

Rapport Scientifique RS-100

**Les bases de la modélisation
du Tronçon Montréal /
Trois-Rivières**

Jean Morin et André Bouchard

Mars 2001

Pour fin de citation :

Morin, J. et A. Bouchard (2000). Les bases de la modélisation du tronçon Montréal / Trois-Rivières. Rapport scientifique SMC Québec – Section Hydrologie RS-100, Environnement Canada, Sainte-Foy. 57 pages.

Ministère des Approvisionnements et Services Canada 2000.

N° de catalogue En56-162/2000F
ISBN : 0-662-85363-6

Résumé

La caractérisation du comportement temporel et spatial des principales variables physiques telles les débits, les niveaux d'eau, le vent et la température est une étape essentielle pour la production de simulations hydrodynamiques représentatives qui pourront par la suite servir dans le cadre d'études sur les effets des niveaux d'eau sur les divers compartiments du vivant de l'écosystème du fleuve Saint-Laurent.

L'analyse des séries de débits reconstitués du fleuve Saint-Laurent et de ses principaux tributaires entre 1932 et 1998 indique que la régularisation des Grands Lacs a eu pour effet principal à Sorel de réduire le débit au printemps et de l'augmenter à l'automne. Dans le cas du bassin de la rivière des Outaouais, le type d'effet est similaire mais, en crue, son ampleur est près de 10 fois supérieure à celle induite par les Grands Lacs. La régularisation de la rivière des Outaouais devrait donc être considérée au même titre que celle des Grands Lacs dans toute démarche visant à introduire des critères environnementaux dans les plans de gestion du système Grands Lacs/Saint-Laurent.

Dans le cas des données de vents et de température de l'air, des conditions limites ont été identifiées aux fins du développement de modèles du vivant qui seront combinés aux modèles sur la physique permettant ainsi une meilleure intégration des connaissances et leur distribution sur le domaine d'étude.

En tout, 13 scénarios de référence ont été identifiés à partir de la distribution des débits du fleuve à Sorel. Ces scénarios correspondent à la période d'eau libre pour les saisons hydrauliques du printemps (8 scénarios) et de l'été (5 scénarios). L'hiver n'a pas été considéré en raison de la présence de glace et l'automne n'a pas été retenu en raison de l'absence de plantes aquatiques. Pour chaque scénario définissant les conditions limites, des simulations hydrodynamiques seront réalisées en tenant compte de facteurs tels la présence de plantes aquatiques et les vents.

Table des matières

RÉSUMÉ	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX	VIII
1 INTRODUCTION	1
2 OUVRAGE DE GÉNIE	3
2.1 Dragage et dépôt des matériaux dragués	3
2.2 Reversoirs	4
2.3 Autres modifications	5
3 RÉGIME HYDROLOGIQUE, LE DÉBIT	6
3.1 Généralités	6
3.2 Reconstitution des débits du fleuve	6
3.2.1 Méthodes utilisées	9
3.3 Fluctuations à long terme	10
3.4 Fluctuations saisonnières	11
3.5 Tributaires	13
3.6 Régularisation des débits	14
4 NIVEAU D'EAU	21
4.1 Généralités	21
4.2 Patron des niveaux d'eau	21
4.3 Pente de la surface libre	23
4.4 Effet de la marée	25
5 VENTS	27
5.1 Données utilisées et méthode	27
5.2 Résultats	27
6 TEMPÉRATURE DE L'AIR	33
6.1 Généralités	33
6.2 Fluctuations des températures à long terme	33
6.3 Fluctuations saisonnières des températures	33
6.3.1 Températures moyennes	33
6.3.2 Températures maximales	34
6.3.3 Degrés-jours	34

7	SCÉNARIOS DE RÉFÉRENCE	39
7.1	Distribution des débits	40
7.2	Réccurrence des débits en étiage et en crue	43
7.3	Définition des scénarios	45
7.4	Débits et niveaux du Saint-Laurent et de ses tributaires	46
7.4.1	Conditions limites en débit	46
7.4.2	Conditions limites en niveau	47
7.5	Discussion	49
8	CONCLUSIONS	53
9	REMERCIEMENTS	55
10	RÉFÉRENCES	56

Liste des Figures

Figure 1 : Géographie du secteur à l'étude.	2
Figure 2 : Localisation des stations de mesure de niveau et de débit utilisées.....	8
Figure 3 : Méthode de calcul du débit du fleuve Saint-Laurent proposée par Morse (1990).	8
Figure 4 : Moyenne hebdomadaire interannuelle, écart-type et minimum hebdomadaire des débits entre 1960 et 1998 à Sorel.	12
Figure 5 : Moyenne hebdomadaire interannuelle du débit calculé à Sorel entre 1960 et 1998. .	12
Figure 6 : Moyenne interannuelle hebdomadaire des tributaires principaux dans le tronçon Montréal/Trois-Rivières entre 1960 et 1998.	14
Figure 7 : Moyenne interannuelle quart-de-mois des débits à Cornwall, Sorel et Grenville.....	16
Figure 8 : Moyenne interannuelle quart-de-mois du débit à Sorel : tel que calculé (1960-1997), sans l'effet de la régularisation des Grands-Lacs et sans l'effet de régularisation des Grands-Lacs et de la rivière des Outaouais. -1958 et 1960-1997	20
Figure 9 : Moyenne interannuelle journalière du niveau à cinq stations entre Montréal et Trois-Rivières entre 1960-1998.	22
Figure 10 : Moyenne interannuelle journalière du niveau à cinq stations entre Montréal et Trois-Rivières entre 1932-1958.	22
Figure 11 : Pente moyenne de la surface libre entre Montréal et Trois-Rivières selon la saison entre 1960 et 1998.	24
Figure 12 : Moyenne interannuelle mensuelle de la pente de la surface libre entre diverses stations entre 1960-1998.....	24
Figure 13 : Fluctuations du niveau liées à l'effet de la marée semi-lunaire (14 jours) à diverses station à l'été 1998.	26
Figure 14 : Distribution de fréquence des intensités de vents à la station de Trois-Rivières.....	28
Figure 15 : Rose-des-vents de quatre intensités de chacune des saisons à la station de Trois-Rivières entre 1991 et 1998 en 36 divisions de compas.	29
Figure 16 : Rose-des-vents de quatre intensités de chacune des saisons à la station de Saint-Hubert entre 1991 et 1998 en 36 divisions de compas.	31
Figure 17 : Température moyenne interannuelle pour la station de Saint-Hubert de 1960 à 1997 (s = écart-type).	35
Figure 18 : Température moyenne interannuelle à la station de Sorel de 1960 à 1997 (s = écart-type).....	36
Figure 19 : Température maximale interannuelle pour la station de Saint-Hubert de 1960 à 1997 (s = écart-type).	36

Figure 20 : Température maximale interannuelle à la station de Sorel de 1960 à 1997 (s = écart-type).....	37
Figure 21 : Degré-jour moyen pour la station de Saint-Hubert de 1960 à 1997 (s = écart-type).37	
Figure 22 : Degré-jour moyen interannuel à la station de Sorel de 1960 à 1997 (s = écart-type).38	
Figure 23 : Distribution des débits du fleuve Saint-Laurent entre 1960 et 1998, en moyenne hebdomadaire par tranches de 200 m ³ /s.....	41
Figure 24 : Distribution des saisons hydrauliques à l'aide de la variation saisonnière de la moyenne interannuelle, du minimum, du maximum et de l'écart-type des débits hebdomadaires à Sorel entre 1960 et 1998.	41
Figure 25 : Distribution des débits à l'intérieur des saisons hydrauliques de l'hiver (glace : 1 janvier-15 février), du printemps (substrat seulement : 15 mars-1 juin) et de l'été (macrophytes : 7 août-15 septembre) à Sorel entre 1960 et 1998.....	42
Figure 26 : Analyse de récurrence des crues en moyennes hebdomadaires et journalières du fleuve Saint-Laurent entre 1960 et 1998.	44
Figure 27 : Analyse de récurrence des étiages en moyennes hebdomadaires et journalières du fleuve Saint-Laurent entre 1960 et 1998.	44
Figure 28 : Conditions limites en débits des entrées et de la sortie d'eau pour le tronçon Montréal/Trois-Rivières.....	48
Figure 29 : Conditions limites en niveau à Trois-Rivières et stations de niveau repères du tronçon Montréal/Trois-Rivières selon les saisons et les scénarios.	48
Figure 30 : Relations entre les débits et leur récurrence selon les séries post et pré régularisation à Sorel.	52

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Séquence des dragages dans le Saint-Laurent.	4
Tableau 2 : Méthodes de reconstitution des données de débit entre Montréal et Trois-Rivières. VM = valeur manquante, BV = bassin versant, MIAJ = moyenne interannuelle journalière.	10
Tableau 3 : Caractéristiques du bassin versant et des débits des tributaires à leur embouchure pour la période 1960-1998 en ordre amont-aval.	13
Tableau 4 : Séquence historique des réservoirs importants dans le bassin versant de la rivière des Outaouais, modifié de CTRO (1965).	18
Tableau 5 : Fluctuations moyennes approximatives du niveau, liées aux effets de marée, semi-diurne et semi-lunaire. Modifié de Morse (1990), INRS-Eau (1990) et B. Labrecque (comm. pers.).....	25
Tableau 6: Pourcentage des intensités et des directions des vents en 16 divisions de compas et 4 classes d'intensité à Trois-Rivières entre 1993 et 1999.	30
Tableau 7 : Pourcentage des intensités et des directions des vents en 16 divisions de compas et 4 classes d'intensité à Saint-Hubert entre 1993 et 1999.	30
Tableau 8 : Numérotation et caractéristique du débit à Sorel pour les scénarios retenus selon les saisons hydrauliques.	46
Tableau 9 : Variations du ratio du débit provenant de Lasalle et de MIPA (rivière des Prairies, des Milles Iles et l'Assomption dans les scénarios retenus.	49
Tableau 10 : Variations des niveaux aux stations de mesure retenues pour les scénarios définis par le débit à Sorel.	50

1 Introduction

Un des principaux objectifs du volet Biodiversité du Plan d'Action Saint-Laurent III (PASL-III) est de quantifier l'impact des fluctuations de niveau d'eau sur l'écosystème fluvial. Cet objectif ambitieux nécessite l'intégration d'informations et de connaissances sur les aspects physiques et biologiques. Ces informations et ces connaissances couplées à des modèles numériques qui simulent l'hydrodynamique, les vagues, la distribution des plantes aquatiques, l'habitat faunique, etc., vont éventuellement constituer un système d'aide à la décision. Le présent document s'inscrit dans cette démarche et vise à jeter les bases nécessaires à la modélisation du tronçon fluvial situé entre Montréal et Trois-Rivières (Figure 1).

Le tronçon à l'étude s'étale sur 150 km entre la sortie du bassin de La Prairie et Trois-Rivières et varie en largeur de 1 km à Lanoraie à près de 13 km au lac Saint-Pierre. Le signal de marée, perceptible à Trois-Rivières, s'estompe au lac Saint-Pierre et n'est présent que sous forme de faibles oscillations au port de Montréal. Le tronçon fait l'objet de plusieurs usages importants dont la pêche et la navigation commerciale. Le milieu a été modifié par le dragage de la voie navigable et par la construction des réservoirs de Sorel.

Les objectifs de ce rapport sont de 1) documenter l'hydrologie et le climat du tronçon afin de préparer la modélisation de la physique du système et 2) de produire un nombre limité d'événements de référence représentant la complexité du système. Afin d'atteindre ces objectifs, plusieurs tâches ont été entreprises. L'historique des principales modifications apportées au fleuve telles que le dragage, les ponts et les réservoirs est présentée. Une base de données hydrologiques (niveaux et débits) et météorologiques (vents et températures) a été constituée et partiellement analysée. Les débits du fleuve ont été reconstitués à Sorel et à Trois-Rivières pour la période 1932-1998. La régularisation des Grands Lacs et de l'Outaouais est analysée. Finalement, les événements de référence sont identifiés en examinant les périodes de récurrence des débits.

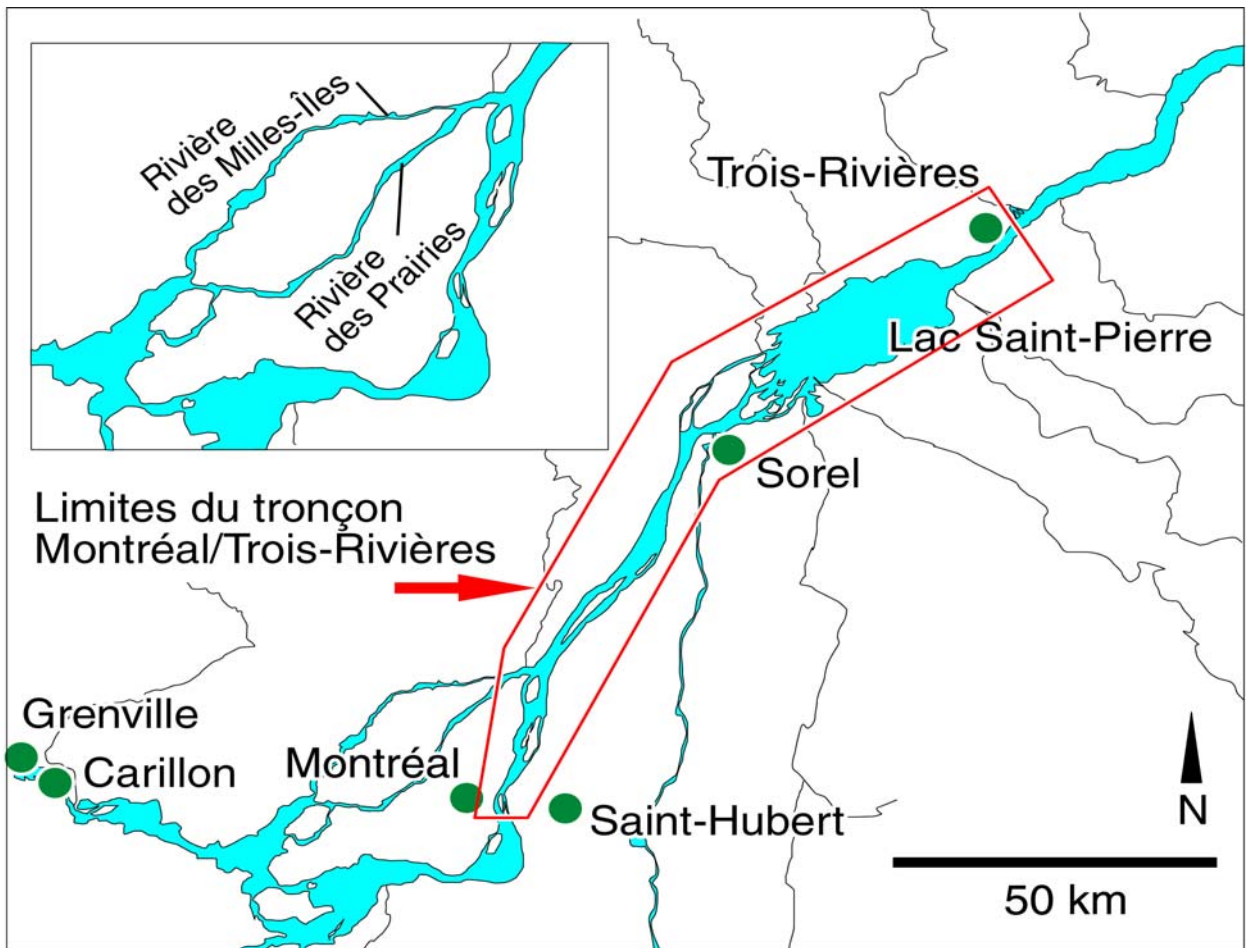


Figure 1 : Géographie du secteur à l'étude.

2 Ouvrage de génie

Le tronçon fluvial entre Montréal et Trois-Rivières a été considérablement modifié par le dragage du chenal de navigation, par la construction des revoirs dans le secteur de Sorel et dans une moindre mesure par les modifications du lit associées aux passages de pipelines, de lignes à haute-tension, de ponts et de tunnels.

Il sera essentiel de connaître la distribution spatiale et temporelle des modifications physiques sur le milieu afin de pouvoir s'assurer de la justesse des interprétations lors de l'analyse des séries temporelles tant sur la physique que sur le vivant. Par exemple, dans le cas de la modélisation de l'habitat du poisson, les changements dans la composition du substrat, dans les matières en suspension, dans les vitesses etc., liées aux activités de dragage doivent être pris en compte pour bien interpréter les résultats des modèles.

2.1 Dragage et dépôt des matériaux dragués

Les dragages ont considérablement modifié la forme du lit du Saint-Laurent sur presque tout le segment fluvial de Montréal à Trois-Rivières. Même si les changements dans la topographie du fleuve sont majeurs, il n'existe que peu d'ouvrages qui quantifient les interventions directes sur le milieu. En faire une description exhaustive représente un travail important qui reste à faire.

