles était plus grand.

2) Cas 2 (IRI de 0,07) : La station Madawaska (numéro 011707) en aval du barrage Témiscouata est classée influencée malgré une valeur de IRI relativement faible. Deux critères suggèrent une influence : le test d'unimodalité et le coefficient de corrélation. Le barrage sert à la production hydroélectrique.

3) Cas 3 (IRI de 0,39) : La station Seneca River (numéro 4235600) en aval du groupe ayant le barrage Waterloo Dam en amont n'est pas classée influencée malgré un IRI relativement élevé. Aucune raison particulière ne permet d'expliquer cette situation.

4) Cas 4 (IRI de 0,62) : Il s'agit de la station en aval du barrage de Weare Reservoir Aka Horace Lake (numéro 1091500). Le '*Maximum storage*' indiqué est de 161 585 880 m³, alors que le '*Normal storage*' est de 1 233 480 m³ (voir Section 8.2). Généralement pour l'ensemble des barrages américains considérés ces deux valeurs sont relativement similaires. Dans le cas présent, on note une différence marquée entre celles-ci (rapport de 131 pour 1). Les définitions proposées laissent entendre que le '*Normal storage*' correspond au volume moyen stocké. Le fait qu'il existe une si grande différence pourrait indiquer que, pour des raisons diverses, la capacité de stockage effectivement utilisée est nettement inférieure à la capacité maximale ce qui impliquerait que l'IRI effectif est beaucoup plus petit que le IRI basé sur la capacité maximale de stockage. En effectuant la correction relative au volume de stockage normal (au lieu du volume de stockage maximal), on obtient un IRI d'environ 0,064 au lieu de 0,62, une valeur nettement plus faible qui pourrait expliquer son classement comme station non influencée. À noter que deux barrages se trouvent en aval de cette station (et sont donc utilisés pour le calcul du

IRI) mais que le problème de différence entre '*Maximum storage*' et '*Normal storage*' n'est observé qu'au barrage tout juste en amont de la station.

5) Cas 5 (IRI de 0,114) : La station 1072100, située en amont du barrage Milton Three Ponds Dam, appartient à la classe superficie-latitude (L1,S1). Même si son IRI est comparable à celui de la station 023427 (cas 15), cette station est considérée comme étant influencée. Cela illustre bien le fait qu'il existe une gamme de valeurs d'IRI pour laquelle on ne peut statuer de façon définitive sur l'influence ou non des barrages amont (voir Chapitre 11). Ce barrage est utilisé pour le récréatif et la villégiature.

6) Cas 6 (IRI de 0,205) : La station Du Lièvre (numéro 040624) est la deuxième station située en aval du barrage Mitchinamecus (rapport de surface de 0,21). Elle fait partie de la classe superficie-latitude (L3, S3). Bien que son IRI est relativement élevé et que la station située directement en amont (station 040619, IRI de 0,841) soit considérée influencée, la station du Lièvre ne l'est pas selon le test d'unimodalité.

7) Cas 7 (IRI de 0,37) : Il s'agit de la station en aval du barrage de Wrightsville (numéro 4285500). Le '*Maximum storage*' indiqué est de 44 405 346 m³, alors que le '*Normal storage*' est de 3 453 744 m³ (voir Section 4.2). Ce cas s'apparente au cas 4 indiqué plus haut où l'on note une différence marquée entre '*Maximum storage*' et '*Normal storage*' (rapport de 12,9 pour 1 dans le cas présent). Les définitions proposées laissent entendre que le '*Normal storage*' correspond au volume moyen stocké. Le fait qu'il existe une si grande différence pourrait indiquer que, pour des raisons diverses, la capacité de stockage effectivement utilisée est nettement inférieure à la capacité maximale ce qui impliquerait que l'IRI effectif est beaucoup plus petit que le IRI basé sur les capacités maximales de stockage. Ainsi en considérant le '*Normal storage*' le IRI est de 0,029 au lieu de 0,37 obtenu en prenant le '*Maximum storage*', une valeur qui déplacerait cette station vers la zone propres aux stations non influencées.

8) Cas 8 (IRI de 0,10) : La station numéro 040406 située en aval du barrage X0002813 est classée comme influencée par le test d'unimodalité (voir Tableau 7.2 ; cette station appartient à la classe superficie-latitude (L2,S2)). Bien que les valeurs d'IRI et du rapport des superficies soient très similaires à celui de la station 023427 (cas 15), la présente station est classée comme influencée. Le barrage est utilisé pour régulariser les débits.

9) Cas 9 (IRI de 1,99) : La station 1090800 est associée au même barrage que la station 1090800 (cas 4). Ainsi en considérant le '*Normal storage*' le IRI est de 0,14 au lieu de 1,99 obtenu en prenant le '*Maximum storage*', une valeur qui placerait cette station dans la zone des stations pour lesquelles l'influence est plus incertaine.

10) Cas 10 (IRI de 0,10) : Il s'agit de la station Ossipee Lake (numéro 1065000) classée comme non influencée. Cette station fait partie du groupe superficie-latitude (L1,S1) et les valeurs des critères d'influence se trouvent nettement dans les gammes de valeurs des régimes naturels. Le barrage en amont est utilisé pour le contrôle des inondations tout comme le barrage de la station Chaudière (cas 2) également classée comme non influencée et dont les valeurs de IRI et des rapports de superficie sont similaires au cas présent.

11) Cas 11 (IRI de 0,16) : La station Saranac River (numéro 4273500) est située en aval de sept barrages de petites dimensions. Elle est classée non-influencée. Il s'agit d'un autre exemple de l'existence d'une gamme de valeurs d'IRI pour laquelle on ne peut statuer de façon définitive sur l'influence ou non des barrages amont (voir Chapitre 11).

12) Cas 12 (IRI de 0,03) : La station Jacques-Cartier (numéro 050801) en aval du barrage X0001376 est classée influencée malgré un IRI relativement faible. Le barrage se situe tout juste en aval du lac Jacques Cartier. Cette station est associée à la classe (L3,S2) qui comptent neuf stations naturelles. Trois indices indiquent une influence, à savoir les indices crue, étiage et crue-étiage. Les valeurs de ces indices se distinguent sensiblement des valeurs des régimes naturels. Aucun autre lac à proximité ne permettrait d'expliquer pourquoi cette station est classée comme influencée. Le barrage est utilisé pour la production hydroélectrique. Aucune raison particulière ne permet d'expliquer cette situation.

13) Cas 13 (IRI de 0,084) : La station 4286000 est associée au même barrage que la station 4285500 (cas 7). En effectuant la correction relative au volume de stockage normal (au lieu du volume de stockage maximal), on obtient un IRI d'environ 0,0066 au lieu de 0,084, une valeur qui déplacerait cette station vers la zone des stations non influencées.

14) Cas 14 (IRI de 0,003) : Il s'agit de la station en aval du barrage des Érables (numéro 051502). Tel que discuté à la section 8.2, les valeurs limites des indices pour la classe de latitude-superficie à laquelle appartient cette station ([46,48[°N, [100,4000] km² ou L3,S2) sont déterminés à partir de seulement neuf stations naturelles, et donc l'étendue des valeurs des régimes naturelles est possiblement sous-estimée. Considérant les valeurs des indices d'étiage (0,80 pour la station 051502 alors que la valeur minimale des stations naturelles est de 0,77) et de l'indice de crue-étiage (0,48 pour la station 051502 alors que la valeur minimale des stations naturelles est de 0,46), on peut penser que cette station serait possiblement classée non-influencée si l'échantillon de stations naturelles était plus grand. Ce cas s'apparente beaucoup au cas 1.

15) Cas 15 (IRI de 0,12) : La station Chaudière (numéro 023427) située tout juste en aval du barrage Mégantic appartient à la classe superficie-latitude (L2,S1) et est classée comme non influencée. Ce barrage fait partie des barrages que l'on sait opérés et dont on connaît les dates d'opération (voir Tableau 5.1). Cependant, malgré une valeur d'IRI relativement grande, aucun des critères ne suggère que la station est influencée. Le barrage en amont est utilisé pour le contrôle des inondations tout comme le barrage de la station Ossipee Lake (cas 7), également classée comme non influencée, et dont les valeurs de IRI et des rapports de superficie sont similaires au cas présent.

En résumé :

- Les stations des cas 1 et 14 sont classées comme influencées par un seul critère avec une valeur à la limite de la fourchette des valeurs naturelles. Elles sont donc marginalement influencées.
- Les stations des cas 2, 5 et 8 sont classées influencées mais se trouvent à la frontière entre zones influencée et non influencée.
- Les stations des cas 3, 6 et 11 ne sont pas influencées malgré un IRI relativement élevé. Aucune raison particulière ne permet d'expliquer cette situation.
- Les stations des cas 4, 7, 9 et 13 se trouvent en zone influencée parce que le volume de stockage utile au barrage associé est nettement moindre que la capacité maximale (IRI effectif beaucoup plus petit).

- Les stations des cas 10 et 15 ont en commun d'être en aval de barrages utilisées pour le contrôle des inondations et se trouvent, selon toute vraisemblance, à la frontière entre les zones influencée et non influencée.
- La station du cas 12 est classée influencée malgré des valeurs relativement faibles d'IRI et du rapport superficie station/barrage. Aucune condition particulière ne permet d'expliquer cette situation.

10.2. Relation entre influence des barrages, IRI et type de vannes

Un autre paramètre semble avoir une incidence sur l'influence des barrages, à savoir le type de vannes. Les informations à ce sujet ne sont cependant pas toujours disponibles comme le montre le Tableau 10.1 qui dresse la liste des barrages pour lesquels ces données sont disponibles avec les stations en aval et les résultats de l'analyse d'influence (il s'agit essentiellement des barrages opérés par le CEHQ). Le Tableau 10.2 donne une description des types de vannes et déversoirs rencontrés.

Deux principaux types d'écoulement sont à considérer lorsque l'on cherche à caractériser l'influence d'un barrage sur les débits aval (les informations qui suivent ont été fournies par Mme Julie Lafleur et M. Louis-Guillaume Fortin du Service de la gestion et de l'évaluation de la sécurité de la Direction des barrages publics du CEHQ). Les écoulements par le fond (p. ex. par des vannes de fond) ont comme fonction de contrôler les débits évacués par le barrage alors que les écoulements de surface (p. ex. par une vanne à bascule) ont principalement pour fonction de contrôler le niveau des réservoirs. Ainsi, les débits évacués en surface seront déterminés par le niveau du réservoir (et fluctueront au gré de ce niveau) alors que les débits évacués par le fond seront beaucoup moins sensibles aux fluctuations de niveau du réservoir. En conséquence, il est permis de penser que les stations en aval de barrages dont les débits sont en majorité évacués par des ouvrages qui génèrent des écoulements de fond seront nettement plus « influencées » que des stations en aval de barrage dont les ouvrages génèrent des écoulements de surfaces.

Le Tableau 10.1 montre que la majorité des barrages présentent à la fois des dispositifs (vannes ou déversoirs) susceptibles de générer des débits de surface et de fond. Ce tableau indique cependant le type d'écoulement habituel généré à chacun des ouvrages. On constate que toutes les stations en aval de barrages où domine un écoulement de fond sont influencées. Pour les autres stations en aval de barrages où des écoulements de surface et de fond sont présents, toutes à une exception près sont classées influencées. Cette simple analyse suggère donc qu'effectivement le type d'écoulement (et le type de vannes et déversoirs en place) a une incidence sur la plus ou moins grande influence sur les débits évacués par le barrage.

Tableau 10.1 Liste des stations et des barrages associés dont les caractéristiques relatives aux vannes et déversoirs (types et nombre) sont connues. Les types de vannes et déversoirs sont décrits au Tableau 10.2.