Plusieurs auteurs ont décrit l'évolution et l'impact de la voie maritime en termes de coût de construction, de gains et de pertes économiques régionales (Lassère, 1971 ; Corley, 1961 ; Sandwell, 1930). Ces travaux ont permis de dresser un tableau de l'évolution du dragage dans le Saint-Laurent, pour la période d'avant 1958. Les travaux de Robitaille *et al.* (1988) ont laissé une carte synthèse des zones de dragage et de dépôt pour la période entre 1945 et 1984. Cependant, ces travaux ne décrivent pas les années des interventions, ni les volumes impliqués. Finalement, Lapointe (1994) a analysé en détail l'évolution de la topographie du fond du fleuve dans le secteur de Contrecoeur.

Dans le cadre du présent rapport, seulement les informations disponibles dans les ouvrages cités ci-dessus sont intégrées dans le Tableau 1. Les premières interventions étaient limitées au lac Saint-Pierre qui a longtemps été le secteur le moins profond du fleuve, mais plus la profondeur du chenal

Tableau 1 : Séquence des dragages dans le Saint-Laurent.

Période	Profondeur	Largeur	Endroit
Pré-1844	Max 3.2 m	~	
1844-1847	4.2 m	45 m	Banc de sable et d'argile, secteur restreint du lac Saint-Pierre, tentative avortée de construire un chenal rectiligne
1850-1851	4.2 m	45 m	Dragage principalement dans le chenal naturel du lac Saint-Pierre
1854-1856	4.8 m	45 m	Lac Saint-Pierre, et autres endroits
1856-1865	6.1 m	75 m	Lac Saint-Pierre, et autres endroits
1888	7.6 m		
	8.4 m	135 m	
1888-1907	9.0 m	135 m	
1912-1930	10.7 m	168 m	Montréal à Batiscau
1952-1954		245 m droit 457 m courbe	Montréal à Québec
1954-1971			Aménagements localisés
1973-1974			Aire de mouillage de Montréal-Nord

de navigation augmentait plus les sections à draguer sont devenues importantes. Les interventions les plus massives ont été réalisées dans les années 50.

2.2 Reversoirs

Les reversoirs des Îles de Sorel ont été construits suite à une étude sur les niveaux d'eau entre Montréal et le lac Saint-Pierre (CDMF, 1915). Ce rapport suggérait la construction de cinq ouvrages afin de faire remonter le niveau d'eau jusqu'au port de Montréal afin de pallier à une baisse éventuelle du niveau d'eau pouvant nuire aux activités de navigation commerciale. Les reversoirs ont été construits entre septembre 1928 et novembre 1931 (Pasin, 1979 ; Briand, 1963). Cinq reversoirs ont donc été construits entre les 1) îles aux Barques et du Moine, 2) de Grace et Ronde 3) Ronde et Madame, 4) Saint-Ignace et Dorvilliers et 5) Dorvilliers et du Milieu.

L'effet des reversoirs a été estimé à une augmentation de 0.12 m au port de Montréal, et de 0.29 m à Sorel. L'écoulement dans le chenal principal aurait été augmenté de 25% à 85% du débit total (Briand, 1963). Dumont (1996), dans une étude sur modèle 1D (STLT) des impacts des reversoirs, a conclu à un effet beaucoup plus faible de 0.01 à 0.07 m au port de Montréal et de 0.04 à 0.18 m à Sorel selon l'hydraulicité.

La maintenance des reversoirs a toujours été un problème étant donné l'effet des forts débits et de la glace sur la stabilité des matériaux qui les composent. Les reversoirs ont été réparés à plusieurs reprises, soit en 1934, 1935, 1938, 1939, 1940 et 1941. Il semble qu'en 1941, les reversoirs sont plus stables et qu'ils ont été ramenés à la cote de conception de 1931 (Briand, 1963). En 1953 et 1962, d'autres travaux de stabilisation sont effectués sans toutefois rejoindre les cotes de conception de 1931. Suite à la succession de niveaux très bas en 1963 et 1964, les reversoirs ont été restaurés à la fin de l'été 1965 aux cotes de 1931. Ces travaux de restauration ne semblent pas avoir été suffisants pour enrayer l'érosion et quelques années plus tard, l'efficacité des reversoirs a été de nouveau remise en question (LHL, 1989). Finalement, en 1995, la Garde côtière a fait faire des travaux mineurs de stabilisation des reversoirs et Dumont (1996) a recommandé la restauration des reversoirs aux cotes de conception.

2.3 Autres modifications

De nombreuses autres interventions sont présentes dans le système. Elles sont généralement situées dans le secteur de Montréal et ont un impact relativement limité. Ce sont le creusage de tranchées dans le lit du fleuve pour le passage de pipelines, de fils électriques, et pour le pont-tunnel (Dryade, 1981). On peut également inclure dans ces modifications les interventions en rives pour des fins de stabilisation ou simplement de remplissage de milieux humides.

3 Régime hydrologique, le débit

3.1 Généralités

Le débit à l'intérieur du tronçon Montréal/Sorel se compose des masses d'eaux provenant des Grands-Lacs, de la rivière des Outaouais et de quelques autres tributaires autour de l'archipel de Montréal. À partir de Sorel vers l'aval, de nombreux tributaires sont présents dont les plus importants sont les rivières Richelieu, Yamaska et Saint-François. Dans le cadre de ce rapport, les débits du fleuve et des tributaires sont reconstitués pour toute la période de 1932 à 1998. L'analyse subséquente des débits a été effectuée à partir des données reconstituées à l'embouchure des tributaires et à deux sections du fleuve soit Sorel et Trois-Rivières.

Dans ce qui suit, les méthodes de reconstitution des séries de débits sont présentées de façon succincte. Les fluctuations à long terme et annuelles des débits du fleuve et de ses principaux tributaires sont aussi présentées. Finalement, la régularisation des débits y est analysée.

3.2 Reconstitution des débits du fleuve

Les séries de données de débits disponibles pour le fleuve Saint-Laurent sont limitées aux sections de contrôle. La station de Lasalle, près des rapides de Lachine, est celle qui se trouve le plus en aval. Il n'existe pas de séries temporelles de débits utilisables pour tout le segment en aval de Montréal jusqu'à Trois-Rivières. Leur reconstitution est donc nécessaire pour être en mesure de modéliser les aspects physiques du système. Plusieurs essais d'estimation des débits du fleuve Saint-Laurent en aval de l'archipel de Montréal ont déjà été réalisés, avec différents objectifs et moyens.

Carrier (1976) s'est intéressé à l'estimation des débits mensuels et annuels du fleuve Saint-Laurent pour quatre sites particuliers soit Trois-Rivières, Québec, Tadoussac et Baie-Comeau, mais seulement pour trois conditions d'écoulement soit une année sèche (1964), une année normale (1950) et une année humide (1972). Pour ce faire, deux méthodes ont été évaluées : 1) la première est basée sur le calcul des débits mensuels et annuels à l'embouchure de chaque rivière jaugée et 2) la deuxième fait appel à un nombre restreint de tributaires et à une extrapolation au moyen des variations de bassins versants.

Hoang (1980) a réalisé une étude hydrologique des débits journaliers du Saint-Laurent en cumulant les débits mesurés aux rivières des Mille-Îles, des Prairies et du fleuve à Lasalle. Cette sommation n'inclut pas l'apport des tributaires locaux (Assomption, etc.) et la validité se limite à la partie amont du segment Montréal-Sorel puisque les tributaires en aval ne sont pas compris.

Bourgault et Koutitonsky (1999) ont utilisé deux méthodes d'estimation du débit à Québec soit un modèle régressif et un modèle unidimensionnel calibré avec des mesures de débit pour un cycle de marée complet. Ils ont conclu à l'effet que le modèle unidimensionnel permettait de calculer le débit à Québec à l'aide de deux stations de niveau d'eau. Toutefois les mesures des deux stations sont limitées dans le temps à 1955.

Lors de la calibration du modèle hydrodynamique STLT (One-D), Morse (1990) a proposé une méthode d'estimation des débits du fleuve Saint-Laurent dont l'étendue spatiale débute, en amont, par les deux principaux intrants au fleuve soit la sortie du lac Ontario à Cornwall et la rivière des Outaouais à Carillon pour se terminer, en aval, à Québec. Cette méthode tient compte des principaux tributaires du fleuve qui sont généralement jaugés, des superficies non-jaugées de ces tributaires ainsi que des écoulements non-jaugés comme les ruisseaux ou le drainage souterrain. En tout, les tributaires du fleuve sont représentés par 12 « apports latéraux ».

La reconstitution des débits du fleuve à Sorel et à Trois-Rivières a été effectuée à l'aide d'une adaptation de la méthode de Morse (1990). Les débits sont calculés entre le port de Montréal et Trois-Rivières en cumulant les débits de Lasalle, de la rivière des Mille-Îles, de la rivière des Prairies et des tributaires (Figure 2). Les débits mesurés des tributaires sont corrigés pour les superficies non-jaugées selon les équations présentées à la Figure 3.

Afin d'être en mesure d'analyser les changements à long terme dans le système, les débits ont été reconstitués pour la période allant de 1932 à 1998. Cette période représente l'intervalle où les données de débits sont disponibles à la station de Lasalle. La reconstitution des débits sur une aussi longue période est une tâche relativement complexe puisque les données disponibles aux stations aval ne couvrent pas nécessairement toute cette période et que lorsque les séries sont disponibles, de nombreuses données sont manquantes.

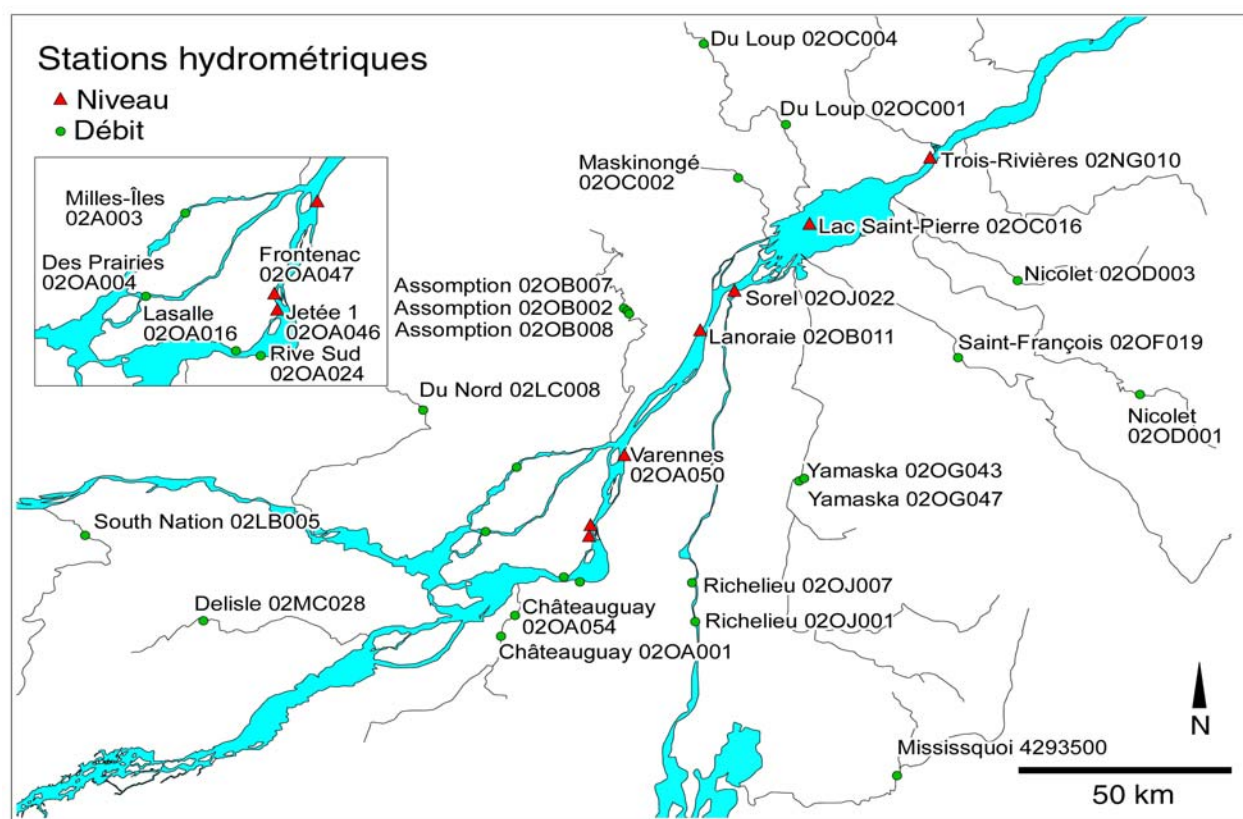


Figure 2 : Localisation des stations de mesure de niveau et de débit utilisées.

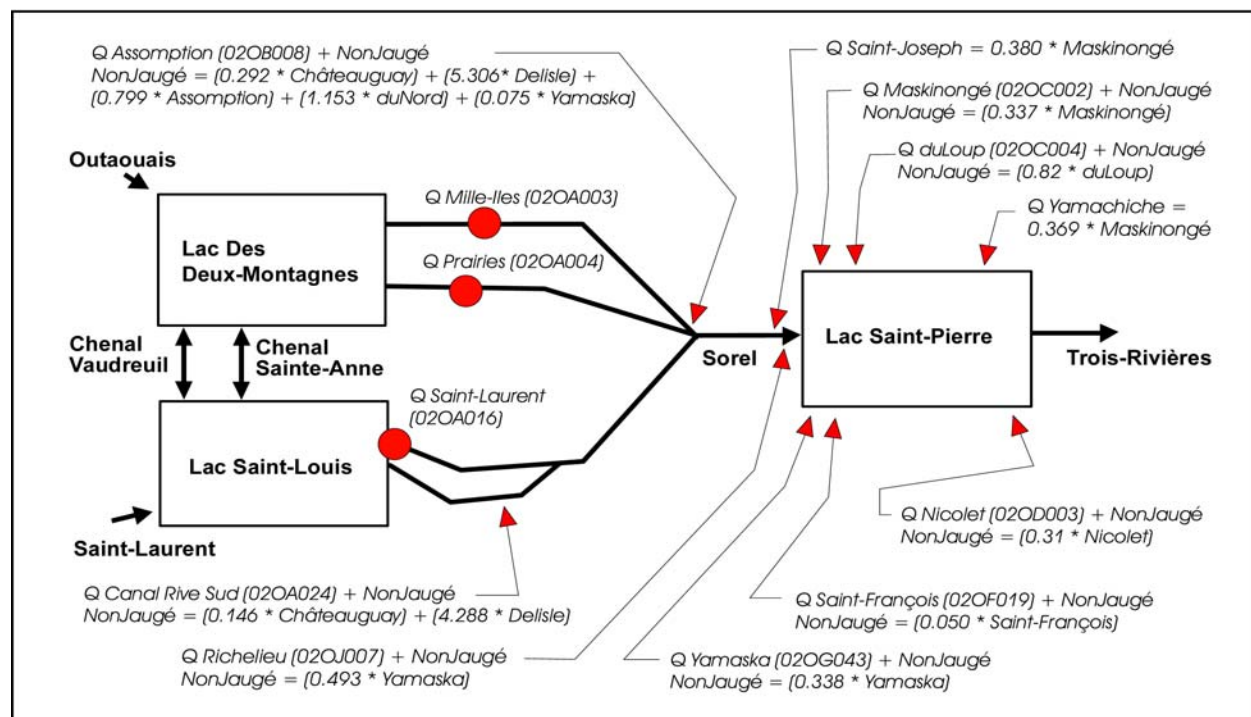


Figure 3 : Méthode de calcul du débit du fleuve Saint-Laurent proposée par Morse (1990).

3.2.1 Méthodes utilisées

Les détails méthodologiques utilisés pour la reconstitution des débits sont présentés dans Bouchard et Morin (2000). Ce rapport présente les données et les méthodes utilisées pour obtenir des séries de débit complètes entre 1932 et 1998 pour tout le segment entre Montréal et Québec. La liste des stations hydrométriques disponibles a été établie pour la portion du bassin versant du Saint-Laurent située entre Cornwall et Québec. De cette liste, seulement les stations dont la couverture temporelle était satisfaisante et qui étaient situées à proximité des stations-témoins de Morse (1990) ont été conservées pour la reconstitution.

Deux méthodes de reconstitution ont été utilisées soit 1) calcul du débit à la station-témoin au moyen du débit mesuré à une autre station sur la même rivière, corrigé par le rapport des superficies de bassins versants drainés et 2) calcul du débit à la station-témoin par une équation de régression faisant appel aux débits d'une station hydrométrique fortement corrélée ($R^2 > 0.85$) avec la station-témoin. Une analyse de corrélation comprenant l'ensemble des stations hydrométriques retenues dans la liste initiale a été faite afin de valider les stations utilisées dans la méthode 1 et pour identifier des relations pouvant servir dans la méthode 2.