Numéro de la station	Nom du barrage associé	Type (et nombre) de vannes et déversoirs	Écoulement habituel	Influencé
022505	Morin	5 VF	Fond	Oui
022502_022513				Non
061602	des Commissaires	4 VF + 8 DF	Fond	Oui
061004	Portage-des-Roches (Réservoir Kénogami)	20 VD + 13 VF	Fond	Oui
030225	Jules-Allard	2 VF + 2 VS	Fond	Oui
030309	Choinière	4 VF + 2 DF	Fond	Oui
030340				Oui
040619	Mitchinamecus	2 VF 1 DF	Fond	Oui
040624				Non
048603	Kipawa	3 VF	Fond	Oui
040627	Kiamika	2 VF + 2 DF	Fond	Oui
050807	Duchesnay	2 VD	Surtout fond	Oui
052605	St-Didace	4 VD	Surtout fond	Non
052601				Non
023427	Mégantic	7 VD	Surtout fond	Non
023429	Sartigan	5 VF + 11 DF	Surtout surface, mais VF en crue	Non
023402				Non
030215	Waterville	DF + 1 VD	Surtout surface	Non

Tableau 10.2 Types de vannes et déversoirs.

Acronyme	Type de vannes et déversoirs
VF	Vanne de fond
DF	Déversoir fixe
VD	Vanne verticale déversante: en position fermée, l'eau peut déverser par le dessus. En position ouverte, l'écoulement se fait par le bas.
VS	Vanne segment : écoulement par le fond
DP	Déversoir à poutrelles : écoulement par le dessus
VB	Vanne bascule : écoulement par le dessus

La Figure 10.2 reprend les résultats précédents (superficies amont barrage/station et IRI) et les combine aux informations relatives aux vannes et déversoirs afin de voir si l'on ne peut pas ainsi mieux déterminer l'influence des barrages sur les débits mesurés. Toutes les stations considérées influencées se retrouvent à droite du diagramme, c'est-à-dire dans la zone de grand IRI (il faut se souvenir que le groupe de stations présentées à la Figure 10.2 constitue un sous-groupe des stations se trouvant à la Figure 10.1). Par ailleurs, tous ces cas influencés correspondent à des cas d'écoulement de fond à une exception près où l'écoulement est un écoulement surtout par le fond. On constate par ailleurs une forte corrélation entre le type d'écoulement et l'IRI, les barrages présentant de grands IRI ($IRI > 0,2$) étant des barrages de certaines dimensions favorisant les écoulements par le fond. Par ailleurs, les barrages de faibles IRI ($IRI < 0,04$) tentent à générer des écoulements de surfaces alors que les barrages d'IRI intermédiaires ($0,04 < IRI < 0,2$) génèrent des écoulements surtout de fond (à une exception près).

La forte corrélation entre IRI et le type d'écoulement implique un certain degré de redondance entre ces deux paramètres. Le recours au type d'écoulement pourra toutefois être utile pour estimer approximativement la valeur d'IRI dans les cas où les données de base nécessaires à l'estimation de la valeur d'IRI à un barrage donné ne sont pas disponibles (à condition évidemment qu'il soit possible d'établir le type d'écoulement à ce barrage).

Au final, on retrouve un seul cas qui se distingue légèrement des autres, soit la station 040624 (cas 8 de la section 10.1 et identifié par le chiffre 1 à la Figure 10.2). Cette station est la deuxième située en aval du barrage Mitchinamecus (rapport de surface de 0,21) et fait partie de la classe superficie-latitude (L3, S3). Bien que son IRI (0,21) soit relativement élevé et que le barrage en amont génère un écoulement de fond, elle n'est pas considérée influencée. La Figure 10.2 montre cependant que la zone de valeur d'IRI se trouve à la frontière entre stations influencées et non-influencées.

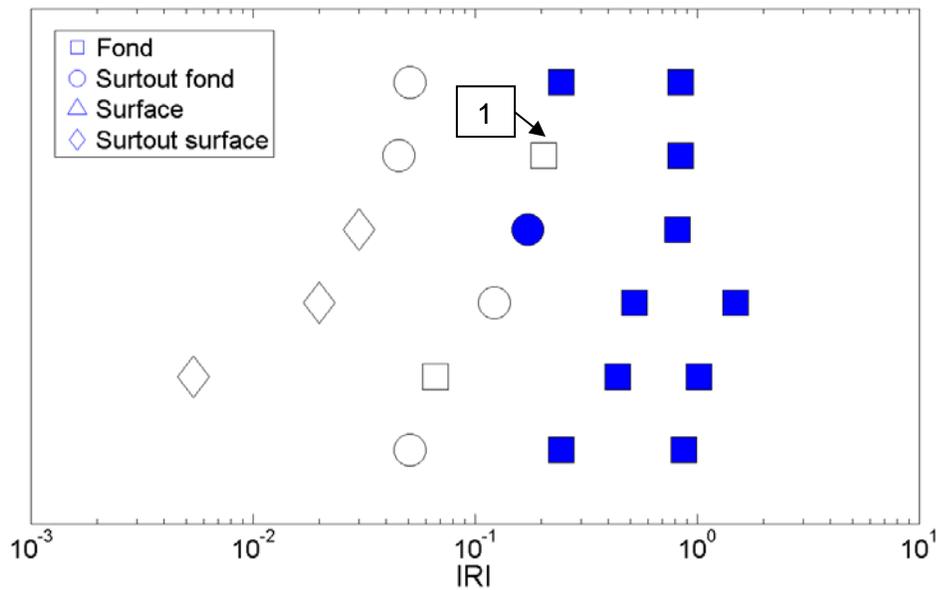


Figure 10.2 Rapport des superficies en amont des barrages et des stations en fonction du IRI pour les stations des groupes une station en aval d'un barrage et plusieurs stations en aval d'un barrage (débits quotidiens) pour lesquels les informations relatives aux vannes sont disponibles (Tableau 10.1). Les symboles pleins correspondent aux stations influencées et les symboles évidés aux stations non influencées. Une séparation verticale a été imposée afin d'éviter une superposition des stations.

CHAPITRE 11 : PROCÉDURE PROPOSÉE POUR L'ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES BARRAGES

Ce chapitre est divisé en deux sections. La première (Section 11.1) explique la procédure proposée pour l'évaluation de l'influence des barrages dans le cas où l'on dispose de séries de débits (donc dans le cas de stations existantes) et la seconde (Section 11.2) dans le cas de tronçons (ou de stations) pour lesquels des séries de débits conséquentes ne sont pas disponibles.

11.1. Évaluation de l'influence à partir des séries de débits

L'évaluation de l'influence repose dans ce cas sur l'estimation des critères d'influence définis au Chapitre 6, critères estimés à partir des séries de débits disponibles et s'appliquent donc à une station existante. La station doit être localisée entre les latitudes 43°N et 48°N et être à l'exutoire de bassins versants de plus de 100 km². Si ce n'est pas le cas, l'analyse de cette série impose de définir des classes de latitude-superficie applicable à cette station et de procéder à une analyse des séries de débits naturels pour cette nouvelle classe latitude-superficie. L'approche décrite dans cette section permet de déterminer l'influence aux échelles quotidienne, hebdomadaire et mensuelle.

L'approche proposée comporte les étapes suivantes :

1. Procéder à un examen préalable de la série des débits quotidiens disponible afin de s'assurer que cette série : 1) a un minimum de cinq années de données valides (une année est valide si elle compte moins de 10 % de données manquantes); 2) ne contient pas plus de cinq années consécutives non valides; 3) ne présente aucune rupture (voir Section 4.3.2); 4) ne présente pas de structure en palier (voir Section 4.3.3); 5) ne présente pas de longues périodes avec des valeurs nulles (voir Section 4.3.1). Les résultats de l'analyse risquent d'être faussés si la série ne satisfait pas à ces exigences. Il est primordial de faire un examen visuel de l'hydrogramme des débits quotidiens afin d'identifier tout élément « suspect » qui pourrait être la manifestation d'inhomogénéités attribuables à des changements d'instrumentation, de configuration du site, *etc.* Il est recommandé d'écarter cette station et de ne pas

procéder à l'analyse si l'hydrogramme présente des anomalies majeures. À défaut d'un tel travail de validation, ces inhomogénéités pourraient être faussement attribuées à l'influence du barrage.

2. Vérifier la présence de lacs naturels de tailles importantes en amont de la station. Il est important de noter qu'une influence détectée sur les critères de crue, d'étiage, de corrélation et du coefficient de variation pourrait être causée par le lac en question. On peut s'attendre à ce que le rapport du volume de stockage du lac sur le volume annuel médian à la station détermine le degré d'influence de ce lac sur les débits, au même titre que pour un barrage (cette hypothèse n'a pu être approfondie dans le cadre de la présente étude vu l'absence de données sur les lacs naturels). Par principe de précaution, il serait donc préférable de se méfier des influences détectées (autres que la non-unimodalité) pour les stations situées en aval de lacs de tailles comparables aux réservoirs des barrages.
3. Estimer les valeurs des indices de crue (Équation 6.3), d'étiage (Équation 6.8), de crue-étiage (Équation 6.12), du coefficient de variation (Équation 6.13) et du coefficient de corrélation (Équation 6.14) à partir des séries de débits quotidiens.
4. Identifier la classe de latitude-superficie à laquelle la station appartient à partir des données de latitudes et de superficies à cette station.
5. Identifier les fourchettes de valeurs naturelles si la station appartient aux classes latitude-superficie suivantes : (L1,S1), (L2,S1), (L3,S1), (L4,S1), (L4,S2) (à noter que la classe (L1,S1) couvre le territoire des États-Unis). Pour les classes (L3,S2) et (L4,S3), il convient de demeurer prudent dans l'utilisation des fourchettes naturelles puisqu'elles sous-estiment vraisemblablement l'étendue des valeurs réelles. Si la station n'appartient à pas à l'une de ces classes, il faudra définir une nouvelle classe latitude-superficie et identifier des stations naturelles appartenant à cette classe afin de définir les fourchettes de valeurs naturelles.
6. Construire la distribution des débits quotidiens à cette station et procéder à un examen visuel de cette distribution. Il est recommandé d'appliquer la procédure définie à la Section 6.1.1.4, particulièrement si la moyenne des débits se situe près des valeurs associées au changement de précision des instruments (i.e. 10, 100 ou 1000 m³/s, pour le Québec).
7. Appliquer le test d'unimodalité à la distribution des débits (seuil de confiance à 95%) afin de vérifier si la distribution peut être considérée unimodale, auquel cas la

station est classée comme non influencée pour ce test. Dans le cas contraire, la station est influencée selon ce test.

8. Comparer les valeurs des indices estimés à l'étape 3 aux fourchettes de valeurs naturelles pour la classe latitude-superficie correspondante (étape 5; Tableau 7.3). Toute station pour laquelle un des critères (test d'unimodalité ou l'un des indices d'influence) indique une influence est classée comme influencée. Autrement, la station est classée non influencée.
9. L'analyse pour les échelles hebdomadaire et mensuelle est similaire (les Tableaux 7.4 et 7.5 doivent être utilisés). A noter que si l'indice crue, étiage ou crue-étiage classe la station comme influencée à l'échelle quotidienne, elle est nécessairement influencée aux échelles hebdomadaire et mensuelle puisque les valeurs de ces indices demeurent inchangées à ces échelles.

11.2. Évaluation de l'influence à partir des caractéristiques du barrage et du bassin

Cette procédure s'applique aux cas de tronçons de rivières situés en aval de barrages pour lesquels des mesures de débits ne sont pas disponibles. Cette procédure peut également s'appliquer aux stations pour lesquelles les débits mesurés couvrent une période trop courte ou sont inadéquats pour l'estimation des critères d'influence (p. ex. trop de données manquantes). L'évaluation de l'influence repose dans ce cas sur les caractéristiques des barrages et des caractéristiques physiographiques du bassin en amont de ce tronçon. Les analyses du Chapitre 10 ont permis de montrer que les valeurs d'IRI jouent un rôle clef dans l'évaluation de l'influence de barrages à une station.

La procédure proposée comporte les étapes suivantes :

1. Procéder à une analyse de la configuration générale du bassin en amont du tronçon considéré afin de détecter la présence de lacs ou la présence d'autres barrages situés sur des affluents ou en amont des barrages tout juste en aval du tronçon considéré.

2. Procéder à l'estimation du IRI (Section 4.3, équation 4.3). L'expression suivante, établie à partir des stations naturelles, entre le volume annuel médian et la superficie du bassin amont (Figure 11.1) est proposée pour estimer le volume annuel médian au tronçon :

$$\text{Volume annuel médian (m}^3\text{)} = 4,32 \times 10^6 + 6,48 \times 10^5 \times \text{Superficie amont (km}^2\text{)}$$

Dans le cas où les données sur le barrage ne permettent pas d'estimer la valeur du IRI et que des informations sur le type d'écoulement (de fond ou de surface) sont disponibles, les fourchettes de valeurs suivantes d'IRI sont proposées comme première approximation des valeurs de IRI : 1) écoulement de fond : $\text{IRI} > 0,2$; 2) écoulement surtout de fond : $0,01 < \text{IRI} < 0,2$; 3) écoulement de surface : $\text{IRI} < 0,01$.

3. Utiliser ces valeurs pour déterminer le niveau de vraisemblance de l'influence du barrage à partir du diagramme de la Figure 11.2. Le niveau d'influence est déterminé comme suit :

IRI < 0,02 : Le tronçon ou la station est **non influencé**.

0,02 ≤ IRI < 0,50 : Le tronçon ou la station est **possiblement influencé**.

0,50 ≤ IRI : Le tronçon ou la station est **influencé**.

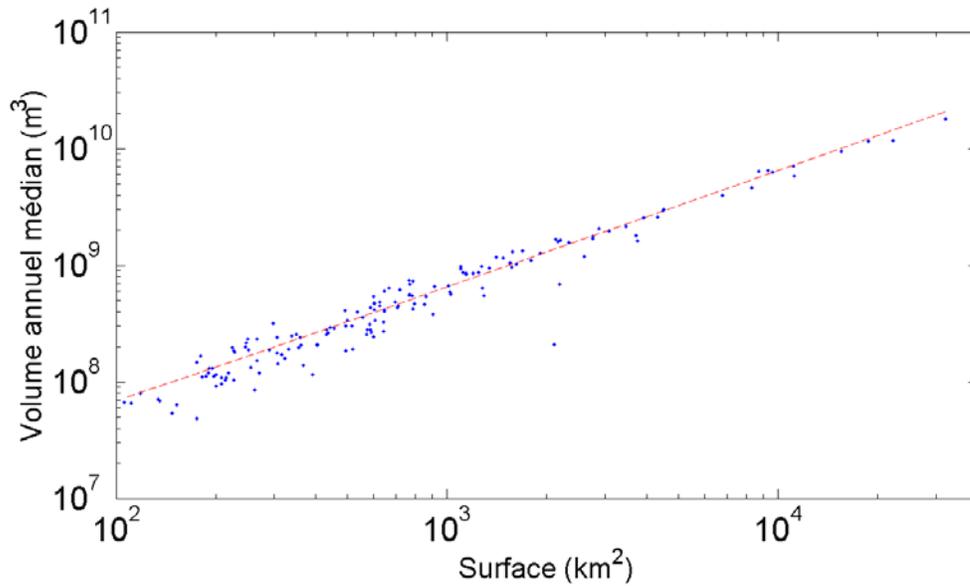


Figure 11.1 Régression linéaire (tirets rouges) entre le volume annuel médian et la superficie du bassin en amont. Les points correspondent aux valeurs des stations naturelles ($R^2 = 0,998$).

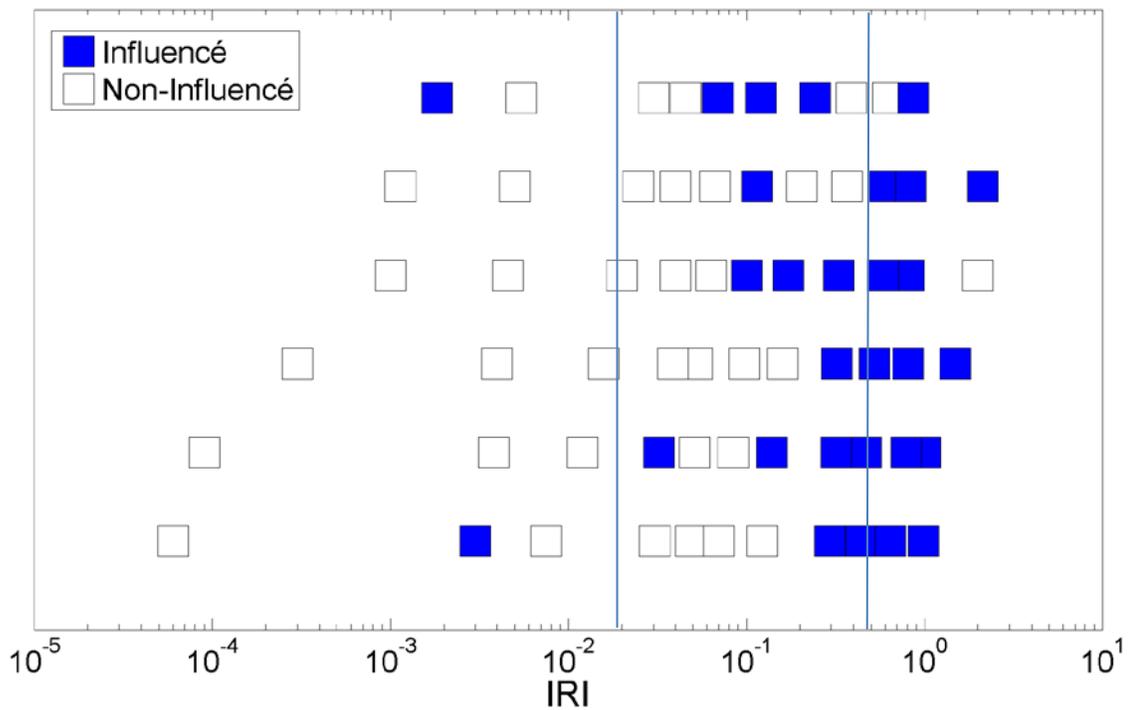


Figure 11.2 Diagramme des zones d'influence en fonction des valeurs d'IRI. Les carrés correspondent aux valeurs des stations en aval de barrages considérés dans cette étude (bleus pour les stations influencées et blancs pour les stations non influencées).

Le diagramme de la Figure 11.2 a été établi en fonction des résultats précédents. Les délimitations des zones d'influence demeurent, compte tenu du nombre de stations analysées, dans une certaine mesure subjective. Les zones 'non influencées' ($IRI < 0,02$), 'potentiellement influencées' ($0,02 \leq IRI < 0,50$) et 'influencées' ($0,50 \leq IRI$) ont été définies afin de permettre le regroupement des stations influencées et non influencées selon les zones correspondantes. Cependant, deux stations classées influencées se retrouvent dans la zone non influencée (cas 1 et 14 de stations avec critères d'influence très près des limites des valeurs naturelles tel que discutés à la section 10.1) et deux non influencées se retrouvent dans la zone influencée (cas 4 et 9 – stations/barrages américains - de différences entre les volumes maximales de stockage et les volumes moyens de stockage utilisées tel discutés à la section 10.1). Ces divers cas correspondent à des situations très particulières qui n'ont pas été considérées lors de l'établissement des zones influencées/non influencées (en toute rigueur ces points sont tout de même reproduits à la Figure 11.2). Il sera important d'ailleurs lors de l'estimation des valeurs d'IRI pour d'autres cas de prendre garde à de telles situations. Enfin, il est important, si la valeur d'IRI d'un tronçon donné se trouve à la frontière de deux zones du diagramme de la Figure 11.2 d'interpréter le résultat avec prudence et discernement.

CHAPITRE 12 : CONCLUSION

Le présent projet avait pour objectif de définir des critères quantitatifs permettant de déterminer si les débits mesurés à une station hydrométrique sont influencés par la présence d'un barrage situé en amont de cette station. Par 'débits influencés', nous entendons que les hydrogrammes mesurés en ces stations diffèrent significativement des hydrogrammes enregistrés à des stations similaires soumis à des régimes naturels d'écoulement (*i.e.* en l'absence d'un barrage). L'influence ainsi définie englobe à la fois les impacts dus à la construction du barrage (régime d'écoulement avant et après la construction du barrage) et les impacts que l'opération du barrage peut avoir sur le régime d'écoulement. La distinction des conséquences de ces deux types d'impact (construction et opération du barrage) sur les hydrogrammes demeure une question difficile à résoudre dans le présent contexte compte tenu des données disponibles. En effet, elle implique de pouvoir identifier des caractéristiques de la réponse hydrologique qui seraient uniquement affectées par l'opération des barrages alors que d'autres seraient uniquement affectées par la construction du barrage. Certains auteurs se sont intéressés à départager ces deux types d'impact (p. ex. White *et al.* 2005; Zimmermann *et al.* 2010), mais ces mêmes auteurs soulignent que des données à résolution temporelle inférieure à la journée (p. ex. séries de débits horaires) sont nécessaires pour distinguer ces impacts.

Dans la situation d'une station située en aval d'un barrage, la présente étude propose six critères, cinq indices et un test statistique, pour déterminer si oui ou non les débits enregistrés à cette station diffèrent des séries à une station naturelle similaire (sans influence de barrage). Ces critères sont liés à certaines conditions hydrologiques susceptibles d'être modifiées par les barrages, à savoir la forme de la distribution des débits, les crues, les étiages, la variabilité du débit et l'autocorrélation des séries de débits. Le test statistique cherche à vérifier le caractère unimodale de la distribution des débits, une distribution non-unimodale étant associée à un régime d'écoulement influencé par le barrage. Des critères retenus l'unimodalité de la distribution est sans doute le meilleur indicateur de l'influence spécifique de l'opération des barrages, les divers modes de la distribution des débits correspondant aux différents débits de gestion du barrage. Quant aux autres indices, ils sont vraisemblablement indistinctement modifiés par la présence et par l'opération des barrages.

L'influence du barrage sur la séquence de débits mesurés à la station est déterminée en comparant les valeurs des indices retenus aux valeurs des indices rencontrés aux stations naturelles. Afin de tenir compte de l'effet de la latitude et de la superficie sur ces indices, les stations ont été préalablement classées en fonction de divers groupes de latitude et de superficie. Des fourchettes de valeurs naturelles sont ainsi définies pour chaque indice de chaque groupe latitude-superficie. Advenant que la valeur d'un indice est extérieure à la fourchette de valeurs aux stations naturelles, la station est dès lors classée influencée selon cet indice. Pour le test d'unimodalité, une station sera influencée si l'hypothèse d'unimodalité est rejetée au seuil de 95 %. Enfin une station sera classée comme influencée si un ou plusieurs des critères concluent en une influence du barrage.

L'influence des barrages a pu être évaluée pour 45 stations appartenant à des classes latitude-superficie pour lesquelles le nombre de stations naturelles était insuffisant pour permettre d'estimer les fourchettes de valeurs naturelles (cinq des 12 classes latitude-superficie considérées). De ces 45 stations, 22 ($\approx 49\%$) sont identifiées comme influencées par l'un ou l'autre des critères à l'échelle quotidienne. Quatorze stations (14) sont influencées selon le test d'unimodalité, 15 selon l'indice crue-étiage, 12 selon l'indice étiage et 11 selon l'indice autocorrélation. Les deux indices les moins discriminants sont l'indice de crue et le coefficient de variation avec 10 et 9 stations influencées respectivement. Cinq stations ont été classées influencées par uniquement un des critères (un par le critère étiage-crue, un par le critère autocorrélation et trois par le test d'unimodalité).