Par la suite, pour chaque station-témoin sur chacun des tributaires, des séries de débit calculé ont été générées au moyen des équations de régression (méthode 2) et, lorsque possible, au moyen de la méthode 1 produisant ainsi plusieurs séries reconstituées à chaque station-témoin. Les distributions statistiques des séries reconstituées ont été comparées avec celles des stations-témoin afin d'évaluer l'adéquation des méthodes de reconstitution de manière à choisir, pour chaque tributaire, celle qui produisait les meilleurs résultats. Le cas de la station Delisle (02MC028) est particulier car l'absence de relation adéquate et de station ailleurs sur la rivière a forcé l'utilisation de la moyenne interannuelle journalière pour compléter une partie de la série. Cette méthode a également été utilisée pour combler les données du mois d'octobre 1998 sur la Yamaska. Enfin, les cas de valeurs manquantes isolées ont été réglés par interpolation à partir des données des jours précédents et subséquents.

Le Tableau 2 résume les stations utilisées, la période disponible et les actions prises pour compléter les séries. Pour fins d'analyse subséquente, les séries de débit journalier reconstituées ont été réduites en séries de moyennes hebdomadaires évitant ainsi les erreurs générées par le temps de transport dans le système vers l'aval.

Tableau 2 : Méthodes de reconstitution des données de débit entre Montréal et Trois-Rivières. VM = valeur manquante, BV = bassin versant, MIAJ = moyenne interannuelle journalière.

Numéro	Station	Période disponible	Actions
02OA004	des Prairies	1922-1998	Aucune, série complète
02OA003	Mille-Iles	1913-1998	Aucune, série complète
02OA016	Lasalle	1955-1998	1932 à 1955 - Relation Q/H avec niveaux 1932-1978
02OA024	Canal de la Rive Sud	1959-1998	82 VM - Interpolation
02OA054	Châteauguay	1970-1998	1970-1998 - 25 VM - Interpolation 1932-1970 - Rapport de BV station amont (02OA001)
02MC028	Delisle	1985-1998	1985-1998 - 1 VM - Interpolation 1932-1985 - Régression avec South Nation (02LB005) 1932-1985 - 2565 VM - MIAJ Delisle (02MC028)
02OB008	Assomption	1970-1998	1970-1998 - 2VM - Interpolation 1932-1965 - Rapport de BV station amont (02OB002) 1965-1969 - Rapport de BV station amont (02OB007)
02OG043	Yamaska	1983-1994	1983-1994 - 02OG043 ; 1994-1998 - 02OG047 1932-1983 - Régression avec Mississquoi (04293500) 1983-1998 - 449 VM - Régression Mississquoi 1998 - 29 VM (octobre) - MIAJ 02OG043
02OJ007	Richelieu	1937-1998	1937-1998 - 8 VM - Interpolation 1932-1937 - Rapport de BV station amont (02OJ001)
02OF019	Saint-François	1972-1998	1932-1971 - Régression Nicolet Sud-Ouest (02OD001) 1972-1998 - 252 VM - Régression 02OD001
02OD003	Nicolet	1966-1998	1932-1966 - Rapport de BV station amont (02OD001)
02OC004	du Loup	1965-1998	1965-1998 - 303 VM - régression Assomption (02OB008) 1932-1965 - Rapport de BV station (02OC001)
02OC002	Maskinongé	1925-1998	1932-1998 - 2994 VM régression Assomption (02OB008) 1932-1998 - 2 VM - Interpolation

3.3 Fluctuations à long terme

La moyenne des débits à long terme, entre 1932 et 1998, à Sorel est de 9 918 m³/s (1932-1958 : 9 410 m³/s, 1960-1998 : 10 270 m³/s). Les fluctuations des débits autour de cette moyenne peuvent être importantes en fonction des cycles climatiques qui influencent la quantité de précipitation ainsi que l'évaporation sur l'ensemble du bassin versant. Les fluctuations à long terme du débit en provenance des Grands Lacs sont connues (Morin et Leclerc, 1998). Ces fluctuations ont des périodes qui oscillent entre 20 à 35 ans pour des amplitudes variant de 5 000 à 10 000 m³/s. Étant donnée l'importance du débit provenant des Grands Lacs (débit moyen de 7500 m³/s) par rapport aux débits des autres tributaires tels l'Outaouais (débit moyen de 2000 m³/s), les fluctuations à long terme dans les débits à Sorel sont principalement le fait de l'écoulement provenant des Grands Lacs. L'influence des tributaires se fait principalement sentir lors de la crue printanière.

La série des débits calculés à Sorel permet d'apprécier les fluctuations dans les crues printanières en ce sens que les débits en période de crue se distinguent nettement et montrent l'impact des tributaires. Ces crues peuvent être très importantes, jusqu'à tripler la quantité d'eau provenant des Grands Lacs (Figure 4), comme en 1976 où le débit moyen hebdomadaire a atteint près de 19 350 m³/s à Sorel. La période entre 1961 et 1966 apparaît singulière puisque les débits y sont très faibles et ce, même au printemps. Un phénomène semblable peut-être observé dans les années 30 avec des débits hebdomadaires de près de 6 390 m³/s.

3.4 Fluctuations saisonnières

Les grands travaux d'aménagement de l'ensemble du système ont été complétés en 1958 de sorte que la régularisation des débits rend délicate la comparaison de la série post-1959 avec la série pré-1959. À Sorel, ces deux portions de la série montrent des changements dans la répartition des débits durant l'année, causés par la régularisation de la rivière des Outaouais et par celle des Grands-Lacs (section 3.6). Afin de soustraire la période de mise en place de la régularisation, l'analyse des fluctuations saisonnières est effectuée avec la période de 1960 à 1998.

Les fluctuations saisonnières dans les débits à Sorel sont importantes et sont principalement causées par les crues des tributaires, en particulier celle de la rivière des Outaouais. La Figure 5 présente la moyenne interannuelle hebdomadaire de la série calculée à Sorel entre 1960 et 1998. La crue apparaît en moyenne à la fin du mois d'avril avec un débit de près de 13 000 m³/s, tandis que les périodes de faibles débits sont présentes à la fin du mois d'août et en janvier à près de 9 000 m³/s. La période printanière de forts débits peut se produire très tôt, à la mi-février (1981) ou aussi tard que la fin du mois de mai (1974). La Figure 5 présente quelques courbes de moyennes hebdomadaires qui soulignent les fluctuations dans la période de crue et la période d'étiage pour quelques années typiques et d'autres plus singulières. Certaines années, comme 1966, le débit à l'automne est très élevé et se compare avec les débits du printemps. L'année 1976 est exceptionnelle par sa forte crue printanière qui apparaît très tôt. Il est à noter que l'écart-type des moyennes interannuelles est très faible en hiver, et relativement faible durant la période de croissance de la végétation, soit entre la mi-juin et la fin octobre.

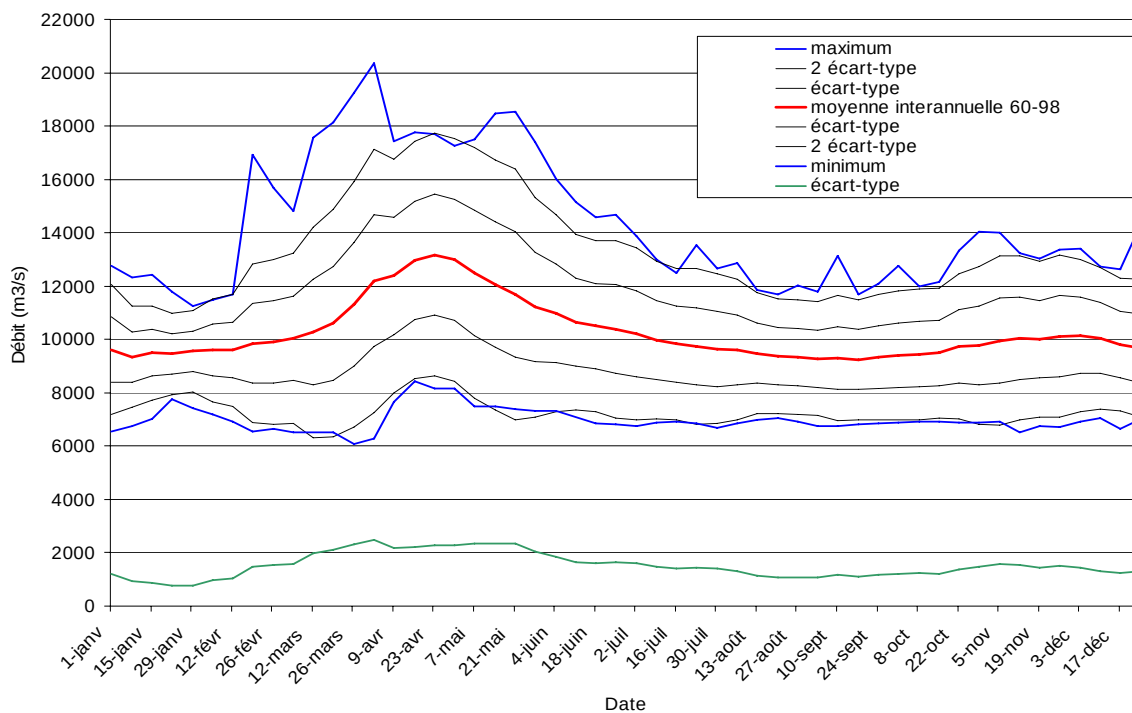


Figure 4 : Moyenne hebdomadaire interannuelle, écart-type et minimum hebdomadaire des débits entre 1960 et 1998 à Sorel.

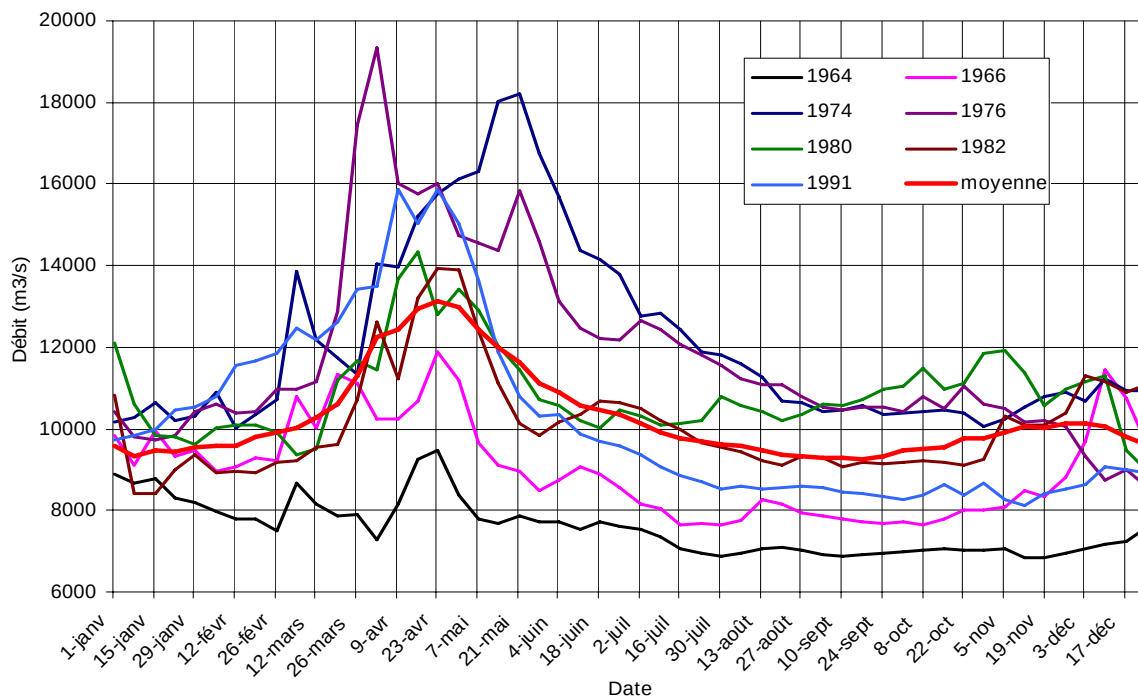


Figure 5 : Moyenne hebdomadaire interannuelle du débit calculé à Sorel entre 1960 et 1998.

3.5 Tributaires

Tel que discuté, les débits des tributaires ont été reconstitués pour la période de 1932 à 1998 (voir section 3.2). Toutefois, afin de pouvoir les comparer avec les débits du fleuve, seule la période entre 1960 et 1998 a été analysée. La rivière Assomption est le seul tributaire d'importance dans le secteur à l'amont de Sorel, tandis qu'à l'aval de Sorel, les tributaires se jetant dans le secteur du lac Saint-Pierre sont nombreux. Les plus importants soit les rivières Richelieu, Yamaska, Saint-François et Nicolet, sont situés du côté sud du lac (Figure 1). Du côté nord, les rivières Maskinongé, du Loup, et Yamachiche sont beaucoup moins importantes. Plusieurs autres petits tributaires, tels que les rivières Saint-Joseph, Chicot, Bayonne, la Chaloupe, petite Yamachiche et aux Glaises, ne sont pas considérés dans cette section. Le Tableau 3 résume quelques caractéristiques des principaux tributaires situés entre Montréal et Trois-Rivières.

Tableau 3 : Caractéristiques du bassin versant et des débits des tributaires à leur embouchure pour la période 1960-1998 en ordre amont-aval.

Tributaires	Bassin versant km ³	Débit moyen m ³ /s	Débit minimum m ³ /s	Débit maximum m ³ /s
Assomption	4234	89	9	844
Richelieu	23720	385	61	1469
Yamaska	4784	69	1	1283
Yamachiche	380	7	0.2	67
Saint-François	10228	209	3	2520
Nicolet	3398	43	0.7	998
Maskinongé	1096	26	0.7	243
Du Loup	1409	23	0.9	286

La Figure 6 montre la fluctuation de la moyenne interannuelle hebdomadaire des principaux tributaires du tronçon. De façon générale, les tributaires ont une gamme de débit relativement variée, les débits étant forts au printemps, minimums à l'été et à l'hiver et moyens à l'automne. Les tributaires du côté nord du fleuve ont un maximum de crue retardé de une à deux semaines par rapport aux tributaires du côté sud. La rivière Richelieu est différente des autres tributaires du sud par sa crue plus tardive causée par la régularisation partiellement naturelle qui résulte de la présence du lac Champlain en tête du bassin versant.

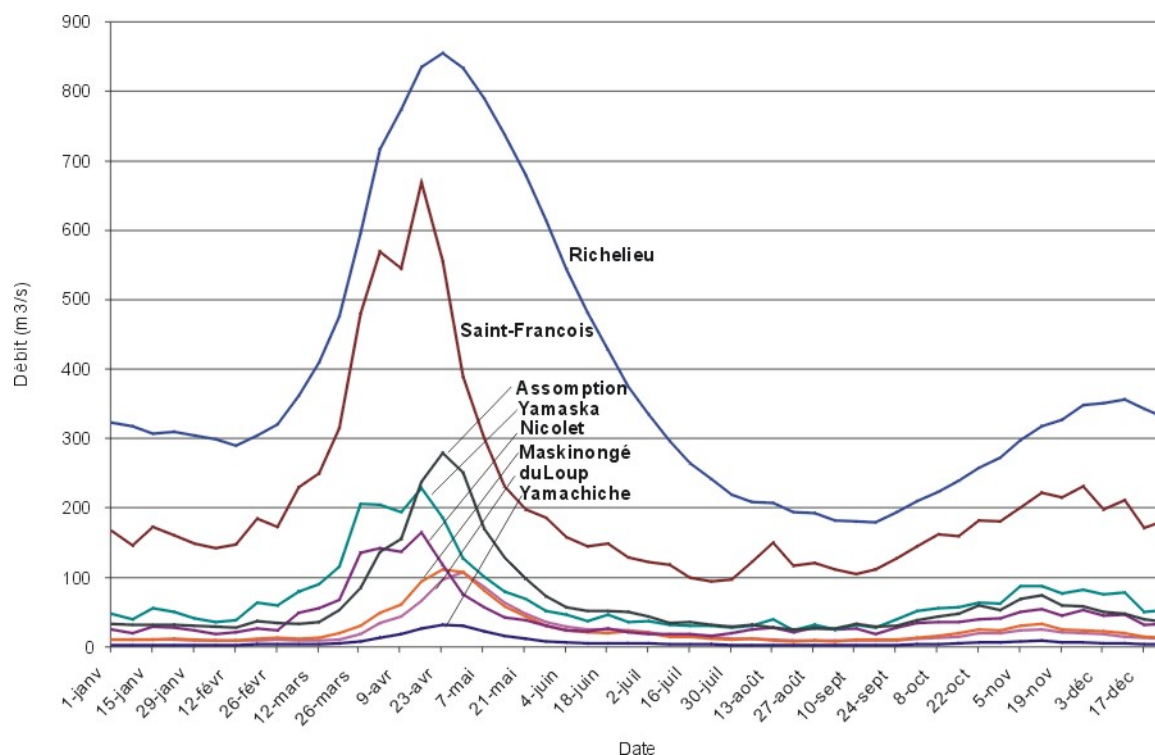


Figure 6 : Moyenne interannuelle hebdomadaire des tributaires principaux dans le tronçon Montréal/Trois-Rivières entre 1960 et 1998.