L'approche proposée permet donc de déterminer si une station donnée est influencée par la présence d'un barrage lorsque les débits à cette station sont connus et satisfont à certains critères. L'analyse des configurations disponibles a permis, dans un deuxième temps, le développement d'une approche applicable aux cas où l'on s'intéresse à un tronçon donné, par exemple dans la perspective d'y implanter une station de jaugeage. Dans un tel cas, on peut se demander si les débits en ce site sont susceptibles d'être influencés ou non par un barrage en amont. L'approche développée dans ce cas repose sur un seul paramètre clef, à savoir l'IRI, défini comme le rapport entre la somme des volumes maximaux de stockage des barrages situés en amont d'une station donnée sur le volume médian annuel transitant à cette station. Un diagramme d'influence est

proposé permettant sur la base de cette valeur d'évaluer la vraisemblance de l'influence du barrage sur les débits à ce tronçon.

Toutefois plusieurs éléments importants se doivent d'être soulignés :

- Comme mentionné plus haut, il demeure difficile de distinguer l'impact de la présence des barrages de l'impact associé spécifiquement à l'opération des barrages. Pour pouvoir y parvenir, outre la comparaison des indices entre stations sans barrages, stations avec barrages dont les dates d'opération sont connues et stations avec barrages dont on ignore s'ils sont ou non opérés, il aurait fallu disposer de données de stations avec barrage en amont non opérés ou n'ayant pas été opérés pendant de longue période. La comparaison de ce dernier groupe avec les groupes de stations avec barrages opérés aurait permis de mieux distinguer l'impact de la présence et de l'opération des barrages et notamment de confirmer l'hypothèse formulée plus haut, à savoir que la présence de plusieurs modes dans la distribution des débits est causée par l'opération des barrages.
- Le test d'unimodalité semble être le mieux à même de caractériser l'influence des barrages et notamment l'opération des barrages. En effet, ce test permet de détecter les débits de gestion de certains barrages. L'absence d'autres modes dans la distribution des débits ne signifie toutefois pas que le barrage n'influence pas les débits aux stations (on peut en effet penser que, pour certains barrages, les règles de gestion en place, de par la nature et les objectifs de gestion, ne visent pas à maintenir certains débits cibles). Le fait que les distributions des débits à certaines stations naturelles localisées plus au nord présentent plusieurs modes montrent également qu'il faut demeurer prudent puisqu'apparemment certains bassins versants peuvent naturellement générer des distributions des débits quotidiens multimodales.
- Plusieurs facteurs autres que la présence du barrage ou son opération peuvent avoir un impact sur la forme de la distribution tel qu'un changement majeur dans l'occupation du territoire (p. ex. déforestation à grande échelle) ou encore une modification importante de la morphologie du cours d'eau suite à une crue exceptionnelle. De même un changement d'instrumentation au site, une

modification de la courbe de tarage peuvent modifier la forme de la distribution et favoriser l'apparition de plus d'un mode dans la distribution des débits. Souvent de tels changements pourront modifier de façon abrupte les séries de débits mesurés. Il peut donc être important d'analyser l'évolution de l'occupation du territoire ou encore les données relatives à l'instrumentation ou à la configuration du site de jaugeage si l'on dispose de données à ce sujet.

- La comparaison des valeurs des indices aux stations naturelles et avec barrage en amont suppose que l'échantillon de stations en régime naturelle est suffisant pour bien couvrir la gamme des valeurs des indices en pareil régime. Ainsi, seules les classes latitude-superficie comportant 9 stations ou plus ont été retenues pour analyse. Ce nombre est arbitraire et a été fixé essentiellement pour des considérations pratiques. Deux classes ($[46,48[^\circ\text{N}$, $[1000,4000[\text{ km}^2$) et ($[48,50[^\circ\text{N}$, $\leq 4000 \text{ km}^2$) comptent un moins grand nombre de stations naturelles, à savoir 9 et 12 respectivement. Il est donc recommandé d'être très prudent lors de l'inférence de l'influence pour des stations appartenant à ces deux classes latitude-superficie.
- Le fait qu'une valeur d'un indice soit à l'extérieur de la fourchette des valeurs naturelles n'est pas forcément dû à l'influence du barrage. Outre le fait que l'étendue des valeurs naturelles puisse être sous-estimée, il n'est pas exclu que les caractéristiques propres à certains bassins en amont d'une station fassent en sorte que les valeurs des indices à ces stations sont atypiques et que ce caractère singulier ne soit en rien attribuable à l'effet du barrage. De même l'influence du barrage peut modifier la valeur d'un indice sans que cette modification soit suffisante pour l'exclure de la fourchette des valeurs rencontrées aux stations naturelles. Dans ce cas on pourra conclure que la station n'est pas influencée alors qu'elle l'est.
- L'influence ou non du barrage sur les débits mesurés est conditionnée par les critères retenus. Même si aucun de ces critères ne permet de conclure en l'Influence du barrage, il n'est pas dit qu'une autre caractéristique des hydrogrammes ou des distributions, non prise en compte par les critères retenus, ne soit pas affectée par les barrages. Dans une telle optique, le nombre de critères

retenus devrait être augmenté afin de s'assurer de couvrir le plus de caractéristiques possibles.

- La présence de lacs de grande dimension dans le bassin amont doit également être examinée et prise en compte. Ces lacs peuvent modifier plusieurs des critères d'influence de façon tout à fait similaire au réservoir d'un barrage. Une station en régime naturelle d'écoulement (sans barrage en amont) située en aval d'un lac pourra dès lors présenter toutes les caractéristiques d'une station influencée.
- Le mandat initial du projet prévoyait l'utilisation d'un modèle hydrologique, plus spécifiquement le modèle HYDROTEL, pour mieux caractériser l'influence des barrages. L'idée de base était d'utiliser le modèle HYDROTEL pour établir les conditions des écoulements naturels en un site donné et d'ensuite comparer ces conditions d'écoulement aux conditions observées. Cette avenue a rapidement été abandonnée puisqu'il était difficile de discerner dans les écarts entre débits observés et simulés, la part qui revenait aux différences attribuables à la présence des barrages de celle provenant des incertitudes du modèle.

Les améliorations suivantes sont proposées afin de répondre en partie aux critiques et limitations précédentes :

- Augmenter le nombre de stations naturelles dans les classes latitude-superficie afin de mieux définir les fourchettes de valeurs aux stations naturelles. De même il serait important de compléter l'échantillon pour les classes de latitude-superficie pour lesquels le nombre de stations est nettement insuffisant pour établir les fourchettes de valeurs naturelles.
- Évaluer et utiliser éventuellement un plus grand nombre de critères afin de mieux caractériser les séries de débits en s'inspirant notamment des indices IHA (voir Richter *et al.* 1996; Magilligan et Nislow 2005). Ainsi des cinq catégories considérées par les indices IHA, plusieurs ne sont que partiellement couverts par les indices proposés dans la présente étude. À titre d'exemple, il serait sans doute intéressant de dénombrer le nombre de séquence de débits croissants et décroissants et d'inversion de débit (*'Number of rises'*, *'Number of falls'* et

'*Reversals*'; Magilligan et Nislow 2005) et de comparer ces valeurs entre stations naturelles et en aval de barrages.

- Envisager un examen plus attentif des séries de débits aux stations dont les dates d'opération sont connues. L'analyse réalisée dans le cadre de la présente étude a permis d'identifier un certain nombre de changements des débits mesurés mais n'a pas permis d'établir un lien direct entre les opérations et certaines variables spécifiques qui pourraient par la suite être utilisées pour déterminer de façon univoque que les débits à une station donnée sont influencés par l'opération et uniquement par l'opération du barrage. L'utilisation d'autres indices, notamment des indices IHA, est une voie à explorer.

CHAPITRE 13 : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Assani A.A., Gravel E., Buffin-Bélanger T., Roy A.G. (2005). Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisées au Québec (Canada). *Revue des Sciences de l'Eau* 18: 103–127.
- Assani A.A., Stichelbout E., Roy A.G., Petit F. (2006). Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes in Quebec (Canada). *Hydrol. Process.*, 20(16): 3485-3501. DOI:10.1002/hyp.6150.
- Assani A.A., Quessy J.-F., Mesfioui M., Matteau, M. (2010). An example of application: The ecological "natural flow regime" paradigm in hydroclimatology. *Adv. Wat. Resour.*, 33(5): 537-545. DOI: 10.1016/j.advwatres.2010.02.005.
- Assani A.A., Landry R., Daigle J., Chalifour A. (2011). Reservoirs Effects on the Interannual Variability of Winter and Spring Streamflow in the St-Maurice River Watershed (Quebec, Canada). *Water Resour. Manage.* 25(14): 3661-3675. DOI: 10.1007/s11269-011-9875-1.
- Batalla R.J., Gomez C.M., Kondolf G.M. (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *J. Hydrol.*, 290(1-2): 117-136. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.12.002.
- FitzHugh T.W., Vogel R.M. (2011). The impact of dams on flood flows in the United States. *River Res. App.*, 27(10): 1192-1215. DOI: 10.1002/rra.1417.
- Gao Y., Vogel R.M., Kroll C.N., Poff N.L., Olden J.D. (2009). Development of representative indicators of hydrologic alteration. *J Hydrol.*, 374(1-2): 136-147. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.009.
- Graf W.L. (2006). Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, 79(3-4): 336-360. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.06.022.

- Gross E.J., Moglen G.E. (2007). Estimating the hydrological influence of Maryland state dams using GIS and the HEC-1 model. *J. Hydrol. Engrg (ASCE)*, 12(6): 690-693. DOI: 10.1061/(asce)1084-0699(2007)12:6(690).
- Hartigan J. A., Hartigan P. M. (1985). The dip test of unimodality. *Ann. Stat.*, 13(1): 70-84. DOI: 10.1214/aos/1176346577.
- Lajoie F., Assani A.A., Roy, A.G., Mesfioui M. (2007). Impacts of dams on monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons. *J. Hydrol.*, 334(3-4): 423-439. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.10.019.
- Magilligan F.J., Nislow K.H. (2005). Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 71(1-2): 61-78. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.08.017.
- Matteau M., Assani A.A., Mesfioui M. (2009). Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impact studies. *J. Hydrol.* 371, 120-128. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.03.022.
- Poff N.L., Bledsoe B.P., Cuhaciyan C.O. (2006). Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems. *Geomorphology*, 79(3-4): 264-285. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.06.032.
- Poff N.L., Hart D.D (2002). How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. *Bioscience*, 52(8): 659-668. DOI: 10.1641/0006-3568(2002)052[0659:hdvawi]2.0.co;2.
- Richter B.D., Baumgartner J.V., Powell J., Braun D.P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4): 1163-1174. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x.
- Schmidt J.C., Wilcock P.R. (2008). Metrics for assessing the downstream effects of dams, *Water Resour. Res.* 44, W04404. DOI: 10.1029/2006wr005092.

- Singer M.B. (2007). The influence of major dams on hydrology through the drainage network of the Sacramento River basin, California. *River Res. App.*, 23(1): 55-72. DOI: 10.1002/rra.968.
- The Nature Conservancy (2006). Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User s Manual, 81 p.
- White M.A., Schmidt J.C., Topping D.J. (2005). Application of wavelet analysis for monitoring the hydrologic effects of dam operation: Glen Canyon Dam and the Colorado River at Lees Ferry, Arizona. *River Res. App.*, 21(5): 551-565. DOI: 10.1002/rra.827.
- Zhang C., Mapes B.E., Soden B.J. (2003). Bimodality in tropical water vapor. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 129, 2847–2866.
- Zimmerman J.K.H., Letcher B.H., Nislow K.H., Lutz, K.A. Magilligan F.J. (2010). Determining the effects of dams on subdaily variation in river flows at a whole-basin scale. *River Res. App.*, 26(10): 1246-1260. DOI: 10.1002/rra.1324.
- Wolski P., Todd M.C., Murray-Hudson M.A., Tadross, M. (2012). Multi-decadal oscillations in the hydro-climate of the Okavango River system during the past and under a changing climate. *J. Hydrol.*, 475: 294-305. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.10.018.

ANNEXE A - LISTE DES STATIONS NON RETENUES

Il est important de noter les stations de ce tableau répondaient aux critères de sélection suivants : 1) situés entre les latitudes 43°N et 50°N; 2) superficie du bassin amont de plus de 100 km²; 3) avoir au moins de 5 années de données valides.

Numéro de la station	Nom de la station	Province/État	Raison
1128500	Connecticut R At First Conn Lk Nr Pittsburg	New-Hampshire	Débit en palier
4253500	Middle Branch Moose River At Old Forge	New-York	Débit en palier
4270500	Chateaugay River Near Chateaugay	New-York	Informations manquantes
1138500	Connecticut River At Wells River	Vermont	Informations manquantes
1059000	Androscoggin River Near Auburn	Maine	Rupture
1049500	Cobbosseecontee Stream At Gardiner	Maine	Rupture
1069500	Mousam River Near West Kennebunk	Maine	Rupture
1033000	Sebec River At Sebec	Maine	Rupture
1044550	Spencer Stream At Mouth, Near Grand Falls	Maine	Rupture
1154500	Connecticut River At North Walpole	New-Hampshire	Rupture
1144500	Connecticut River At West Lebanon	New-Hampshire	Rupture
1080500	Lake Winnepesaukee Outlet At Lakeport	New-Hampshire	Rupture
1077000	Squam River At Ashland	New-Hampshire	Rupture
1085500	Contoocook R Bl Hopkinton Dam at W Hopkinton	New-Hampshire	Rupture
4260500	Black River At Watertown	New-York	Rupture
4265000	Grass River At Pyrites	New-York	Rupture
4256000	Independence River At Donnattsburg	New-York	Rupture
4262000	Oswegatchie River Near Oswegatchie	New-York	Rupture
4267500	Raquette River At South Colton	New-York	Rupture
4250750	Sandy Creek Near Adams	New-York	Rupture
050119	Matawin	Québec	Rupture et débit en palier
050701	Portneuf	Québec	Rupture
1151500	Ottauquechee River At North Hartland	Vermont	Rupture

1022260	Pleasant River near Epping	Maine	Longue période de données manquantes
1075000	Pemigewasset River at Woodstock	New-Hampshire	Longue période de données manquantes
1157000	Ashuelot River near Gilsum	New-Hampshire	Longue période de données manquantes
4275500	Ausable River Near Au Sable Forks	New-York	Longue période de données manquantes
4273700	Salmon River At South Plattsburgh	New-York	Longue période de données manquantes
4268800	W Br St. Regis R Nr Parishville	New-York	Longue période de données manquantes
023440	---	Québec	Longue période de données manquantes
030262	---	Québec	Longue période de données manquantes
030318	---	Québec	Longue période de données manquantes
052230	---	Québec	Longue période de données manquantes
030246	Aux Saumons	Québec	Longue période de données manquantes
024013	Bécancour	Québec	Longue période de données manquantes
023432	Bras D'Henri	Québec	Longue période de données manquantes
030110	Bulstrode	Québec	Longue période de données manquantes
030344	Chibouet	Québec	Longue période de données manquantes
040810	Désert	Québec	Longue période de données manquantes
023433	Du Loup	Québec	Longue période de données manquantes
052228	Noire	Québec	Longue période de données manquantes
040127	Simon	Québec	Longue période de données manquantes
030260	Tomifobia	Québec	Longue période de données manquantes
051005	Montmorency	Québec	Longue période de données manquantes
030208	Saint-François	Québec	Longue période de données manquantes
030302	Yamaska	Québec	Rupture
1133000	East Branch Passumpsic River near East Haven	Vermont	Longue période de données manquantes

ANNEXE B - LISTE DES STATIONS NATURELLES RETENUES

Numéro	Nom	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Province/État	Surface drainée (km ²)	Années d'opération	Classe (latitude, superficie) ¹
010101	La Grande Rivière	48,48	-64,53	Québec	534	1972-1997	(L4,S1)
010801	Bonaventure	48,10	-65,46	Québec	2130	1969-1983	(L4,S2)
010802	Bonaventure	48,19	-65,56	Québec	1906	1983-2010	(L4,S2)
010901	Petite Rivière Cascapédia	48,19	-65,81	Québec	1410	1969-1981	(L4,S2)
010902	Petite Rivière Cascapédia	48,23	-65,73	Québec	1340	1980-2005	(L4,S2)
011001	Cascapédia	48,67	-66,19	Québec	1480	1969-1979	(L4,S2)
011003	Cascapédia	48,63	-66,17	Québec	1690	1978-2010	(L4,S2)
011201	-	48,16	-66,35	Québec	1140	1969-2001	(L4,S2)
011204	Nouvelle	48,16	-66,35	Québec	1139	2002-2010	(L4,S2)
011507	Matapédia	48,09	-67,10	Québec	2760	1969-1999	(L4,S2)
011508	-	48,49	-67,45	Québec	555	1982-2010	(L4,S1)
011509	Matapédia	48,11	-67,13	Québec	2753	1996-2010	(L4,S2)
013001	-	46,56	-70,08	Québec	598	1969-1977	(L3,S1)
020401	York	48,83	-64,63	Québec	1010	1969-1981	(L4,S2)
020404	York	48,81	-64,92	Québec	647	1980-2010	(L4,S1)
020602	Dartmouth	48,98	-64,70	Québec	626	1970-2010	(L4,S1)
020802	Madeleine	49,20	-65,29	Québec	1200	1969-1996	(L4,S2)
021405	Sainte-Anne	49,07	-66,49	Québec	786	1969-1975	(L4,S1)
021407	Sainte-Anne	49,04	-66,48	Québec	772	1973-2010	(L4,S1)
021502	Cap-Chat	49,06	-66,67	Québec	721	1969-1996	(L4,S1)
021915	Neigette	48,52	-68,16	Québec	494	1974-1998	(L4,S1)
022003	Rimouski	48,41	-68,56	Québec	1615	1969-2010	(L4,S2)
022504	Du Loup	47,58	-69,67	Québec	500	1969-1979	(L3,S1)
022507	-	47,61	-69,64	Québec	515	1978-2010	(L3,S1)
022703	-	47,36	-69,94	Québec	783	1970-1981	(L3,S1)
022704	Ouelle	47,38	-69,95	Québec	796	1982-2010	(L3,S1)

023004	Boyer	46,82	-70,90	Québec	191	1996-2010	(L3,S1)
023401	Beaurivage	46,66	-71,29	Québec	708	1969-2010	(L3,S1)
023422	Famine	46,16	-70,64	Québec	696	1969-2010	(L3,S1)
023701	-	46,50	-72,11	Québec	356	1972-2007	(L3,S1)
024003	Bécancour	46,31	-71,45	Québec	914	1969-2010	(L3,S1)
024007	-	46,19	-72,28	Québec	2330	1970-2001	(L3,S2)
024014	Bécancour	46,20	-72,10	Québec	2163	1999-2010	(L3,S2)
030234	Eaton	45,47	-71,66	Québec	646	1969-2009	(L2,S1)
030239	Eaton Nord	45,38	-71,53	Québec	267	1969-1975	(L2,S1)
030242	-	45,34	-71,57	Québec	190	1969-1982	(L2,S1)
030282	Au Saumon	45,58	-71,39	Québec	769	1974-2009	(L2,S1)
030291	-	45,86	-72,52	Québec	270	1985-1996	(L2,S1)
030316	-	45,95	-72,86	Québec	323	1969-2010	(L2,S1)
030339	Noire	45,62	-72,60	Québec	583	1981-1997	(L2,S1)
030346	Noire	45,63	-72,58	Québec	585	1996-2003	(L2,S1)
030415	-	45,49	-73,19	Québec	308	1973-2010	(L2,S1)
030420	Aux Brochets	45,12	-73,00	Québec	404	1979-2010	(L2,S1)
030421	Lacadie	45,39	-73,37	Québec	367	1979-2010	(L2,S1)
030424	Aux Brochets	45,16	-73,05	Québec	584	2001-2010	(L2,S1)
030907	Des Anglais	45,16	-73,82	Québec	642	1973-2010	(L2,S1)
030908	Trout	45,05	-74,23	Québec	404	1973-1982	(L2,S1)
030915	Norton	45,15	-73,71	Québec	227	1979-1989	(L2,S1)
040129	Doncaster	46,10	-74,12	Québec	106	1974-2007	(L3,S1)
040814	Picanoc	46,08	-76,07	Québec	1290	1975-2005	(L3,S2)
040830	Gatineau	47,08	-75,75	Québec	6768	1974-2010	(L3,S3)
040840	-	46,08	-76,07	Québec	1277	2004-2010	(L3,S2)
041902	Dumoine	46,35	-77,82	Québec	3756	1969-2010	(L3,S2)
042103	Maganasipi	46,33	-78,35	Québec	575	1970-2003	(L3,S1)
042607	Kipawa	46,97	-78,04	Québec	2110	1969-1997	(L3,S2)
043012	Kinojévis	48,37	-78,85	Québec	2594	1969-2010	(L4,S2)
046701	-	45,56	-73,98	Québec	200	1971-1979	(L2,S1)
046708	Du Chêne	45,56	-73,92	Québec	215	1979-1985	(L2,S1)

050135	Croche	47,77	-72,74	Québec	1563	1969-2010	(L3,S2)
050304	Batiscan	46,59	-72,40	Québec	4504	1969-2010	(L3,S3)
050305	Batiscan	47,04	-72,28	Québec	2870	1969-1983	(L3,S2)
050409	Bras Du Nord	46,98	-71,85	Québec	646	1969-2010	(L3,S1)
051301	Du Gouffre	47,45	-70,51	Québec	865	1969-1996	(L3,S1)
052229	Saint-Esprit	45,87	-73,48	Québec	208	1988-2006	(L2,S1)
052233	-	45,85	-73,49	Québec	641	1979-2010	(L2,S1)
060101	Petit Saguenay	48,19	-70,05	Québec	712	1974-2000	(L4,S1)
060102	Petit Saguenay	48,09	-70,03	Québec	433	1998-2010	(L4,S1)
060601	Ha! Ha!	48,27	-70,87	Québec	572	1976-1996	(L4,S1)
061020	Aux Écorces	48,18	-71,64	Québec	1115	1971-2010	(L4,S2)
061022	Pikauba	47,94	-71,38	Québec	490	1969-2010	(L3,S1)
061024	Cyriac	48,24	-71,29	Québec	350	1997-2010	(L4,S1)
061307	-	48,41	-71,70	Québec	306	1996-2010	(L4,S1)
061801	Petite Rivière Péribonca	48,81	-72,05	Québec	1020	1974-2010	(L4,S2)
061901	Ashuapmushuan	48,69	-72,49	Québec	15515	1969-2010	(L4,S3)
061905	Ashuapmushuan	49,28	-73,36	Québec	11100	1969-2010	(L4,S3)
061906	Ashuapmushuan	49,26	-73,71	Québec	4330	1969-1993	(L4,S3)
061909	Aux Saumons	48,68	-72,51	Québec	591	1982-2010	(L4,S1)
062101	Mistassibi	48,90	-72,21	Québec	9320	1969-2004	(L4,S3)
062102	Mistassini	48,89	-72,27	Québec	9631	1969-2009	(L4,S3)
062111	Mistassini	49,32	-72,64	Québec	4480	1969-1975	(L4,S3)
062114	-	48,94	-72,17	Québec	8743	2003-2010	(L4,S3)
062701	Valin	48,49	-70,97	Québec	768	1974-2010	(L4,S1)
062802	Sainte-Marguerite Nord-Est	48,27	-69,91	Québec	1100	1976-1998	(L4,S2)
062803	Sainte-Marguerite Nord-Est	48,27	-69,91	Québec	1097	1998-2010	(L4,S2)
070203	Des Escoumins	48,35	-69,46	Québec	787	1984-1992	(L4,S1)
070401	Portneuf	48,65	-69,18	Québec	3085	1973-1994	(L4,S2)
071401	Godbout	49,33	-67,65	Québec	1577	1974-2010	(L4,S2)
080101	Harricana	48,60	-78,11	Québec	3724	1969-2010	(L4,S2)
080104	Turgeon	49,99	-79,10	Québec	11200	1969-2004	(L4,S3)
080704	Waswanipi	49,70	-75,98	Québec	18700	1969-1982	(L4,S3)