3.6 Régularisation des débits

La fin des années 1950 est une période charnière dans l'hydrologie du fleuve Saint-Laurent car les débits provenant des Grands-Lacs ont pu être régularisés grâce à la construction du barrage Moses-Saunders. Ce barrage contrôle maintenant le niveau du lac Ontario ainsi que les débits qui en sortent. La reconstruction de la série des débits à Sorel entre 1932 et 1998 a permis d'analyser l'évolution à long terme des fluctuations en apport d'eau. Afin de quantifier l'impact de la régularisation des débits saisonniers à Sorel, les débits d'avant 1959 et ceux d'après 1959 ont été comparés en Moyenne InterAnnuelle Quart-de-mois (MIAQ). La régularisation du débit du lac Ontario étant bien documentée, il est possible de déterminer son effet sur le débit à Sorel.

3.6.1.1 Impacts à Sorel de 1932-1959 à 1960-1997

Il est important de préciser que dans cette section, la période d'analyse se termine en 1997 les données pré-régularisation n'étant pas disponibles pour 1998 (D. Fay, comm. pers.). Les MIAQ du débit à Sorel montrent donc une différence importante entre les périodes de 1932-1958 et de 1960-1997 (Figure 7A). Cependant, les deux courbes sont difficilement comparables le débit moyen des

deux périodes étant différent. Une forme de standardisation est nécessaire afin de les comparer. La méthode utilisée est très simple et permet de transformer le débit moyen annuel de la série 1932-1958 à la même valeur que la série 1960-1997. La contribution de chacun des quarts-de-mois est ramenée en proportion de sa contribution sur le débit annuel, selon la formule suivante :

$$Q_{sta} = Q_{série} \cdot Q_{moy_annuelle_objectif} / Q_{moy_annuelle_série}$$

où Q_{sta} est le débit quart-de-mois standardisé, $Q_{série}$ est le débit quart-de-mois de la série brute, $Q_{moy_annuelle_objectif}$ est le débit moyen annuel visé et $Q_{moy_annuelle_série}$ est le débit moyen annuel de la série à standardiser. La Figure 7B montre la série calculée de 1960-1997 et la série standardisée de 1932-1958 au débit moyen de 1960-1997. Les différences entre les deux MIAQ sont importantes : la répartition du débit durant l'année montre un effet typique de la régularisation. Les débits du printemps sont réduits suite à une accumulation dans les réservoirs, et les volumes d'eau sont relâchés en période où les débits sont normalement plus faibles, ici entre août et décembre. La remontée du débit en période hivernale dans la série 1932-1958 est probablement causée par les effets de glace sur les seuils où les débits ont été mesurés. Les différences maximales entre les deux séries sont présentes au printemps. Le débit moyen était supérieur de 1020 m³/s au début de mai durant la période 1932-1958 et inférieur de 950 m³/s au début de décembre. Bref, une réduction de l'amplitude du cycle hydrologique annuel.

3.6.1.2 Débit sortant du lac Ontario

Le débit sortant du lac Ontario est régularisé depuis 1960. Le débit MIAQ de la série mesurée 1960-1997 est présenté à la Figure 7C. Le débit « naturel » provenant des Grands-Lacs pour la période de 1960-1997 a pu être reconstruit à l'aide de la relation niveau-débit présente au rapide du Galop avant la construction du barrage Moses-Saunders (D. Fay, comm. pers.). La validité de cette relation peut être examinée en utilisant la série mesurée à Iroquois, puisque le débit à Iroquois est similaire au débit à Cornwall étant donné l'absence de tributaires entre les deux stations. La Figure 7D montre la MIAQ de la série mesurée à Iroquois entre 1919 et 1958. Afin de pouvoir comparer cette MIAQ, qui représente le débit non-régularisé du fleuve avec la MIAQ non-régularisée reconstruite pour la période 1960-1997, la MIAQ d'Iroquois a été standardisée au débit moyen

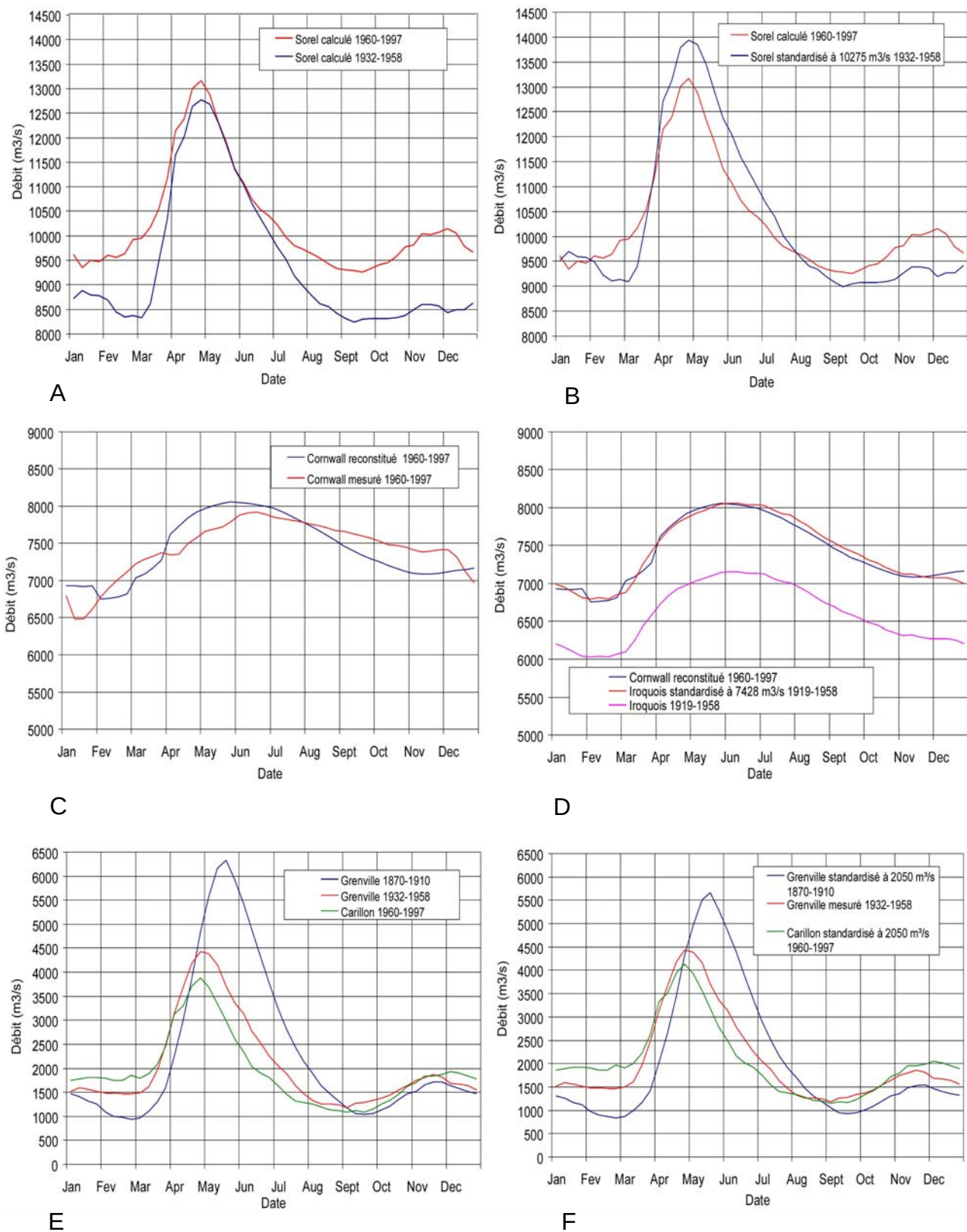


Figure 7 : Moyenne internannuelle quart-de-mois des débits à Cornwall, Sorel et Grenville.

(7428 m³/s :1960-1997). La Figure 7D montre la similitude entre la série reconstituée (non-régularisée) et la série standardisée provenant d'Iroquois validant ainsi la méthode de standardisation des débits.

Le débit reconstitué (Figure 7C) à Cornwall montre des différences notables dans la distribution des apports en eau durant l'année : le débit régularisé est plus faible au printemps et plus fort à l'automne. Les périodes de retenue et de relâchement des débits sont les mêmes que celles observées sur les séries calculées à Sorel. Cependant, les débits retenus sont maximums à 380 m³/s en avril et les débits relâchés sont maximums en octobre à près de 300 m³/s, soit environ 700 m³/s de moins que l'impact de près de 1 000 m³/s observé à Sorel (Figure 7B).

3.6.1.3 Bassin de la rivière des Outaouais

La station de Grenville a été opérée entre 1870 et 1997 par le gouvernement fédéral. Les mesures journalières du niveau sont disponibles pour presque toute la période. La station était située à l'extrémité amont du canal de Grenville. Une relation niveau-débit était présente et la section de contrôle n'aurait pas été modifiée jusqu'à la construction du barrage de Carillon entre 1958 et 1960. Les jaugeages sont disponibles (WRB, 1961) et ont permis de produire une relation niveau-débit valide pour la période 1870 à 1958, dont la forme est la suivante :

$$Q = \mu L(h - h_0) \cdot (2g(h - h_0))^k = 0.561 \cdot 154.9(h - 37.884) \cdot (2g(h - 37.884))^{0.650}$$

où Q est le débit passant au seuil, L est la largeur de la section équivalente, h_0 est la base de la section équivalente et h le niveau d'eau mesuré.

La série de Grenville n'a pas été intégrée en entier dans la base de données HYDAT pour des raisons inconnues mais celle-ci a été retrouvée dans les bases de données du Ministère de l'Environnement du Québec. Cette série apparaît extrêmement intéressante puisqu'elle décrit le débit total de la rivière des Outaouais depuis la période qui précède la régularisation.

Le bassin de la rivière des Outaouais a été transformé par l'activité humaine. Le défrichement et la construction des barrages de régularisation, de drave et de production d'énergie ont modifié les débits. Le nombre de barrages, toutes tailles confondues serait de plus de 1400 (CTRO, 1965). Les premiers barrages importants ont été créés dès 1911 (Tableau 4). La capacité de rétention totale de tous les réservoirs est de 14.2 km³. La plupart de ces réservoirs se trouvent en tête de

bassin et ont un contrôle limité sur la gestion quotidienne des débits qui entrent dans le fleuve autour de l'archipel de Montréal. La gestion des réservoirs vise à maximiser l'accumulation de l'eau de fonte durant le printemps et de l'utiliser pour produire de l'énergie durant le reste de l'année.

Tableau 4 : Séquence historique des réservoirs importants dans le bassin versant de la rivière des Outaouais, modifié de CTRO (1965).

Réservoir	Capacité de rétention (km ³)	Année de Construction
Quinze-Simard ; Témiscamingue ; Kipawa	3.12 (1.31 ;1.21 ;0.60)	1911-1914
Baskatong ; Cabonga	4.28 (2.65 ;1.63)	1927-1929
Rapide des Cèdres	0.63	1930
Mitchinamécus	0.56	1942
Dozois	1.87	1948
Kiamika	0.38	1954
Autres	3.36	1911-1960
Total	14.2	

Les moyennes interannuelles quart-de-mois (MIAQ) des séries de 1870-1910 et de 1932-1958 permettent de comparer les conditions de débit interannuel avant la régularisation. Les séries de débit qui suivent la construction de la centrale de Carillon doivent être utilisées avec précaution puisque ces données ont une erreur d'estimation de près de 10% (comm. pers. J.-F. Cantin). La Figure 7E montre les MIAQ des deux parties de la série de Grenville et la Figure 7F montre les mêmes séries mais standardisées au débit moyen de 1932-1958. La MIAQ de 1870-1910 a une crue printanière qui apparaît deux semaines plus tard et des débits d'automne et d'hiver moins importants que dans la période 1932-1958 durant laquelle la régularisation a été finalisée. Entre les périodes de 1870-1910 et 1932-1958, les débits retenus dans les réservoirs sont d'environ 3 200 m³/s en avril et les débits relâchés sont maximums en mars et en décembre à près de 1 500 et 1 200 m³/s, respectivement. En utilisant la même méthode avec les données récoltées entre 1960 et 1997 à Carillon, on obtient un patron de régularisation similaire bien que plus intense.

3.6.1.4 Débit régularisé et « naturel » à Sorel

L'impact de la régularisation des débits des Grands-Lacs sur la MIAQ du débit à Sorel peut être calculé sur les quarts-de-mois des MIAQ de la façon suivante :

$$Q_{\text{Sorel - GL}} = Q_{\text{Sorel 1960-1997}} - Q_{\text{Cornwall mesuré 1960-1997}} + Q_{\text{Cornwall simulé 1960-1997}}$$

où $Q_{Sorel - GL}$ est la MIAQ des débits à Sorel pour la période de 1960-1997 sans la régularisation des Grands-Lacs, $Q_{Sorel\ 1960-1997}$ est la MIAQ des débits calculés à Sorel, $Q_{Cornwall\ mesuré\ 1960-1997}$ est la MIAQ des débits mesurés à Cornwall et $Q_{Cornwall\ simulé\ 1960-1997}$ est la MIAQ des débits simulés (pré-régularisation) pour Cornwall. La Figure 8 montre la MIAQ des débits à Sorel sans la régularisation des Grands-Lacs.

L'impact de la régularisation de la rivière des Outaouais peut être estimé d'une façon similaire. Cependant, puisque la série 1960-1997 de la rivière Outaouais n'est pas disponible, la portion 1932-1958 est utilisée selon la relation suivante :

$$Q_{Sorel - GL - Outaouais1932-1958} = Q_{Sorel\ 1932-1958} - Q_{Grenville\ 1932-1958} + Q_{Grenville\ 1870-1910\ standardisé}$$

Où $Q_{Sorel - GL - Outaouais1932-1958}$ est la MIAQ du débit non-régularisé à Sorel, $Q_{Sorel\ 1932-1958}$ est la MIAQ des débits à Sorel pour la période 1932-1958, $Q_{Grenville\ 1932-1958}$ est la MIAQ des débits à Grenville pour la période 1932-1958 et $Q_{Grenville\ 1870-1910\ standardisé}$ est la MIAQ des débits mesurés à Grenville (1870-1910) standardisé au débit de 1932-1958. Afin d'obtenir la MIAQ des débits non-régularisés à Sorel, la MIAQ ($Q_{Sorel - GL - Outaouais1932-1958}$) doit être standardisée au débit moyen de 1958-1997 (Figure 8). D'une manière similaire, on peut utiliser la série de Carillon mesurée entre 1960-1997, en soustrayant la série MIAQ standardisée à la MIAQ de Sorel pour la même période. Cette méthode donne des résultats similaires bien qu'indiquant une régularisation légèrement moins intense.

La régularisation des débits en amont a modifié la distribution des débits durant l'année. À Sorel, les débits MIAQ sont réduits d'un maximum de près de 2 500 m³/s au printemps et augmentés entre septembre et mai de 600 à 1 000 m³/s (Figure 8). La crue est donc réduite en terme de débit, la période du maximum est devancée d'environ 3 semaines et la durée est également réduite. Les impacts de la durée des inondations sur la diminution des niveaux au printemps et l'augmentation et la stabilisation des débits en été doivent être considérés.

La validation des calculs liés à la régularisation peut se faire par l'estimation des volumes d'eau retenus selon la courbe du débit non-régularisé en estimant les volumes d'eau retenus dans les réservoirs selon l'aire sous la courbe des débits retenus tels qu'estimés dans la MIAQ des débits

non-régularisés à Sorel. L'intégration des débits indique une rétention de 14.5 km^3 dans les réservoirs du bassin de la rivière des Outaouais calculé selon la série de Grenville et de 10.2 km^3 selon la série de Carillon, ce qui est relativement près des volumes totaux de capacité de retenue de 14.2 km^3 . Il apparaît ainsi que la série de Grenville tend à surestimer tandis que celle de Carillon tend à sous-estimer l'impact de la régularisation du débit de la rivière des Outaouais.