080707	Bell	49,75	-77,62	Québec	22275	1969-2010	(L4,S3)
080717	Mégiscane	48,37	-77,12	Québec	8310	1969-1983	(L4,S3)
080718	Waswanipi	49,86	-77,19	Québec	31964	1969-2009	(L4,S3)
132901	-	49,62	-63,44	Québec	604	1980-1993	(L4,S1)
1010000	St. John River At Ninemile Bridge	46,70	-69,72	Maine	3473	1950-2013	(L3,S2)
1010070	Big Black River Near Depot Mtn	46,89	-69,75	Maine	443	1983-2013	(L3,S1)
1016500	Machias River Near Ashland	46,63	-68,44	Maine	852	1951-1983	(L3,S1)
1017960	Meduxnekeag R Above S Br Medux. R Nr Houlton	46,11	-67,88	Maine	228	2003-2013	(L3,S1)
1022330	Narraguagus River At Deblois	44,74	-68,01	Maine	250	2002-2009	(L2,S1)
1022500	Narraguagus River At Cherryfield	44,61	-67,94	Maine	588	1950-2013	(L2,S1)
1027200	North Branch Penobscot River Nr Pittston Farm	45,94	-69,99	Maine	601	2001-2013	(L2,S1)
1031300	Piscataquis River At Blanchard	45,27	-69,58	Maine	306	1996-2013	(L2,S1)
1031450	Kingsbury Stream At Abbot Village	45,19	-69,45	Maine	247	1997-2013	(L2,S1)
1031500	Piscataquis River Near Dover-Foxcroft	45,18	-69,32	Maine	772	1950-2013	(L2,S1)
1036500	Kenduskeag Stream Near Kenduskeag	44,90	-68,88	Maine	456	1950-1979	(L2,S1)
1047730	Wilson Stream At East Wilton	44,62	-70,20	Maine	119	1977-1984	(L2,S1)
1054200	Wild River At Gilead	44,39	-70,98	Maine	180	1964-2013	(L2,S1)
1055000	Swift River Near Roxbury	44,64	-70,59	Maine	251	1950-2013	(L2,S1)
1055500	Nezinscot River At Turner Center	44,27	-70,23	Maine	438	1950-2013	(L2,S1)
1064801	Bearcamp River At South Tamworth	43,83	-71,29	New-Hampshire	175	1993-2013	(L1,S1)
1072500	Salmon Falls River Near South Lebanon	43,33	-70,93	Maine	363	1950-1969	(L1,S1)
1074520	East Branch Pemigewasset River At Lincoln	44,05	-71,66	New-Hampshire	298	1993-2013	(L2,S1)
1130000	Upper Ammonoosuc River Near Groveton	44,63	-71,47	New-Hampshire	601	1950-2013	(L2,S1)
1131500	Connecticut River Near Dalton	44,41	-71,72	New-Hampshire	3921	1950-2013	(L2,S2)
1134500	Moose River At Victory	44,51	-71,84	Vermont	195	1950-2013	(L2,S1)
1135000	Moose River At St. Johnsbury	44,42	-72,00	Vermont	332	1950-1983	(L2,S1)
1135300	Sleepers River (site W-5) Near St. Johnsbury	44,44	-72,04	Vermont	111	1990-2013	(L2,S1)
1137500	Ammonoosuc River At Bethlehem	44,27	-71,63	New-Hampshire	227	1950-2013	(L2,S1)

	Junction						
1138000	Ammonoosuc River Near Bath	44,15	-71,99	New-Hampshire	1023	1950-1980	(L2,S2)
1139000	Wells River At Wells River	44,15	-72,07	Vermont	255	1950-2013	(L2,S1)
1142000	White River Near Bethel	43,81	-72,66	Vermont	624	1950-1955	(L1,S1)
1144000	White River At West Hartford	43,71	-72,42	Vermont	1787	1950-2013	(L1,S2)
1145000	Mascoma River At West Canaan	43,65	-72,09	New-Hampshire	208	1950-1978	(L1,S1)
1153500	Williams River At Brockways Mills	43,21	-72,52	Vermont	267	1950-1984	(L1,S1)
1153550	Williams River Near Rockingham	43,19	-72,49	Vermont	290	1986-2013	(L1,S1)
1154000	Saxtons River At Saxtons River	43,14	-72,49	Vermont	187	1950-2013	(L1,S1)
1155000	Cold River At Drewsville	43,13	-72,39	New-Hampshire	214	1950-1978	(L1,S1)
1321000	Sacandaga River Near Hope	43,35	-74,27	New-York	1272	1950-2013	(L1,S2)
1330500	Kayaderosseras Creek Nr West Milton	43,04	-73,91	New-York	218	1950-1995	(L1,S1)
1343060	West Canada Creek Near Wilmur	43,37	-74,96	New-York	668	2001-2013	(L1,S1)
4217500	Tonawanda Creek Near Alabama	43,09	-78,45	New-York	598	1955-1989	(L1,S1)
4217750	Murder Creek Near Akron	43,05	-78,51	New-York	152	1982-1999	(L1,S1)
4218000	Tonawanda Creek At Rapids	43,09	-78,64	New-York	904	1955-2013	(L1,S1)
4230500	Oatka Creek At Garbutt	43,01	-77,79	New-York	518	1950-2013	(L1,S1)
4232047	Irondequoit Cr @ Linden Ave., E Rochester	43,12	-77,48	New-York	262	1973-1989	(L1,S1)
423205025	Irondequoit Creek At Empire Blvd, Rochester	43,18	-77,53	New-York	391	1990-2002	(L1,S1)
4235271	Clyde River At Lock 26, Clyde,	43,06	-76,84	New-York	2189	1950-1966	(L1,S2)
4258500	Deer River At Copenhagen	43,90	-75,66	New-York	224	1950-1956	(L1,S1)
4258700	Deer River At Deer River	43,93	-75,59	New-York	246	1956-1968	(L1,S1)
4265432	Grass River At Chase Mills	44,85	-75,08	New-York	1550	2003-2013	(L2,L2)
4268600	E Br St. Regis R Nr Meacham Lake	44,55	-74,31	New-York	135	1958-1968	(L2,S1)
4268700	St. Regis River At St. Regis Falls	44,67	-74,55	New-York	606	1958-1968	(L2,S1)
4269500	Deer River At Brasher Iron Works	44,89	-74,69	New-York	495	1958-1968	(L2,S1)
4273800	Little Ausable River Near Valcour	44,59	-73,50	New-York	176	1991-2013	(L2,S1)
4276842	Putnam Creek East Of Crown Point Center	43,94	-73,46	New-York	134	1990-2013	(L1,S1)
4280350	Mettawee River Near Pawlet	43,37	-73,22	Vermont	182	1984-2009	(L1,S1)

4280450	Mettawee River Near Middle Granville	43,46	-73,28	New-York	433	1990-2013	(L1,S1)
4282650	Little Otter Creek At Ferrisburg	44,20	-73,25	Vermont	148	1990-2013	(L2,S1)
4282780	Lewis Creek At North Ferrisburg	44,25	-73,23	Vermont	200	1990-2013	(L2,S1)
4287000	Dog River At Northfield Falls	44,18	-72,64	Vermont	197	1950-2013	(L2,S1)
4288000	Mad River Near Moretown	44,28	-72,74	Vermont	360	1950-2013	(L2,S1)
4293000	Missisquoi River Near North Troy	44,97	-72,39	Vermont	339	1950-2013	(L2,S1)
4293500	Missisquoi River Near East Berkshire	44,96	-72,70	Vermont	1241	1950-2013	(L2,S2)
4294000	Missisquoi River At Swanton	44,92	-73,13	Vermont	2201	1990-2013	(L2,S2)
4296000	Black River At Coventry	44,87	-72,27	Vermont	316	1951-2013	(L2,S1)

1. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44[°N; L2 : [44, 46[°N; L3 : [46, 48[°N; L4 : [48, 50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².

ANNEXE C - GROUPE 'UNE STATION EN AVAL D'UN BARRAGE'

LISTE DES BARRAGES

Numéro du barrage	Nom du barrage	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Province/État	Superficie amont (km ²)	IRI	Volume de retenue (x 10 ⁶ m ³)	Usage ¹
X0003925	Jules-Allard	45,95	-71,28	Québec	1200	0,865	739,16	IHV
X0002489	Mégantic	45,57	-70,88	Québec	775	0,122	62,72	I
X0000730	Morin	47,65	-69,51	Québec	261	0,244	38,88	H
X0005460	Kiamika	46,63	-75,12	Québec	702	0,814	435,00	RIH
X0005503	Mitchinamecus	47,21	-75,18	Québec	932	0,841	533,00	RIH
X0004063	St-Didace	46,33	-73,28	Québec	837	0,051	26,60	V
X0000899	Portage-Des-Roches (réservoir Kénogami)	48,31	-71,21	Québec	3393	0,442	706,55	H
X0000748	Des Commissaires	48,20	-72,24	Québec	562	0,524	186,96	H
X0002635	Waterville	45,28	-71,89	Québec	515	0,005	1,50	E
X0001439	Duchesnay	46,87	-71,63	Québec	213	0,173	35,12	V
X0002992	Kipawa	46,77	-78,98	Québec	5957	1,492	673,00	R
X0005678	Cowansville	45,21	-72,73	Québec	202	0,025	3,35	RIE
X0003727	St-Raphaël	46,78	-70,73	Québec	793	0,005	2,83	H
X0005651	Lac-Brome	45,28	-72,51	Québec	198	0,329	55,57	R
X0007340	North Hatley	45,28	-71,96	Québec	610	0,139	46,97	V
X0004205	Rawdon	46,05	-73,73	Québec	1259	0,008	5,98	HV
X0002813	X0002813	45,87	-75,08	Québec	1370	0,096	66,15	R
X0000662	Témiscouata	47,57	-68,63	Québec	2616	0,069	124,00	H
X0003101	Bourque	47,60	-77,30	Québec	8029	0,321	1936,00	H
X2015235	Principal Manouane	49,95	-70,60	Québec	4600	0,031	74,00	H
X0001640	Cyrille-Delage	46,90	-71,37	Québec	171	0,063	15,60	E
X0001602	Marches-Naturelles	46,88	-71,15	Québec	1100 ²	0,002	1,92	H
X0000571	X0000571	48,40	-68,55	Québec	1585	0,000	0,30	H

X0001376	X0001376	47,53	-71,22	Québec	213	0,032	62,86	H
X0007895	X0007895	48,83	-72,05	Québec	1090 ²	0,001	0,67	H
X0005879	Dunn	45,25	-73,80	Québec	2331	0,000	0,11	R
X0005876	Rivière Châteauguay	45,09	-74,17	Québec	1070	0,000	0,03	R
X0002206	Barrage Beaudet	46,07	-71,98	Québec	342	0,02	3,8	EV
6590	East Canada Lake Dam	43,02	-74,74	New-York	746	0,012	7,23	H
6715	Milton Three Ponds Dam	43,41	-70,99	New-Hampshire	280	0,114	18,50	V
6826	Ossipee Lake	43,79	-71,06	New-Hampshire	925	0,097	58,22	I
6831	Eel Weir	43,82	-70,45	Maine	1129	0,790	473,64	IHEVP
6851	Stillwater - North Dam	43,90	-75,05	New-York	443	0,597	222,03	IHV
6954	Cranberry Lake	44,22	-74,85	New-York	373	0,294	74,01	IHEV
7269	West Grand Lake	45,18	-67,78	Maine	420	2,126	788,91	H
7302	Brownville Dam	45,31	-69,04	Maine	777	0,049	31,56	A

1. Voir Tableau 4.1 pour la liste des usages.

2. Cette donnée est manquante. Un examen de la position du barrage et de la station du même nom montre que la station est située tout juste en aval du barrage. La superficie du bassin en amont du barrage a donc été fixée égale à celle de la station.

LISTE DES STATIONS

Numéro de la station	Nom de la station	Barrage associé	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Province/État	Surface drainée (km ²)	Rapport Surface amont barrage/station	Années d'opération	Classe ¹ (Latitude, Surface)
030225	Saint-François	Jules-Allard	45,94	-71,28	Québec	1230	0,98	1988-2012	(L2,S2)
023427	Chaudière	Mégantic	45,57	-70,88	Québec	775	1,00	1976-2012	(L2,S1)
022505	Fourchue	Morin	47,65	-69,51	Québec	261	1,00	1944-2012	(L3,S1)
040627	Kiamika	Kiamika	46,65	-75,25	Québec	883	0,79	1989-2012	(L3,S1)
040619	Mitchinamecus	Mitchinamecus	47,18	-75,15	Québec	1050	0,89	1977-2012	(L3,S2)
052605	Maskinongé	St-Didace	46,33	-73,28	Québec	836	1,00	2000-2012	(L3,S1)
061004	Chicoutimi	Portage-Des-Roches	48,31	-71,21	Québec	3390	1,00	1925-2012	(L4,S2)
061602	Ouiatchouan	Des Commissaires	48,20	-72,24	Québec	562	1,00	1972-2012	(L4,S1)
030215	Coaticook	Waterville	45,28	-71,90	Québec	519	0,99	1979-2012	(L2,S1)
050807	Ontaritzi	Duchesnay	46,87	-71,64	Québec	213	1,00	1976-2012	(L3,S1)
048603	Gordon	Kipawa	46,77	-79,03	Québec	6022	0,99	1987-2012	(L3,S3)
030314	Yamaska Sud-Est	Cowansville	45,21	-72,75	Québec	210	0,96	1970-2012	(L2,S1)
023106	Du Sud	St-Raphaël	46,82	-70,76	Québec	821	0,97	1966-2012	(L3,S1)
030351	Yamaska	Lac-Brome	45,28	-72,51	Québec	190	1,04 ²	2005-2012	(L2,S1)
030220	Massawippi	North Hatley	45,28	-71,96	Québec	610	1,00	1965-2012	(L2,S1)
052212	Ouareau	Rawdon	46,03	-73,71	Québec	1270	0,99	1966-2012	(L3,S2)
040406	De La Petite Nation	X0002813	45,79	-75,09	Québec	1330	1,03 ³	1973-2012	(L2,S2)
011707	Madawaska	Témiscouata	47,54	-68,60	Québec	2712	0,96	2004-2012	(L3,S2)
043003	Des Outaouais	Bourque	47,84	-77,55	Québec	10300	0,78	1977-2012	(L3,S3)
062209	Manouane	Principal Manouane	49,88	-70,93	Québec	1955	1,00 ⁴	2004-2012	(L4,S2)
050904	Saint-Charles	Cyrille-Delage	46,82	-71,32	Québec	364,1	0,47	1969-2012	(L3,S1)
051001	Montmorency	De Marches-Naturelles	46,90	-71,15	Québec	1100	1,00 ³	1965-2012 ⁵	(L3,S2)

022003	Rimouski	X0000571	48,40	-68,55	Québec	1610	0,98	1962-2012	(L4,S2)
050801	Jacques-Cartier	X0001376	46,88	-71,52	Québec	2010	0,11	1923-2012	(L3,S2)
061801	Petite Rivière Péribonca	X0007895	48,80	-72,03	Québec	1090	1,00 ³	1999-2012	(L4,S2)
030905	Châteauguay	Barrage Dunn	45,33	-73,76	Québec	2490	0,94	1970-2012	(L2,S2)
030919	Châteauguay	Rivière Chateauguay (Huntingdon)	45,09	-74,17	Québec	1060	1,01 ²	2004-2012	(L2,S2)
030106	Bulstrome	Barrage Beaudet	46,07	-71,98	Québec	338	1,01 ²	1976-2012	(L3,S1)
1348000	East Canada Creek At East Creek	East Canada Lake Dam	43,02	-74,74	New-York	749	1,00	1950-1995	(L1,S1)
1072100	Salmon Falls River At Milton	Milton Three Ponds Dam	43,41	-70,99	New-Hampshire	280	1,00	1968-2005	(L1,S1)
1065000	Ossipee River At Effingham Falls	Ossipee Lake	43,80	-71,06	New-Hampshire	855	1,08 ²	1950-1990	(L1,S1)
1064000	Presumpscot River At Outlet Of Sebago Lake	Eel Weir	43,82	-70,45	Maine	1142	0,99	1950-2000	(L1,S2)
4257000	Beaver R Blw Stillwater Dam Nr Beaver River	Stillwater - North Dam	43,90	-75,05	New-York	443	1,00	1950-1987	(L1,S1)
4261000	Oswegatchie River At Cranberry Lake	Cranberry Lake	44,22	-74,85	New-York	363	1,03 ²	1950-1982	(L2,S1)
1019000	Grand Lake Stream At	West Grand Lake	45,17	-67,77	Maine	588	0,71	1950-2013	(L2,S1)

	Grand Lake Stream								
1033500	Pleasant River Near Milo	Brownville Dam	45,28	-69,00	Maine	837	0,93	1950-1979	(L2,S1)

1. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44[°N; L2 : [44, 46[°N; L3 : [46, 48[°N; L4 : [48, 50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².
2. Bien que la station soit bel et bien en aval du barrage, la valeur disponible de la superficie en amont du barrage est légèrement supérieure à la superficie en amont de la station.
3. La donnée de superficie en amont du barrage est manquante. Un examen de la position du barrage et de la station du même nom montre que la station est située tout juste en aval du barrage. La superficie du bassin en amont du barrage a donc été fixée égale à celle de la station et le rapport des surfaces station/barrage est donc 1.
4. Il est mentionné dans le fichier de données transmis que : « Le 25 septembre 2003, le bassin versant à la station a été réduit à 1955 km² dû à la dérivation d'une partie de l'écoulement par un ouvrage appartenant à Hydro-Québec.» Ne pouvant présumer des conséquences de cette affirmation sur la superficie du bassin versant en amont du barrage, le rapport des superficies barrage/station a été fixé à 1.
5. Bien que la série complète couvre une plus longue période, seules les données postérieures à 1965 ont été considérées pour analyse puisque la série présentait avant cette date une dizaine d'années de données manquantes.
6. Bien que la série complète couvre une plus longue période, seules les données postérieures à 1979 ont été considérées pour analyse puisque la série présentait avant cette date une dizaine d'années de données manquantes.

ANNEXE D - GROUPE 'PLUSIEURS STATIONS EN AVAL D'UN BARRAGE'

Les lignes en gris correspondent aux barrages et les lignes blanches suivantes correspondent aux stations associées ordonnées de l'amont vers l'aval.

Numéro station/barrage	Nom station/barrage	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Superficie amont (km ²)	Rapport superficie amont barrage/station	IRI	Volume de retenue (x10 ⁶ m ³)	Usage ²	Classe ¹ (Latitude, Surface)
X0000730	Barrage Morin	47,65	-69,51	261	---	---	38,88	H	---
022505	Fourchue	47,65	-69,51	261	1,00	0,244	---	---	(L3,S1)
022502_022513	Du Loup	47,82	-69,52	1050	0,25	0,066	---	---	(L3,S2)
X0005503	Barrage Mitchinamecus	47,21	-75,18	932	---	---	533,00	RIH	---
040619	Mitchinamecus	47,18	-75,15	1050	0,89	0,841	---	---	(L3,S2)
040624	Du Lièvre	46,79	-75,31	4530	0,21	0,205	---	---	(L3,S3)
X0004063	Barrage St-Didace	46,33	-73,28	837	---	---	26,60	V	---
052605	Maskinongé	46,33	-73,28	836	1,00	0,051	---	---	(L3,S1)
052601	Maskinongé	46,30	-73,10	1030	0,81	0,045	---	---	(L3,S2)
X0002206	Barrage Beudet	46,07	-71,98	341,9	---	---	3,8	EV	---
30106	Bulstrode	46,07	-71,98	338	1,01 ³	0,016	---	---	(L3,S1)
30103	Nicolet	46,06	-72,31	1550	0,22	0,004	---	---	(L3,S2)
6814	Chittenden Reservoir	43,72	-72,92	41	---	---	27,25	H	---
4281500	East Creek At Rutland	43,63	-72,99	132	0,31	0,322	---	---	(L1,S1)
4282000	Otter Creek At Center Rutland	43,60	-73,01	795	0,05	0,053	---	---	(L1,S1)

6984	Wrightsville	44,31	-72,58	176	---	---	44,41	IHV	---
4285500	North Branch Winooski River At Wrightsville	44,30	-72,58	179	0,98	0,370	---	---	(L2,S1)
4286000	Winooski River At Montpelier	44,26	-72,59	1028	0,17	0,084	---	---	(L2,S2)
7263	Nicatous Stream Dam	45,14	-68,20	184	---	---	458,24	V	---
1035000	Passadumkeag River At Lowell	45,18	-68,47	769	0,24	0,983	---	---	(L2,S1)
1036000	Penobscot River At Passadumkeag	45,18	-68,62	17485	0,01	0,039	---	---	(L2,S3)
1034500	Penobscot River At West Enfield	45,24	-68,65	16633	0,01	0,040	---	---	(L2,S3)

1. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43, 44[°N; L2 : [44, 46[°N; L3 : [46, 48[°N; L4 : [48, 50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².
2. Voir Tableau 4.1 pour la liste des usages.
3. Bien que la station soit bel et bien en aval du barrage, la valeur disponible de la superficie en amont du barrage est légèrement supérieure à la superficie en amont de la station.

ANNEXE E - GROUPE 'CONFIGURATIONS MIXTES STATIONS/BARRAGES'

Les lignes consécutives en gris ou en blanc correspondent à une séquence de stations et de barrages. Les séquences stations/barrages sont ordonnées depuis l'amont vers l'aval.