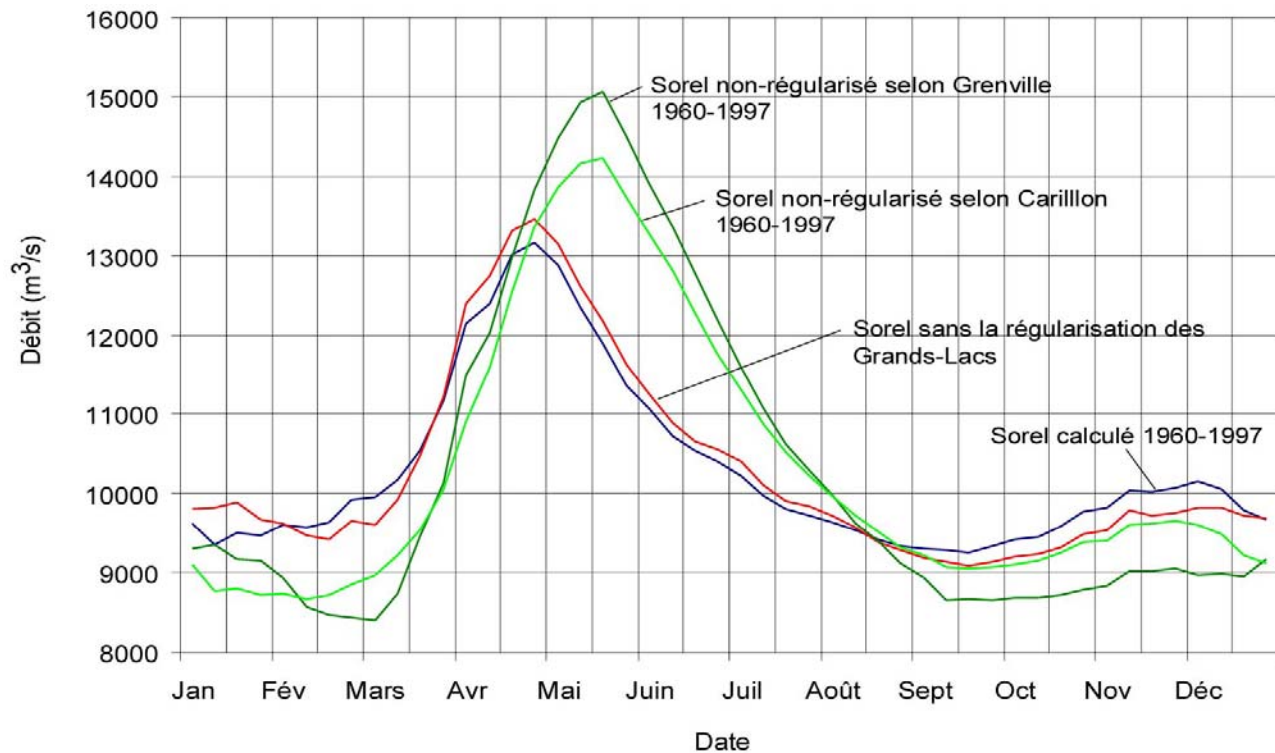


Figure 8 : Moyenne interannuelle quart-de-mois du débit à Sorel : tel que calculé (1960-1997), sans l'effet de la régularisation des Grands-Lacs et sans l'effet de régularisation des Grands-Lacs et de la rivière des Outaouais. -1958 et 1960-1997

4 Niveau d'eau

4.1 Généralités

Les niveaux d'eau dans le tronçon Montréal/Trois-Rivières fluctuent en fonction de plusieurs facteurs dont le frottement causé par les plantes en été et la glace en hiver, le débit des tributaires à l'aval et par le niveau d'eau à Lauzon près de Québec. On présente ici un bref aperçu de la complexité des fluctuations des niveaux d'eau dans le tronçon. On ne présente que des données moyennes interannuelles de niveau et de pente de la surface libre, principalement pour la période de 1960 à 1998. L'effet de la marée est également présenté. Le lien entre le débit et les niveaux n'est pas décrit, cet aspect étant partiellement couvert au Chapitre 7 : *Scénarios de référence*, qui décrit en détail les niveaux moyens liés à des valeurs de débit selon les conditions typiques du système.

4.2 Patron des niveaux d'eau

La moyenne interannuelle journalière (MIAJ) du niveau entre 1960 et 1998, à diverses stations du secteur Montréal/Trois-Rivières, montre une fluctuation annuelle moyenne de 2.0 m à Trois-Rivières et de 1.5 m au port de Montréal (Figure 9). Le niveau est plus élevé au printemps durant la crue des tributaires et est au plus bas en été durant l'étiage. Les débits correspondant à cette MIAJ de niveau sont présentés à la Figure 7A. La même image a été préparée pour la période de 1932 à 1958 (Figure 10), mais les deux périodes peuvent difficilement être comparées puisque les débits moyens sont différents (1932-1958 : 9 410 m³/s, 1960-1998 : 10 270 m³/s). Malgré la différence dans le débit moyen, on peut noter que l'influence de la glace sur les niveaux en hiver était nettement plus grande qu'elle ne l'est depuis l'ouverture du chenal à la navigation hivernale à l'hiver 1959-1960.

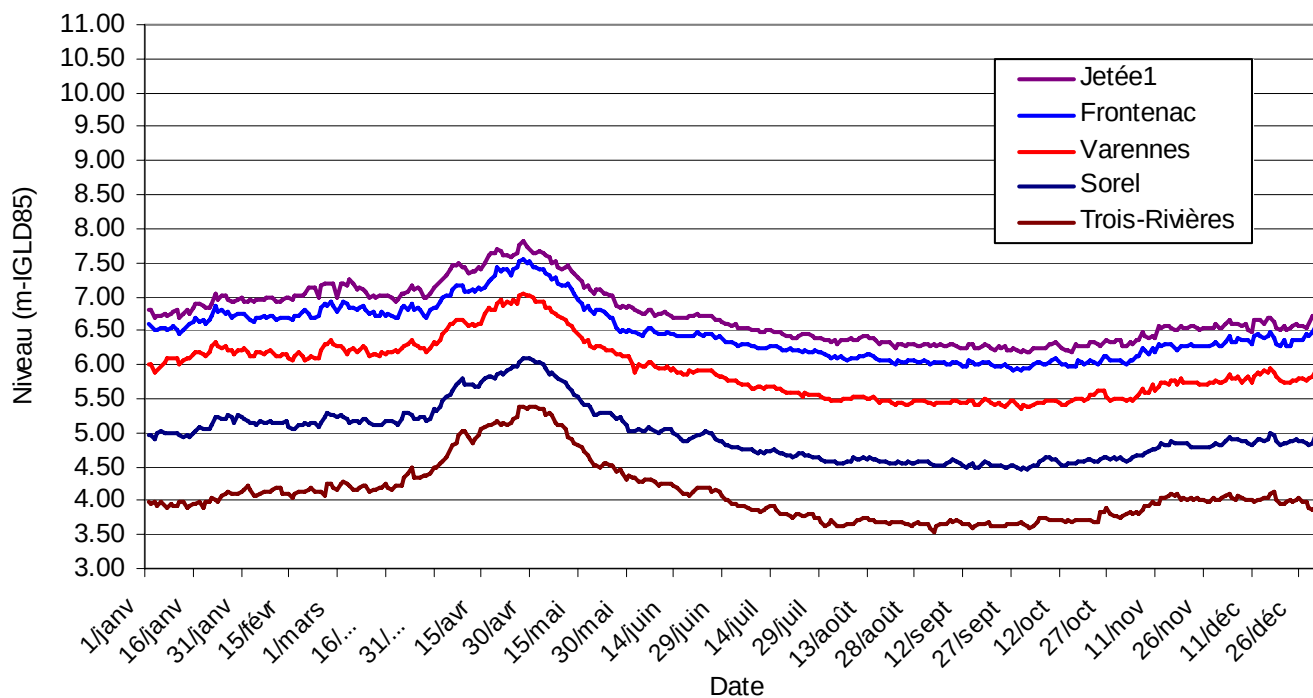


Figure 9 : Moyenne interannuelle journalière du niveau à cinq stations entre Montréal et Trois-Rivières entre 1960-1998.

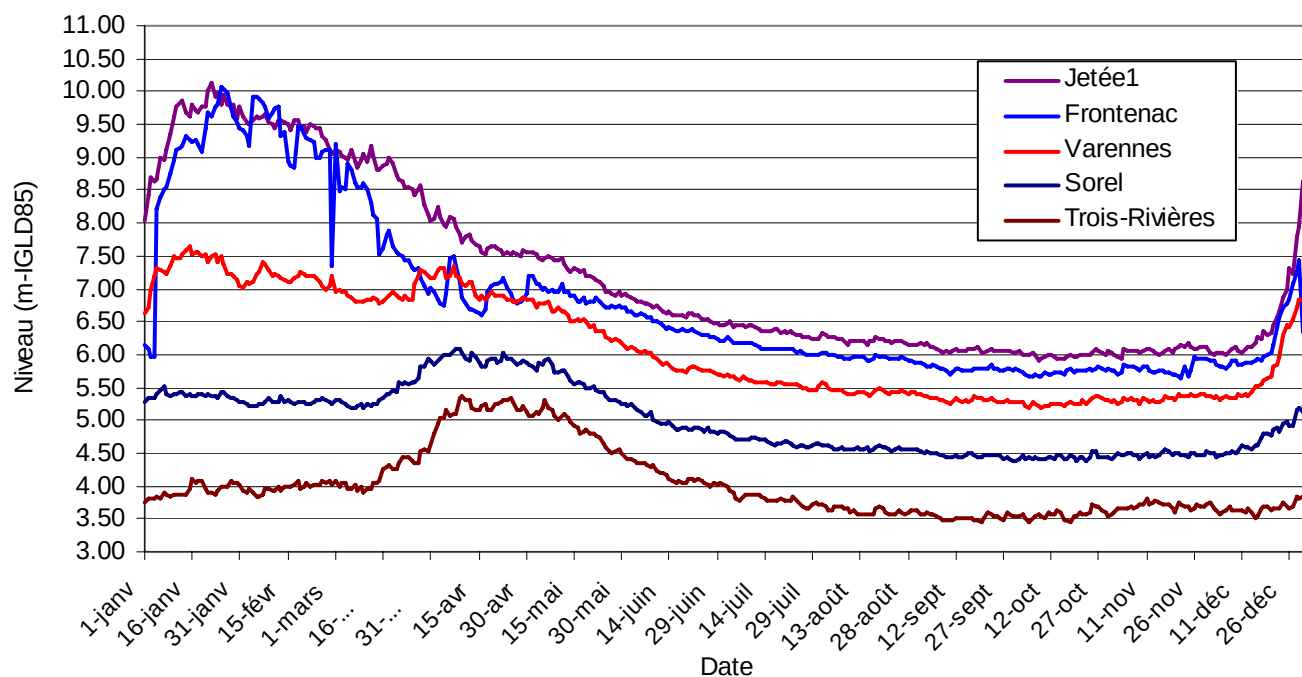


Figure 10 : Moyenne interannuelle journalière du niveau à cinq stations entre Montréal et Trois-Rivières entre 1932-1958.

4.3 Pente de la surface libre

La pente de la surface libre est obtenue en divisant la différence de niveau entre deux stations par la distance qui les sépare. La Figure 11 montre les niveaux d'eau moyens de chaque saison en fonction de la distance qui sépare les stations de mesure. Cette Figure permet d'apprécier la pente relative entre les différentes stations du tronçon. Cette pente est forte à l'amont entre Jetée #1/Varennnes et Port Saint-François/Trois-Rivières, moyenne entre Varennnes et Sorel et faible entre Sorel et Port Saint-François. Cette pente relative varie durant l'année comme le suggère la courbe des différentes saisons.

La Figure 12 montre la variation de moyenne mensuelle interannuelle de la pente pour trois segments du tronçon. On peut ainsi apprécier l'effet de la glace en hiver et des plantes en été pour chacun des segments. Dans le segment Jetée #1/Varennnes, même s'il est difficile de discuter de la pente sans examiner l'influence du débit, on peut noter que l'influence de la glace est relativement importante et qu'elle est du même ordre de grandeur que l'influence des plantes aquatiques en été. Dans ce tronçon, les superficies occupées par les plantes aquatiques sont importantes, principalement autour des îles de Boucherville. Le tronçon Sorel/Trois-Rivières montre une influence significative des plantes et de la glace liée à la grande superficie disponible aux plantes et à la glace de surface au lac Saint-Pierre. Le segment Varennnes/Sorel montre une influence de la glace mais l'effet des plantes n'est pas perceptible, celles-ci étant peu abondantes dans ce segment.

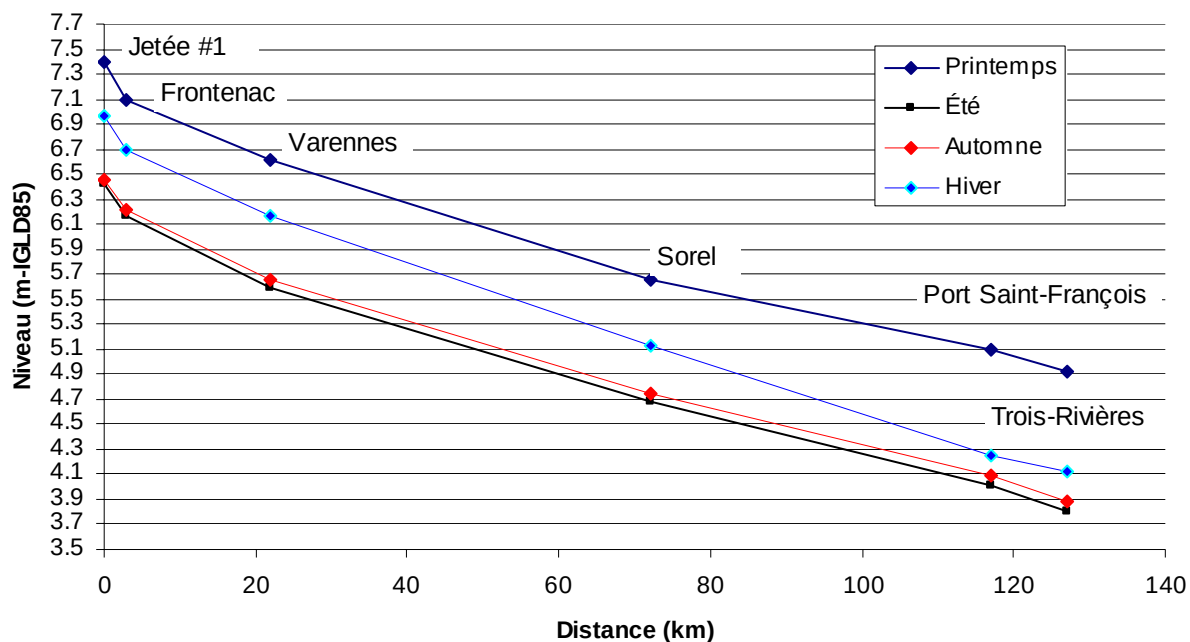


Figure 11 : Pente moyenne de la surface libre entre Montréal et Trois-Rivières selon la saison entre 1960 et 1998.



Figure 12 : Moyenne interannuelle mensuelle de la pente de la surface libre entre diverses stations entre 1960-1998.

4.4 Effet de la marée

L'effet de la marée est perceptible dans le Saint-Laurent fluvial jusqu'à Montréal. Les fluctuations du niveau liées aux effets de marée ayant déjà été traitées en détail par INRS-Eau (1990), Morse (1990) et Forrester (1983), seulement un bref aperçu des effets est présenté. On retrouve deux types de signaux de marée dans le secteur à l'étude. Une marée semi-diurne et un effet de plus longue période lié au cycle lunaire.

La marée semi-diurne a une période de 12 h 25 min et son effet sur le niveau d'eau est surtout important en aval de Trois-Rivières. En amont de Trois-Rivières, ce signal est faible et devient presque imperceptible à l'amont de Sorel. Le Tableau 5 présente le niveau d'eau correspondant à l'effet de la marée semi-diurne en amont de Trois-Rivières. Ces données sont approximatives et correspondent à un débit moyen du fleuve. Pour les périodes de débits extrêmement faibles, le signal de marée devrait être plus important.

Le signal semi-lunaire a une période de 14 jours et son effet est maximal en période de pleine lune et dans une moindre mesure en période de nouvelle lune. Afin de faire ressortir l'effet de la marée semi-lunaire, une moyenne mobile de 14 jours est appliquée sur la série de mesures journalières de l'été 1998 et la moyenne obtenue est soustraite des mesures dégageant ainsi l'effet de la marée semi-lunaire. La Figure 13 montre la composante fluctuante de la marée semi-lunaire à différentes stations de mesure du niveau du fleuve. Le Tableau 5 présente l'impact de la marée. Étant données les faibles amplitudes du signal semi-diurne en amont de Trois-Rivières et de la très grande période du signal semi-lunaire, l'impact sur les vitesses dans le lac Saint-Pierre est relativement faible. L'effet des marées sera donc négligé dans le reste du document.

Tableau 5 : Fluctuations moyennes approximatives du niveau, liées aux effets de marée, semi-diurne et semi-lunaire. Modifié de Morse (1990), INRS-Eau (1990) et B. Labrecque (comm. pers.).

Station de niveau	Fluctuations approximatives	
	Semi-diurne	semi-lunaire
Jetée #1	< 1 cm	15 à 20 cm
Contrecoeur	2 cm	18 à 25 cm
Sorel	5 cm	25 à 35 cm
Port Saint-François	10 cm	35 à 45 cm
Trois-Rivières	15 cm	40 à 50 cm

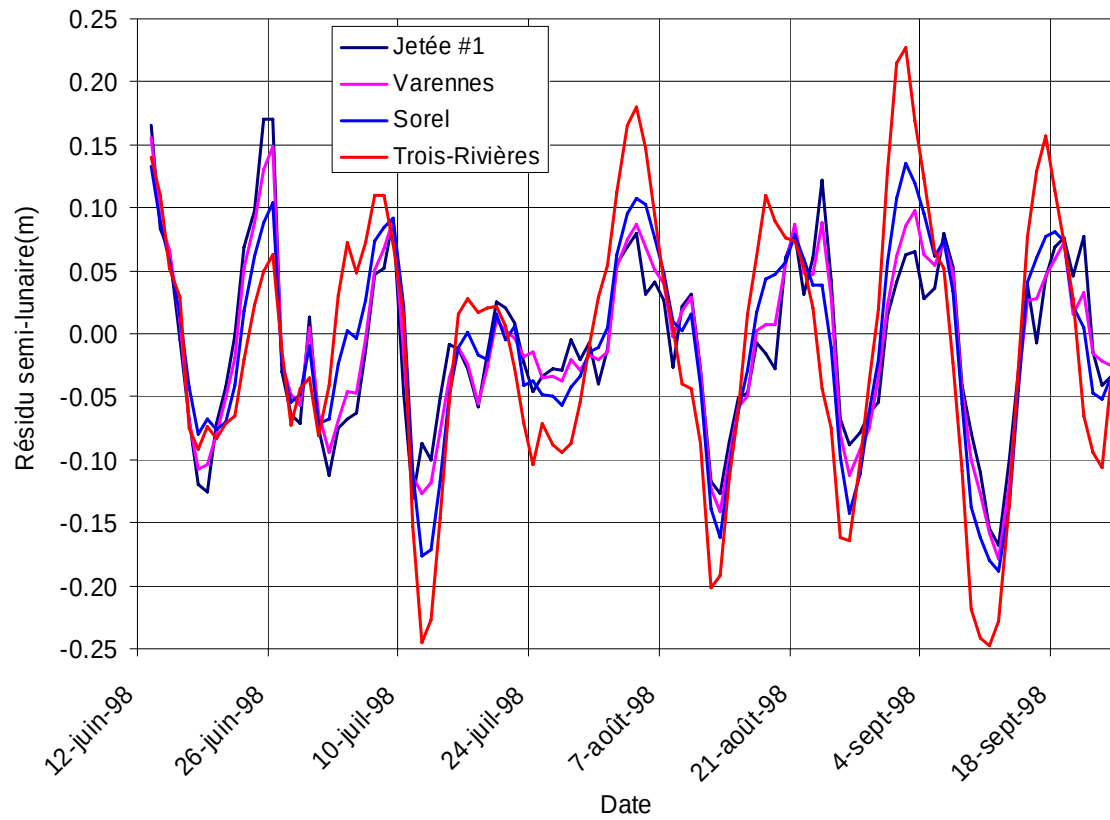


Figure 13 : Fluctuations du niveau liées à l'effet de la marée semi-lunaire (14 jours) à diverses station à l'été 1998.

5 Vents

Dans ce qui suit, les abréviations suivantes sont utilisées soit N-Nord, S-Sud, E-Est et W-Ouest. Les vents jouent un rôle très important dans la dynamique du tronçon, surtout au lac Saint-Pierre puisque le fetch peut y atteindre près de 30 km lorsque le vent souffle dans l'axe SSW-NNE. Dans le tronçon Montréal/Sorel, certains secteurs sont également très influencés par les vagues. Les données de vents sont essentielles à la modélisation des vagues. De plus, les vents peuvent être utilisés dans la modélisation de l'hydrodynamique puisque la sollicitation du vent peut mettre en mouvement les masses d'eau ou influencer la direction des courants.

5.1 Données utilisées et méthode

Les données de vents utilisées proviennent d'Environnement Canada. Pour le secteur du lac Saint-Pierre, deux stations ont été retenues : les stations de Nicolet (7025442) et de Trois-Rivières (701HE63). Ces stations contiennent des données de direction et d'intensité, en moyenne horaire, pour des périodes qui s'étendent respectivement de 1992 à 1999 et de 1991 à 1999. Les données de vents sont disponibles en 36 divisions de compas (10 degrés). Puisque les deux stations ont des intensités et des directions très semblables, seulement les données provenant de la station de Trois-Rivières sont présentées. Le tronçon Montréal/Sorel a été caractérisé à l'aide des données provenant de la station de Saint-Hubert (7027320). La série analysée s'étend de 1993 à 1999 et contient également des données horaires en 36 divisions de compas.

5.2 Résultats

Les intensités mesurées durant la période de 1993-1999 atteignent une valeur maximale de 60 km/h. La Figure 14 montre la distribution de fréquence des intensités de vent pour la station de Trois-Rivières. La station de Saint-Hubert présente une distribution similaire. Afin de simplifier l'analyse, les intensités de vent ont été subdivisées en quatre classes : faible (0-9 km/h), moyen (10-24 km/h), fort (25-44 km/h) et extrême (45-60 km/h). Les classes correspondent grossièrement à des changements dans la distribution des intensités et occupent respectivement environ 40 %, 50 %, ~9 % et ~1 % des fréquences de la distribution.

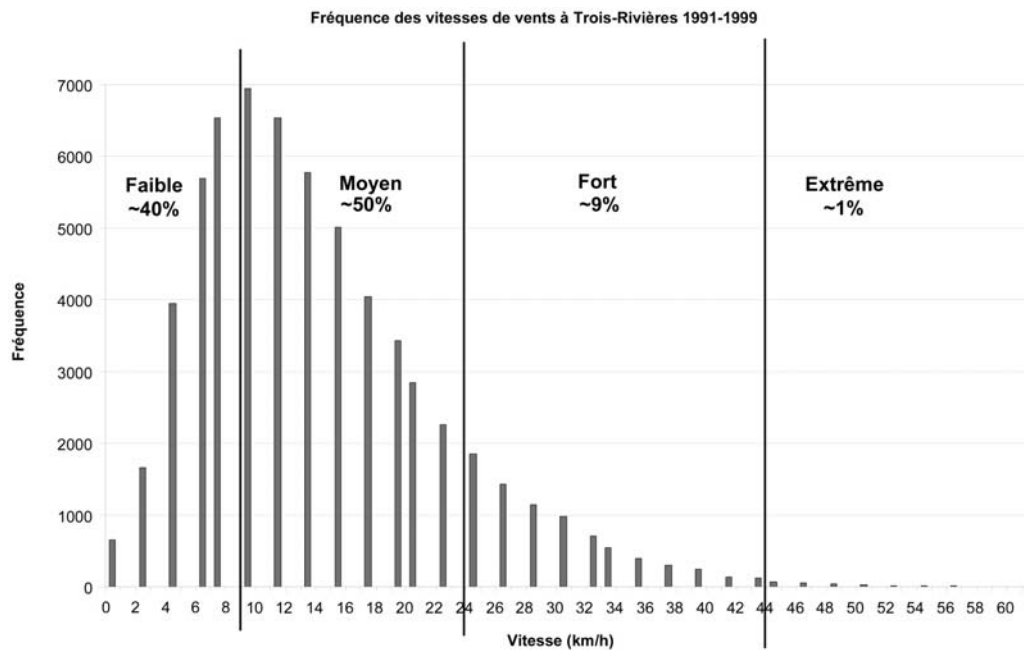


Figure 14 : Distribution de fréquence des intensités de vents à la station de Trois-Rivières.

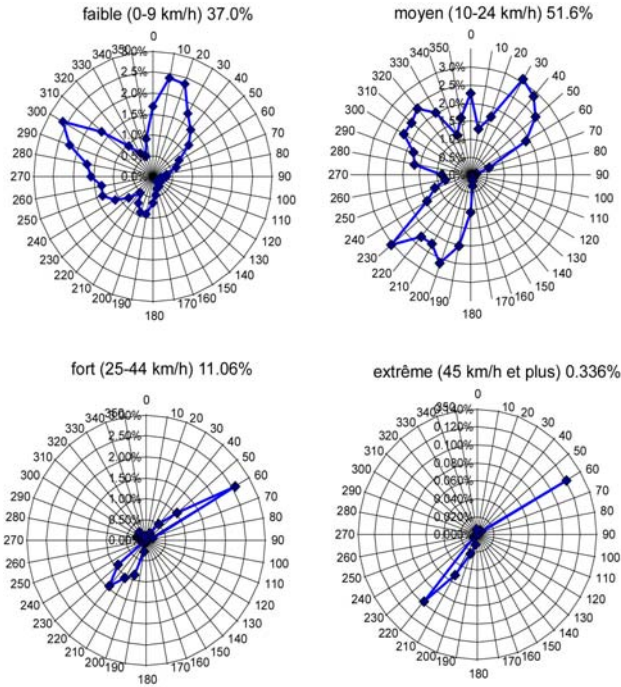
5.2.1.1 Lac Saint-Pierre (Trois-Rivières)

Dans le secteur du lac Saint-Pierre, les vents dominants sont du SSW, NE et du NW. De façon générale, les vents faibles viennent de plusieurs directions, les vents moyens proviennent principalement du SSW, NW et du NE tandis que les vents forts et extrêmes soufflent surtout du SSW. La saison influence considérablement le régime éolien. La Figure 15 montre la répartition des vents selon la saison pour les quatre classes d'intensités. L'hiver, l'automne et, dans une moindre mesure, le printemps sont les saisons avec les vents forts et extrêmes les plus abondants : de 11.2 % à 9.2 % des vents sont forts, et de 0.34 % à 0.12 % sont extrêmes (Tableau 5). Durant l'été, les vents forts représentent 7.7% des observations tandis que les vents extrêmes sont très rares, avec seulement 0.04 % des observations. L'été apparaît particulier puisque les vents SSW sont dominants dans les intensités allant de moyennes à extrêmes.

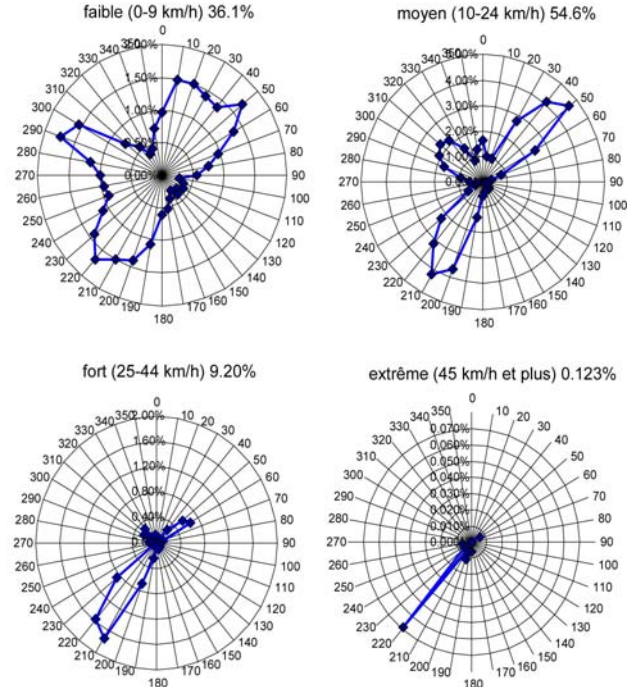
5.2.1.2 Montréal-Sorel (Saint-Hubert)

Les vents mesurés à Saint-Hubert ont des caractéristiques générales très similaires à ceux mesurés à Trois-Rivières, tant au niveau des directions que des intensités. Cependant, des différences notables sont présentes en ce qui a trait aux directions, principalement pour les vents faibles à moyens (Figure 16 et Tableau 7). À Saint-Hubert, les vents faibles ont des directions dominantes

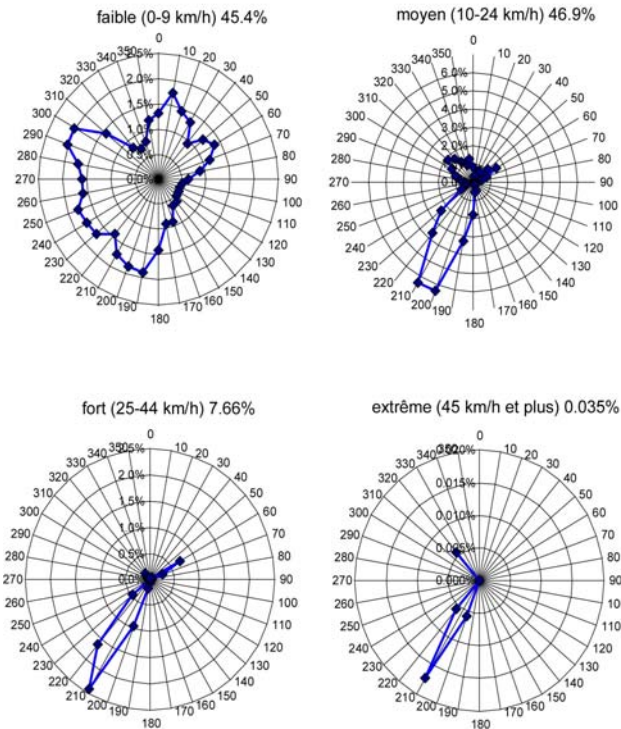
Hiver



Printemps



Été



Automne

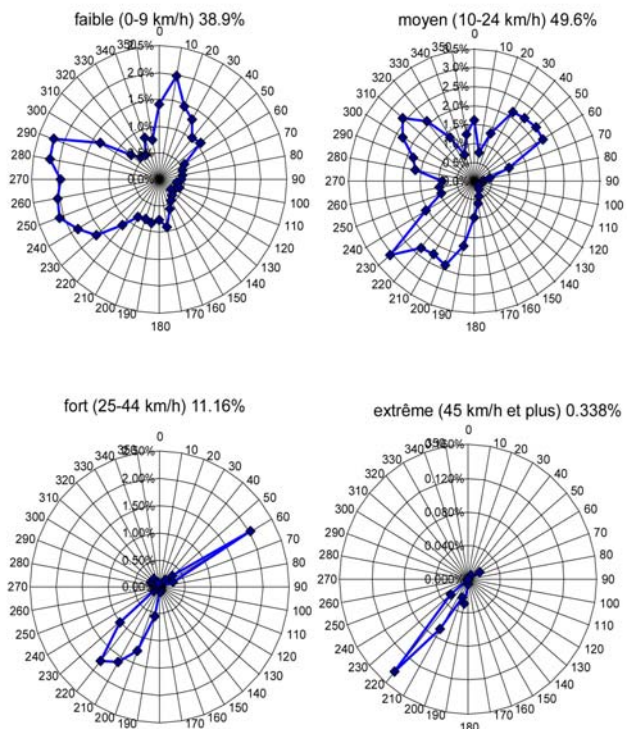


Figure 15 : Rose-des-vents de quatre intensités de chacune des saisons à la station de Trois-Rivières entre 1991 et 1998 en 36 divisions de compas.

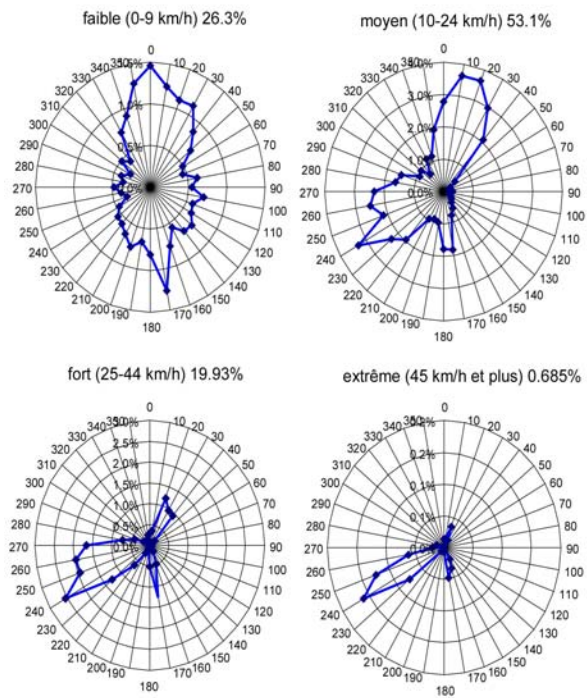
Tableau 6: Pourcentage des intensités et des directions des vents en 16 divisions de compas et 4 classes d'intensité à Trois-Rivières entre 1993 et 1999.