Numéro station/barrage	Nom station/barrage	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Superficie amont (km ²)	Rapport ¹ superficie amont barrage/station	IRI ²	Volume de retenue ³ (x 10 ⁶ m ³)	Usage ⁴	Classe ⁵ (Latitude, Surface)
X0003925	Barrage Jules-Allard	45,95	-71,28	1200	---	---	739,2	IHV	---
030225	Station Saint-François	45,94	-71,28	1230	0,98	0,87	739,2	---	(L2,S2)
X0002572	Barrage Aylmer	45,76	-71,41	1712	---	---	215,6	IHV	---
030278	Station Saint-François	45,76	-71,41	1730	0,99	0,81	954,7	---	(L2,S2)
X0002574	Barrage De Weedon	45,65	-71,45	2940	---	---	1,1	H	---
030284	Station Saint-François	45,66	-71,47	2940	1,00	0,47	957,8	---	(L2,S2)
X0004816 ⁶	Barrage de Carillon	45,57	-74,37	143000	---	---	171,0	H	---
043301	Station des Prairies	45,52	-73,85	146000	0,98	0,005	171,0	---	(L2,S3)
6622	Weare Reservoir Aka Horace Lake	43,11	-71,77	75	---	---	10,61	V	---
6614	Everett Dam	43,09	-71,66	166	---	---	161,59	IV	---
1090800	Piscataquog River BI	43,09	-71,66	163	1,01	1,99	172,2	---	(L1,S1)

	Everett Dam, Nr E Weare								
6588	Gregg S Falls (Dam)	43,02	-71,57	518	---	---	5,79	HVF	---
1091500	Piscataquog River Near Goffstown	43,02	-71,55	523	0,99	0,62	178,0	---	(L1,S1)
7264	Second Connecticut Lake Dam	45,14	-71,18	117	---	---	15,42	I	---
7250	First Connecticut Lake Dam	45,09	-71,29	212	---	---	140,62	I	---
7238	Murphy Dam (Francis Lake)	45,05	-71,38	451	---	---	162,05	V	---
1129200	Connecticut R Below Indian Stream Nr Pittsburg	45,04	-71,44	658	0,69	0,64	318,1	---	(L2,S1)
6540	Waterloo Dam	42,90	-76,86	1922	---	---	292,40	HN	---
6545	Seneca Falls Dam	42,92	-76,79	1987	---	---	11,10	HN	---
6558	Mud Lock C&s Canal Dam	42,95	-76,74	4071	---	---	817,80	IN	---
4235600	Seneca River (Érie Canal) Near Port Byron	43,08	-76,65	7291	0,56	0,39	1121,3	---	(L1,S3)
6997	Bolton Falls Dam	44,36	-72,82	2163	---	---	22,89	H	---
7051	Essex No. 19 Dam	44,48	-73,12	2701	---	---	7,51	H	---
4290500	Winooski River	44,48	-73,14	2704	1,00	0,02	30,4	---	(L2,S2)

	Near Essex Junction, Vt								
6962	Bartlett Carry Dam	44,25	-74,29	198	---	---	87,48	VA	---
6988	Lake Flower Dam	44,32	-74,13	464	---	---	18,18	HVNP	---
7030	Franklin Falls Dam	44,44	-73,97	754	---	---	9,94	H	---
7061	Union Falls Dam	44,51	-73,92	852	---	---	12,71	H	---
7110	High Falls Dam	44,63	-73,76	1269	---	---	3,29 ⁷	H	---
7136	Kent Falls Dam	44,70	-73,61	1469	---	---	0,327 ⁷	H	---
4273500	Saranac River At Plattsburgh	44,68	-73,47	1575	0,93	0,16	131,9	---	(L2,S2)
7173	Forge Dam	44,84	-74,04	261	---	---	8,41	EV	---
7190	High Falls Dam	44,91	-74,09	290	---	---	0,0419 ⁷	H	---
7197	Chateaugay Chasm Dam	44,93	-74,11	306	---	---	0,0925	H	---
4270510	Chateaugay River Below Chateaugay	44,96	-74,13	391	0,78	0,04	8,5	---	(L2,S1)
X0001149	Barrage des Érables	47,88	-70,47	1072	---	---	1,32	R	---
X0001115	Barrage de Clermont	47,70	-70,22	1655	---	---	2,2	E	---
051502	Malbaie	47,68	-70,22	1700	0,97	0,003	3,5	---	(L3,S2)
X0002489	Barrage Mégantic	45,57	-70,88	775	---	---	62,7	I	---
023427	Chaudière	45,57	-70,88	775	1,00	0,12	62,7	---	(L2,S1)
X0003912	Barrage	46,10	-70,65	3070	---	---	3,5	IE	---

	Sartigan								
023429	Chaudière	46,10	-70,65	3070	1,00	0,03	66,3	---	(L3,S2)
023402	Chaudière	46,59	-71,21	5820	0,53	0,02	66,3	---	(L3,S3)
X0005410	Barrage Chapleau	46,21	-74,95	67,3	---	---	9,1	V	---
X0004957	Barrage Chute-Bell	45,77	-74,68	5460 ⁸	---	---	3,4	H	---
040204	Rouge	45,74	-74,69	5460	1,00	0,004	12,5		(L2,S3)

1. Le rapport des bassins amont est estimé en considérant le barrage le plus près de la station considérée.
2. L'IRI est calculé en considérant le volume total de stockage des barrages en amont de la station et le débit médian à cette même station.
3. Dans le cas des barrages, cela réfère au volume de stockage du barrage. Dans le cas des stations, cela réfère au volume de stockage total des barrages en amont.
4. Voir Tableau 4.1 pour la liste des usages
5. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N; L4 : [48,50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².
6. Bien que cette configuration ne comporte qu'un barrage et une station, elle est classée dans le groupe puisque plusieurs autres barrages dont les caractéristiques sont inconnues se trouvent en amont de ce premier barrage.
7. Le volume de stockage maximal n'étant pas disponible à ce barrage, la valeur présentée correspond au volume moyen de stockage.
8. Cette donnée est manquante. Un examen de la position du barrage et de la station du même nom montre que la station est située tout juste en aval du barrage. La superficie du bassin en amont du barrage a donc été fixée égale à celle de la station.

ANNEXE F - 'CONFIGURATION MIXTE STATIONS/BARRAGES' DE LA RIVIÈRE YAMASKA

Le tableau suivant présente les informations relatives à la configuration mixte stations/barrages de la rivière Yamaska alors que la Figure F.1 présente un schéma de cette configuration.

Numéro station/barrage	Nom station/barrage	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Superficie amont (km ²)	IRI ¹	Volume de retenue ² (x 10 ⁶ m ³)	Usage ³	Classe ⁴ (Latitude, Surface)
X0005737	Barrage De Waterloo	45,35	-72,52	30,5	---	4,5	V	---
X0005756	Barrage De Choinière	45,42	-72,61	131,8	---	83,5	R	---
030309	Yamaska Nord	45,42	-72,61	139	1,02	88,0	---	(L2,S1)
030340	Yamaska Nord	45,36	-72,78	248	0,59	88,0	---	(L2,S1)
X0005651	Barrage Lac-Brome	45,28	-72,51	198,4	---	55,6	R	---
030351	Yamaska	45,28	-72,51	190	0,33	55,6	---	(L2,S1)
030341	Penman	45,62	-72,95	3310	0,10	143,6	---	(L2,S2)
030345	Yamaska	45,63	-72,94	3330	0,07	143,6	---	(L2,S2)

1. L'IRI est calculé en considérant le volume total de stockage des barrages en amont de la station et le débit médian à cette même station.
2. Dans le cas des barrages, ce volume réfère au volume de stockage du barrage. Dans le cas des stations, ce volume correspond au volume de stockage total des barrages en amont de la station.
3. Voir Tableau 4.1 pour la liste des usages
4. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N; L4 : [48,50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².

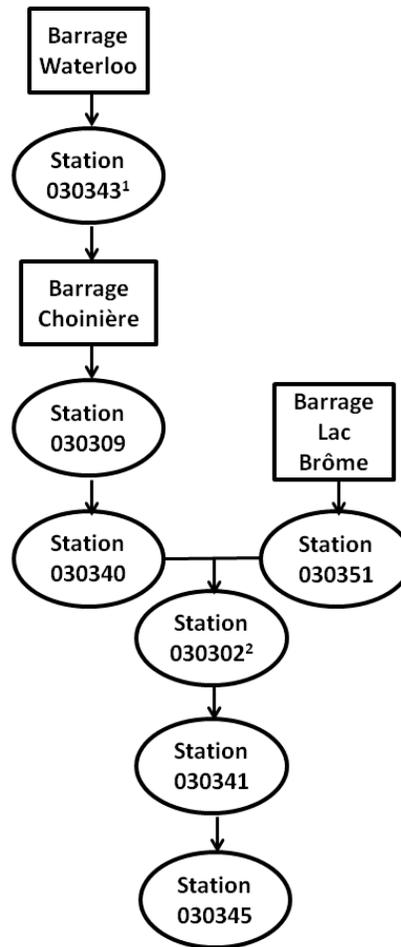


Figure F.1 Schéma de la configuration mixte stations/barrages de la rivière Yamaska. A noter que : 1) la station 030343 n'a pas été retenue dans l'étude, car sa superficie drainée est inférieure à 100 km²; 2) la station 030302 n'a pas été retenue dans l'étude car une rupture dans la série a été détectée (voir Annexe A).

ANNEXE G - 'CONFIGURATION MIXTES STATIONS/BARRAGES' DE LA RIVIÈRE DU NORD

Le tableau suivant présente les informations relatives à la configuration mixte stations/barrages de la rivière du Nord alors que la Figure G.1 présente un schéma de cette configuration.

Numéro station/barrage	Nom station/barrage	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Superficie amont (km ²)	IRI ¹	Volume de retenue ² (x 10 ⁶ m ³)	Usage ³	Classe ⁴ (Latitude, Surface)
X0005203	Barrage Du Lac Ludger	46,12	-74,28	40	---	3,0	V	---
X0005179	Barrage De La Montagne-Noire	46,18	-74,28	13,8	---	6,0	V	---
X0005201	Barrage Papineau	46,13	-74,31	17,8	---	0,9	V	---
X0005226	Barrage Brûlé	46,08	-74,28	154,8	---	6,0	RV	---
X0005241	Barrage Manitou	46,07	-74,34	23,9	---	3,7	V	---
X0005255	Barrage Cornu	46,09	-74,43	13,1	---	1,5	V	---
X0005204	Barrage Des Sables	46,05	-74,31	39,6	---	5,3	V	---
040122	Du Nord	46,05	-74,25	311	0,12	26,3	---	(L3,S1)
X0004973	Barrage Masson	46,03	-74,06	35,7	---	14,9	V	---
X0004974	Barrage Théodore	45,96	-74,25	99,6	---	5,1	V	---
040110	Du Nord	45,80	-74,01	1170	0,04 ⁵	31,4 ⁵	---	(L2,S2)

1. L'IRI est calculé en considérant le volume total de stockage des barrages en amont de la station et le débit médian à cette même station.
2. Dans le cas des barrages, ce volume réfère au volume de stockage du barrage. Dans le cas des stations, ce volume correspond au volume de stockage total des barrages en amont de la station.
3. Voir Tableau 4.1 pour la liste des usages.
4. Les classes de latitude sont définies comme suit : L1 : [43,44[°N; L2 : [44,46[°N; L3 : [46,48[°N; L4 : [48,50[°N; alors que les classes de superficie sont définies comme suit : S1 : [100, 1000[km²; S2 : [1000, 4000[km²; S3 : ≥ 4000 km².
5. Le barrage Masson a été construit en 2010. Pour éviter d'avoir une série trop courte, les données ultérieures à 2009 ont été négligées. De plus, le barrage Masson n'a pas été considéré dans le calcul de l'IRI et du volume de stockage cumulatif.

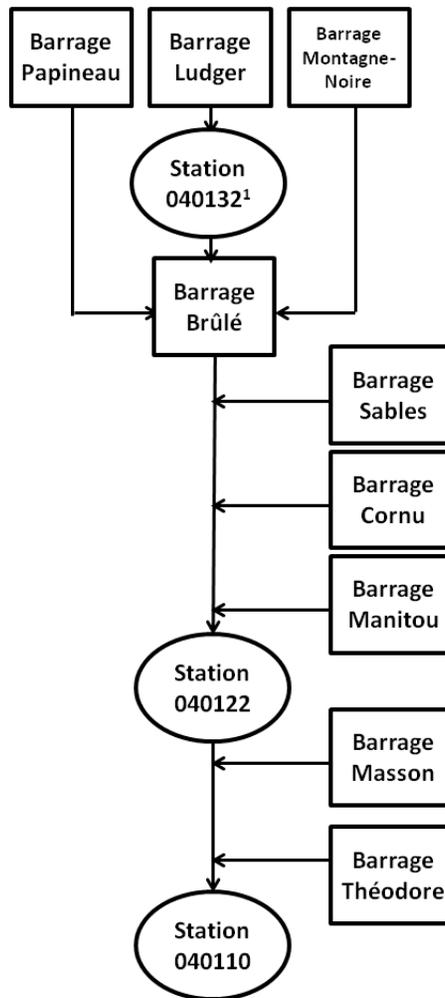


Figure G.1 Schématisation de la configuration mixte stations/barrages de la rivière du Nord. A noter que : 1) la station 040132 n'a pas été retenue dans l'étude car sa superficie drainée est inférieure à 100 km².