		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	%
		0°	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°	180°	202.5°	225°	247.5°	270°	292.5°	315°	337.5°	saison
Printemps	faible	2.5	3.5	3.6	2.6	1.3	0.9	0.8	0.9	1.7	3.3	3.6	2.4	2.5	3.7	1.7	1.1	36.1
	moyen	3.3	4.1	9.8	3.4	0.5	0.4	0.8	0.9	1.8	8.3	6.3	1.2	1.4	4.2	5.1	2.9	54.6
	fort	0.18	0.06	0.98	0.73	0.06	0.02	0.11	0.19	0.25	2.45	2.79	0.12	0.09	0.35	0.58	0.24	9.20
	extrême			0.001	0.005					0.010	0.024	0.076	0.003	0.004				0.123
Été	faible	3.2	3.3	2.6	2.7	1.5	1.1	1.3	1.8	3.2	4.2	3.7	4.0	3.7	4.5	2.7	1.9	45.4
	moyen	1.9	1.3	2.2	2.4	0.7	0.3	0.4	0.9	4.4	13.4	7.2	1.4	1.2	2.6	4.0	2.7	46.9
	fort	0.02		0.20	0.89	0.05	0.01		0.03	0.23	3.20	2.50	0.05	0.02	0.12	0.24	0.10	7.66
	extrême									0.021	0.009				0.006			0.035
Automne	faible	3.3	3.5	2.4	1.2	1.0	0.9	0.9	1.4	2.0	1.9	3.2	4.7	4.8	4.4	1.6	1.7	38.9
	moyen	3.0	3.7	5.2	3.3	0.7	0.4	0.4	0.9	2.5	5.2	6.0	2.9	2.7	4.7	5.3	2.6	49.6
	fort	0.10	0.05	0.90	2.08	0.05	0.03	0.07	0.17	0.48	2.99	3.08	0.21	0.10	0.36	0.33	0.16	11.16
	extrême			0.009	0.015					0.025	0.104	0.184	0.002					0.338
Hiver	faible	3.9	4.9	3.0	1.5	0.7	0.5	0.4	0.7	1.5	1.9	1.6	2.9	3.6	5.2	3.2	1.5	37.0
	moyen	4.2	5.0	6.1	2.4	0.2	0.1	0.2	0.4	2.6	5.5	5.8	2.9	2.4	4.5	5.4	3.7	51.6
	fort	0.14	0.23	2.00	2.40			0.05	0.04	0.23	1.97	2.49	0.12	0.13	0.52	0.55	0.19	11.06
	extrême	0.004		0.034	0.101					0.007	0.078	0.110					0.002	0.336

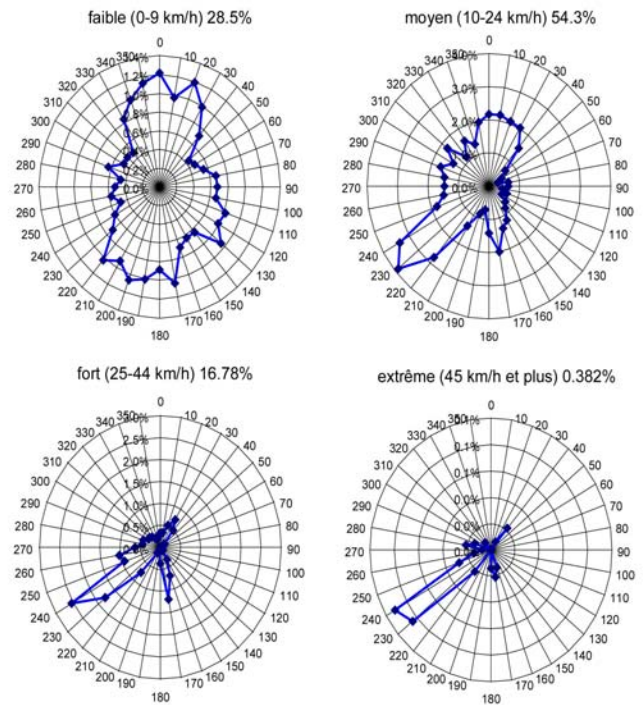
Tableau 7 : Pourcentage des intensités et des directions des vents en 16 divisions de compas et 4 classes d'intensité à Saint-Hubert entre 1993 et 1999.

		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	%
		0°	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°	180°	202.5°	225°	247.5°	270°	292.5°	315°	337.5°	saison
Printemps	faible	2.6	2.6	2.0	1.1	1.5	1.7	2.0	1.5	2.1	2.4	2.2	1.5	1.2	1.3	1.2	1.7	28.5
	moyen	4.3	5.0	4.0	1.3	1.3	1.3	1.5	2.5	3.9	2.1	5.0	7.7	3.7	3.7	3.6	3.3	54.3
	fort	0.62	0.97	1.31	0.27	0.07	0.04	0.11	0.68	1.94	0.30	1.22	4.56	2.09	1.13	0.84	0.61	16.78
	extrême			0.028	0.001				0.006	0.040	0.006	0.037	0.180	0.038	0.037	0.004	0.006	0.382
Été	faible	2.4	2.8	2.0	1.3	1.5	2.2	3.0	2.8	4.2	3.3	2.8	2.0	1.7	1.4	1.5	1.6	36.4
	moyen	2.6	2.9	2.3	0.8	0.4	0.5	1.0	2.4	6.6	4.7	8.2	9.6	4.9	3.7	3.0	2.1	55.6
	fort	0.10	0.11	0.18	0.04	0.04		0.03	0.17	0.64	0.14	1.00	2.98	1.41	0.60	0.35	0.16	7.95
	extrême											0.006	0.032					0.038
Automne	faible	2.1	2.7	2.3	1.2	1.3	1.9	2.0	1.9	2.5	1.8	1.6	1.3	1.7	1.3	1.1	1.2	28.0
	moyen	2.6	5.0	5.4	1.1	0.9	0.7	1.2	2.1	6.0	2.9	3.9	6.7	7.3	5.7	2.6	1.7	55.6
	fort	0.22	0.56	0.75	0.26	0.06	0.05	0.10	0.61	2.60	0.33	1.40	3.75	2.84	1.72	0.48	0.24	15.97
	extrême		0.007	0.002					0.016	0.041		0.046	0.213	0.055	0.011		0.008	0.397
Hiver	faible	2.9	2.9	2.3	1.3	1.3	1.5	1.6	1.5	2.3	1.7	1.5	1.1	0.9	0.9	0.9	1.5	26.3
	moyen	4.6	8.2	5.8	0.9	0.6	0.5	0.8	1.3	3.6	2.6	3.5	6.4	5.6	4.0	2.3	2.3	53.1
	fort	0.55	1.55	2.15	0.24	0.04		0.05	0.42	2.00	0.35	1.08	4.57	4.41	1.77	0.42	0.33	19.93
	extrême	0.009	0.051	0.021					0.036	0.078	0.003	0.022	0.282	0.161	0.020	0.003		0.685

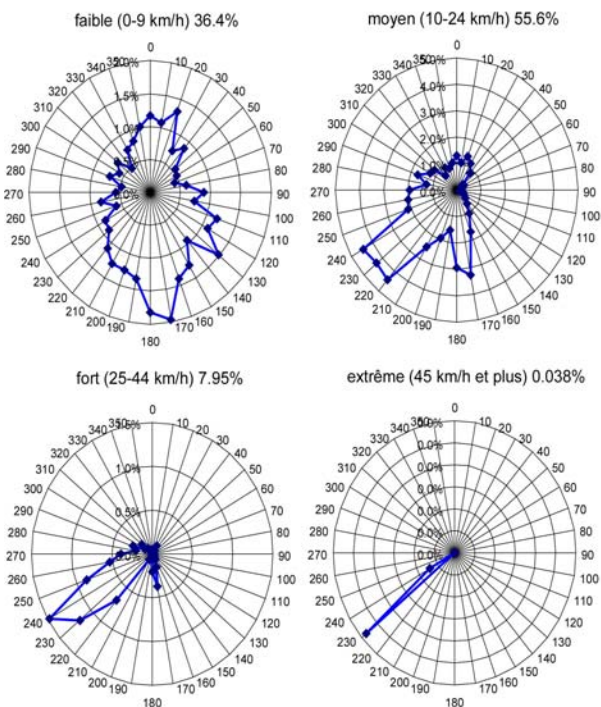
Hiver



Printemps



Été



Automne

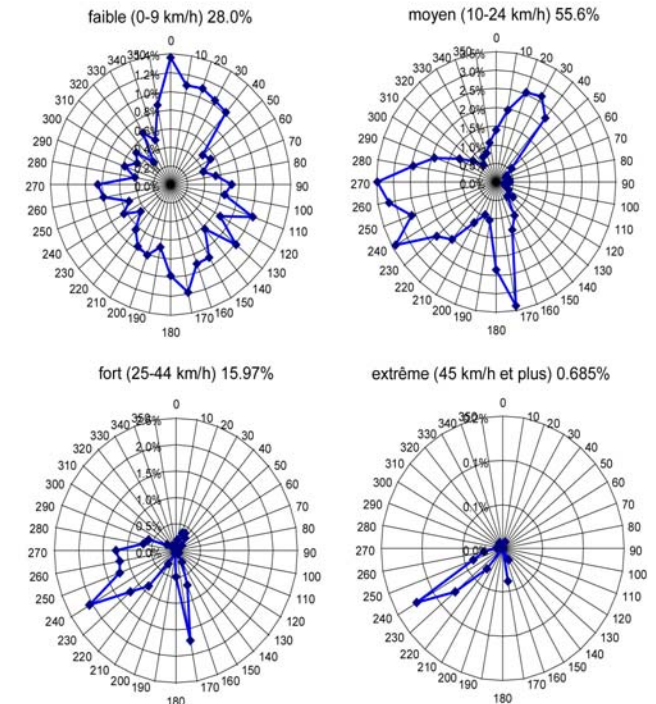


Figure 16 : Rose-des-vents de quatre intensités de chacune des saisons à la station de Saint-Hubert entre 1991 et 1998 en 36 divisions de compas.

nord-sud tandis qu'ils sont nord et ouest à Trois-Rivières. Les vents forts et extrêmes à Saint-Hubert sont similaires aux deux endroits, à la différence qu'ils sont SW à WSW à Saint-Hubert et SW à SSW à Trois-Rivières.

Les données de vents analysées sont disponibles en 36 divisions de compas. Afin d'obtenir un nombre raisonnable de simulations de vagues, les données de vents ont été ramenées en 16 divisions de compas qui correspondent aux divisions habituelles de la rose-des-vents : N, NNE, NE, ENE, E, etc. Le Tableau 6 et le Tableau 7 résument les ratios des directions et des intensités observées selon la saison aux stations de Trois-Rivières et de Saint-Hubert, respectivement.

6 Température de l'air

6.1 Généralités

La température est une composante importante de la productivité de la végétation et du succès reproducteur de la faune aquatique. Ainsi, les séries de température sont essentielles à la modélisation de ces compartiments du vivant. Les séries de données qui sont présentées ici sont les températures moyennes et maximales de l'air ainsi que les degrés-jours de croissance (nombre de degrés supérieurs à 5°C). Les données météorologiques utilisées proviennent des stations de Saint-Hubert (7027320) et de Sorel (7028200), permettant ainsi de couvrir la zone d'étude. La station de Saint-Hubert (Figure 1) a été mise en service dès 1928 et est toujours en opération. La série est relativement complète à l'exception d'une période manquante entre 1942 et 1949. La station de Sorel (Figure 1) contient les données journalières de température de 1914 à 1997 et seuls quelques mois sont manquants. Les séries complètes sont présentées sous forme de moyennes hebdomadaires pour la température maximale et moyenne ainsi que pour les degrés-jours de croissance. Les données journalières ont été utilisées pour la production des moyennes interannuelles des températures maximales, moyennes et des degrés-jours sur l'ensemble des séries disponibles.

6.2 Fluctuations des températures à long terme

La station de Saint-Hubert montre une variation des valeurs moyennes hebdomadaires de température d'une année à l'autre. Les fluctuations sont surtout évidentes durant la saison estivale. Ces fluctuations sont généralement inférieures à 5°C d'une année à l'autre avec une valeur moyenne de près de 23°C durant la période estivale et de -16°C durant la période hivernale. Les données de la station de Sorel fluctuent d'une façon similaire, la relation entre les deux séries étant caractérisée par un R^2 de 0.98. La seule exception est située au niveau de la moyenne des températures hivernales qui est de près de 1°C plus froid à Sorel qu'à Saint-Hubert.

6.3 Fluctuations saisonnières des températures

6.3.1 Températures moyennes

À la station de Saint-Hubert, les températures moyennes les plus élevées sont de 21.4°C en juillet.

Durant la période estivale, la valeur moyenne est de 19.4°C de juin à août. À l'hiver, la moyenne des températures est à son plus faible au mois de janvier avec une valeur de -11.7°C. De décembre à février, la moyenne est de -8,6°C avec des fluctuations extrêmes de $\pm 15^\circ\text{C}$ (Figure 17). Les fluctuations saisonnières des températures moyennes de la station de Sorel sont similaires. Durant l'été, la température moyenne est de 19.4°C avec un maximum en juillet de 21.6°C (Figure 18). De décembre à février, la température moyenne est de -10.2°C. La température moyenne minimale, en janvier, est de -13.4°C.

6.3.2 Températures maximales

Les températures maximales journalières varient de façon similaire aux températures moyennes. Durant l'été à Saint-Hubert, le maximum moyen atteint est de 27.4°C en juillet, tandis que la température maximale moyenne entre juin et août est de 25.2°C. En hiver, la température maximale moyenne la plus basse est de -6.9°C en janvier (Figure 19). La station de Sorel est très semblable, à la différence que les températures maximales hivernales moyennes sont légèrement plus faibles avec un minimum des températures maximales en janvier de -8.0°C (Figure 20).

6.3.3 Degrés-jours

Les degrés-jours de croissance représentent le nombre de degrés supérieurs à 5°C dans une journée. Il est évident que les fluctuations dans les degrés-jours varient de façon similaire à la température moyenne. Tout comme pour la température moyenne et maximale interannuelle, le maximum de degré-jour est présent en juillet. À Saint-Hubert, il est de 16.4°C pour une valeur moyenne de 14.4°C durant les mois de juin à août. Les valeurs extrêmes quant à elles fluctuent entre 7.6°C et 21.2°C en moyenne durant cette époque de l'année (Figure 21). À la station de Sorel (Figure 22), le maximum observé est de 16.6°C en juillet avec une valeur moyenne de 14.4°C (de juin à fin août). Les valeurs extrêmes moyennes se situent à 6.8°C et 22.0°C. À l'hiver, les valeurs de degré-jours sont nulles jusqu'en avril.

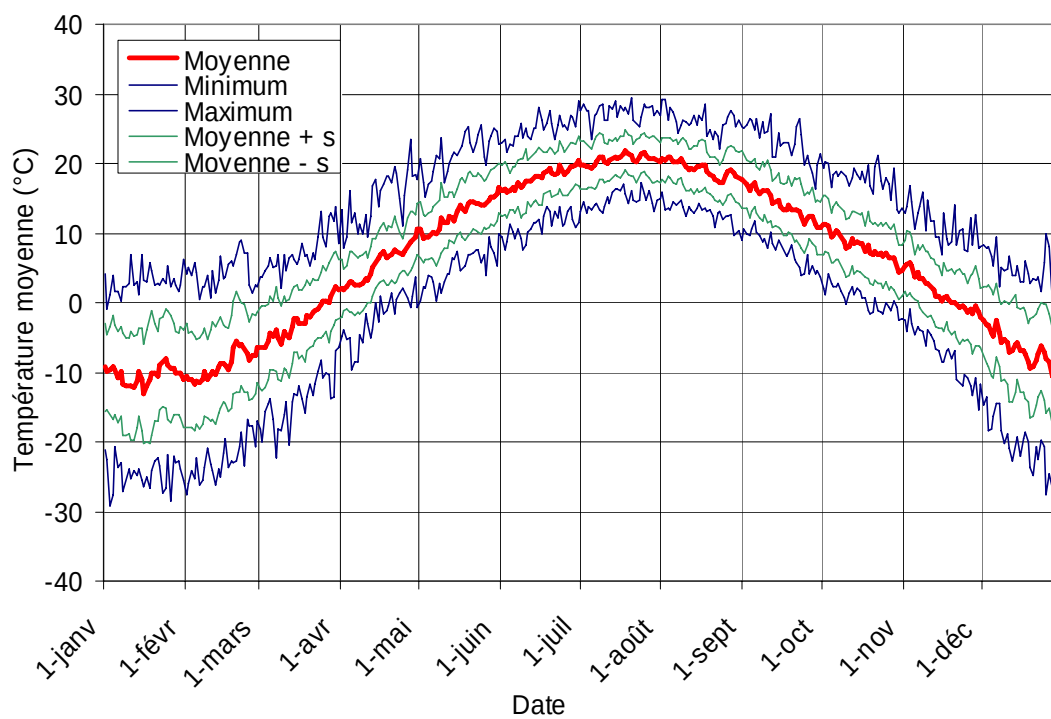


Figure 17 : Température moyenne interannuelle pour la station de Saint-Hubert de 1960 à 1997 (s = écart-type).

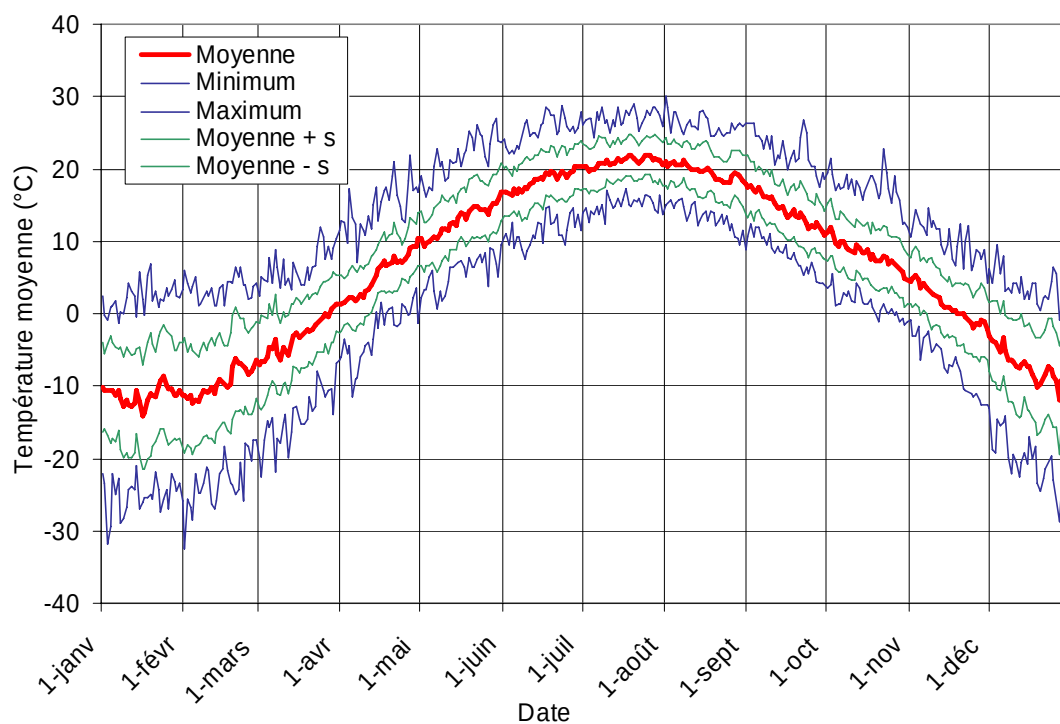


Figure 18 : Température moyenne interannuelle à la station de Sorel de 1960 à 1997 (s = écart-type).

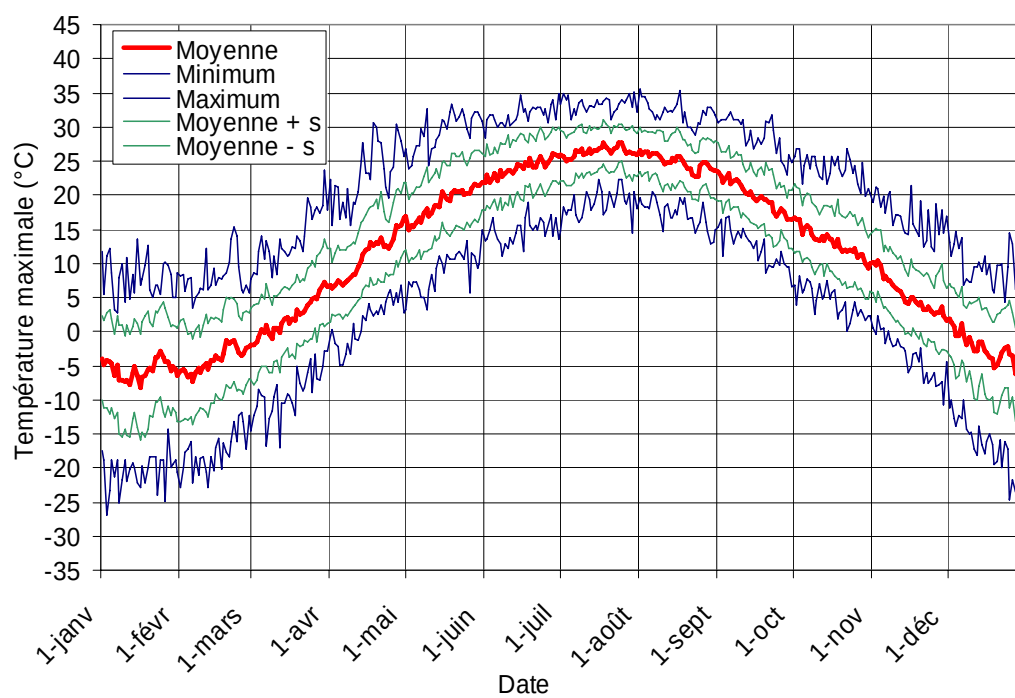


Figure 19 : Température maximale interannuelle pour la station de Saint-Hubert de 1960 à 1997 (s = écart-type).

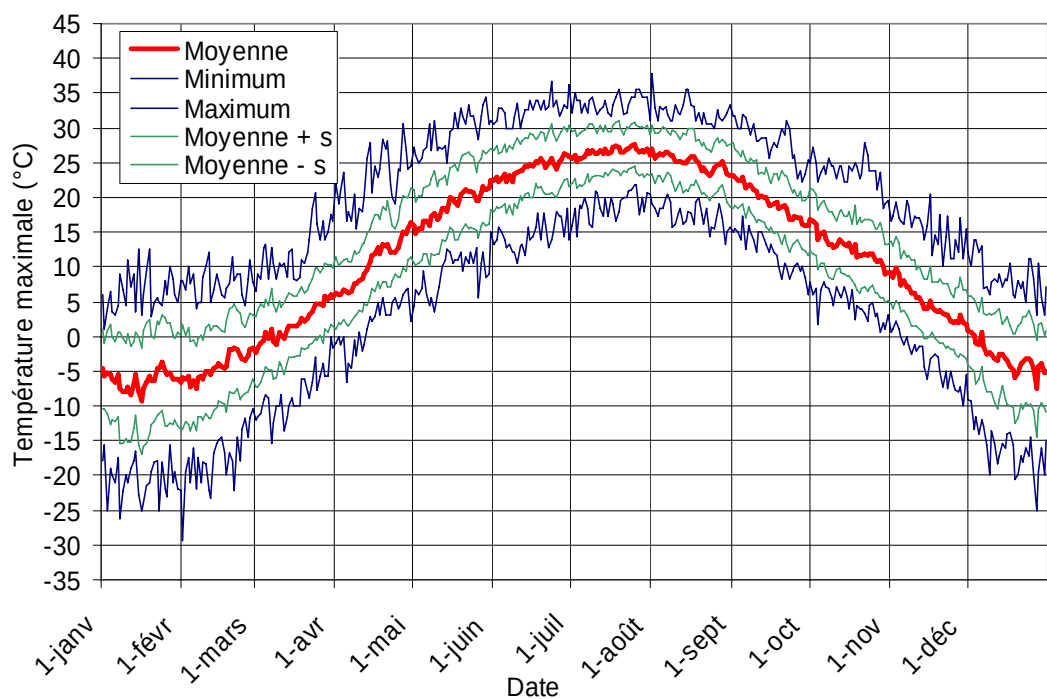


Figure 20 : Température maximale interannuelle à la station de Sorel de 1960 à 1997 (s = écart-type).

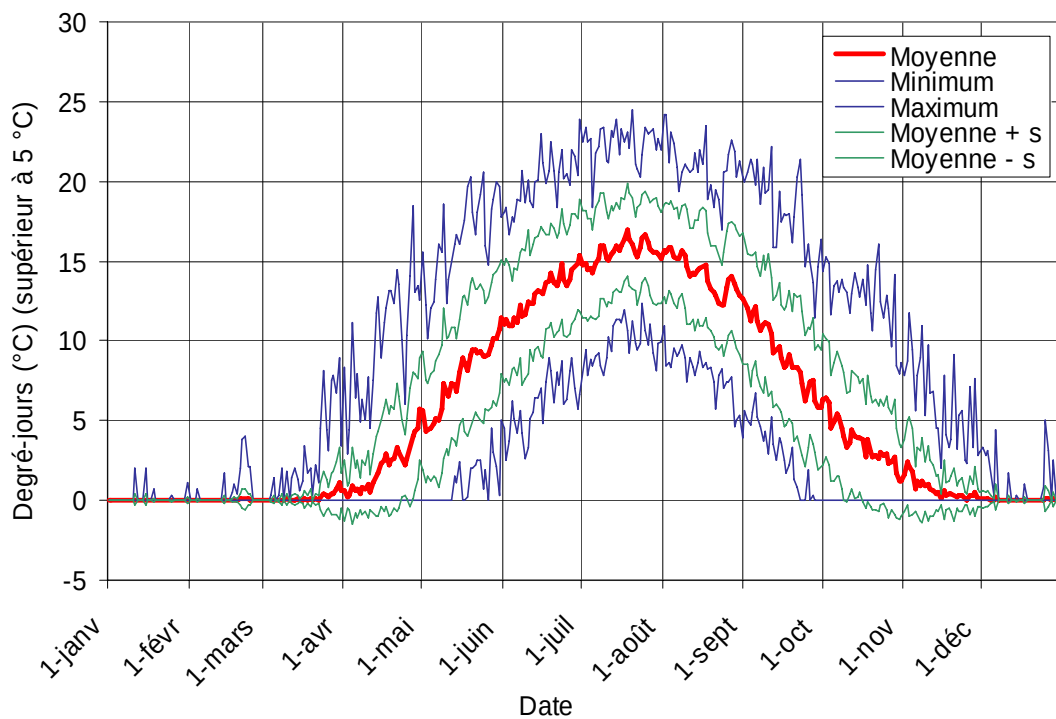


Figure 21 : Degré-jour moyen pour la station de Saint-Hubert de 1960 à 1997 (s = écart-type).

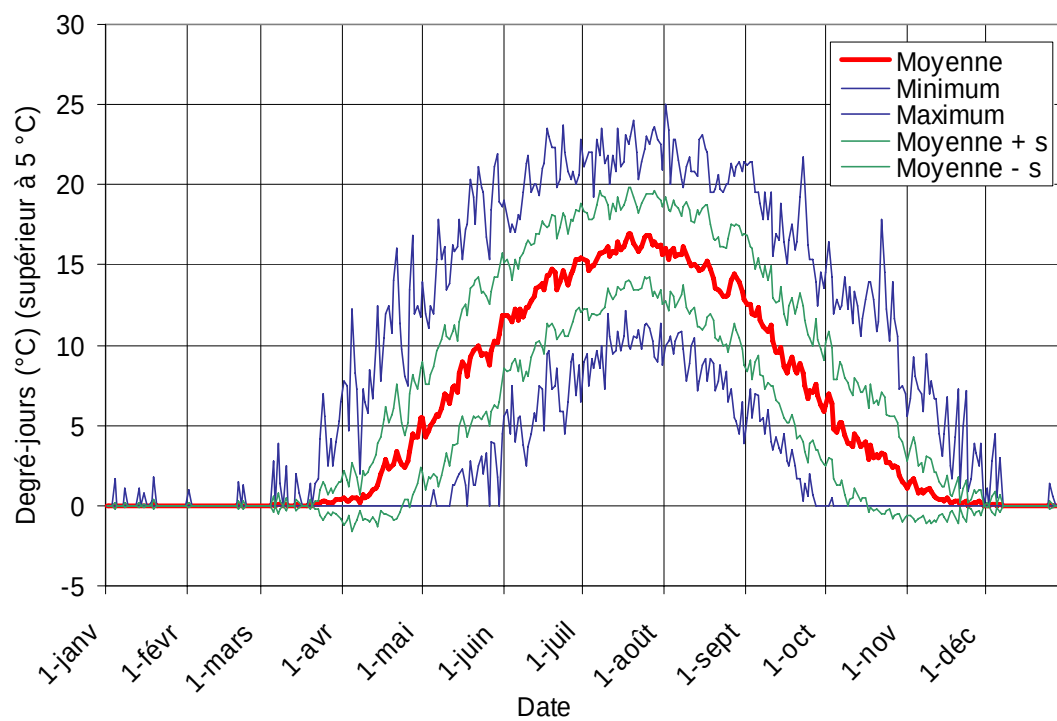


Figure 22 : Degré-jour moyen interannuel à la station de Sorel de 1960 à 1997 (s = écart-type).

7 Scénarios de référence

La variabilité temporelle des conditions de débits et de niveaux dans le fleuve Saint-Laurent est importante. Les débits relatifs entre l'eau des Grands Lacs, de l'Outaouais et des autres tributaires, la présence de glace et de plantes aquatiques, l'effet du vent et de la marée créent autant de conditions différentes qui peuvent être simulées. Toutefois, puisque ces conditions représentent une masse d'information importante et souvent redondante, des scénarios de référence ont été choisis pour montrer la diversité de la physique du milieu, afin de représenter leur variabilité avec un nombre restreint de conditions. Ainsi, les courants, les niveaux, les profondeurs, les superficies exondées/inondées, les masses d'eau, les vagues et une foule d'autres paramètres pourront être produits et utilisés.

Ce nombre limité de scénarios permet de fournir des événements calibrés et validés, qui ouvrent un champs d'analyse en plein développement, comme l'impact de la physique sur le vivant et sur d'autres aspects comme l'érosion et la sédimentation, ainsi que le transport de contaminants. Ces scénarios permettent également des comparaisons valables entre les différents scénarios de débit pour une même saison et entre les différentes saisons pour des débits semblables. De plus, les scénarios de référence ont un effet intégrateur puisqu'ils permettent d'analyser les impacts selon plusieurs domaines de connaissance pour un même événement. L'adoption et l'utilisation des scénarios de référence par les différentes équipes de recherche permettra éventuellement de quantifier les impacts des baisses et des hausses de niveau sur l'écosystème et ainsi de servir de guide à une gestion respectueuse du fleuve.

La sélection des scénarios est un long processus qui utilise les données de débits reconstitués à Sorel et à Trois-Rivières. La distribution des débits journaliers a été examinée de façon globale puis de façon saisonnière, afin de déterminer les événements communs et extrêmes. Puisque la régularisation et les grands travaux de dragage ont été mis place à partir de 1960, seulement la portion de la série de 1960 à 1998 a été utilisée. Une analyse de récurrence a permis de déterminer la période de retour des étiages d'été et des crues printanières. Enfin les débits des entrées principales (Lasalle, Milles-Îles/Prairies) et des tributaires ainsi que les données de niveau correspondantes sont caractérisés définissant ainsi les paramètres hydrauliques (conditions aux limites) de chacun des scénarios.

7.1 Distribution des débits

Le tronçon Montréal / Trois-Rivières présente une grande complexité dans les masses d'eau. Par exemple, un même débit de $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ en un point quelconque du fleuve peut être constitué de diverses proportions des masses d'eau qui peuvent provenir presque entièrement du rapide de Lachine, ou encore être composé d'une grande proportion d'eau des rivières des Mille-Îles et des Prairies. Étant donnée l'importance de tributaires tels que la rivière Richelieu, les variations dans les proportions des différents apports deviennent de plus en plus complexes vers Trois-Rivières.

Sorel à l'amont de l'embouchure de la rivière Richelieu, a été choisie comme point d'analyse des débits, simplement parce qu'elle se trouve immédiatement à l'amont du lac Saint-Pierre. D'autres choix auraient été aussi pertinents. Cependant, Sorel a l'avantage d'intégrer les deux entrées de débit qui dominent l'hydraulique du tronçon. Le débit à Sorel est constitué des débits reconstitués provenant des rapides de Lachine et des débits non-jaugés de la rive sud de Montréal, de ceux des rivières des Mille-Îles et des Prairies, ainsi que ceux de la rivière Assomption.

Les débits du Saint-Laurent montrent des fluctuations à court et à long terme (voir section 3 : Régime hydrologique, le débit). La distribution des fréquences observées en moyennes hebdomadaires est présentée à la Figure 23, par tranches de $200\text{ m}^3/\text{s}$. Les débits à Sorel, tels que décrits précédemment, ont varié entre $6\,000$ et $19\,400\text{ m}^3/\text{s}$ entre 1960 et 1998. La distribution des fréquences montre que les débits les plus fréquents vont de $8\,400$ à $12\,000\text{ m}^3/\text{s}$ et que les débits de moins de $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ et de plus de $16\,400\text{ m}^3/\text{s}$ sont extrêmement rares. La moyenne est de $10\,277\text{ m}^3/\text{s}$, tandis que la médiane est de $10\,031\text{ m}^3/\text{s}$.

La distribution des débits change selon la saison. La Figure 24 permet de visualiser la durée et la variabilité des débits selon les différentes saisons hydrauliques tels que reconstitués à Sorel. Ces saisons sont définies par la présence de différents type de frottement exercés sur l'écoulement. L'hiver, définie ici comme étant la saison avec couvert de glace, a été limitée du début de janvier à la mi-février. Cette saison représente la période où la variabilité dans les débits est la plus faible. Au printemps, qui est ici restreint dans la période de la mi-mars au début de juin (début de la saison de croissance des macrophytes), seul le frottement exercé par le substrat est présent. Il s'agit ici de la saison des crues, la variabilité dans les débits étant maximale. L'été est ici définie comme étant la période du maximum de croissance des plantes aquatiques. Cette saison hydraulique a été

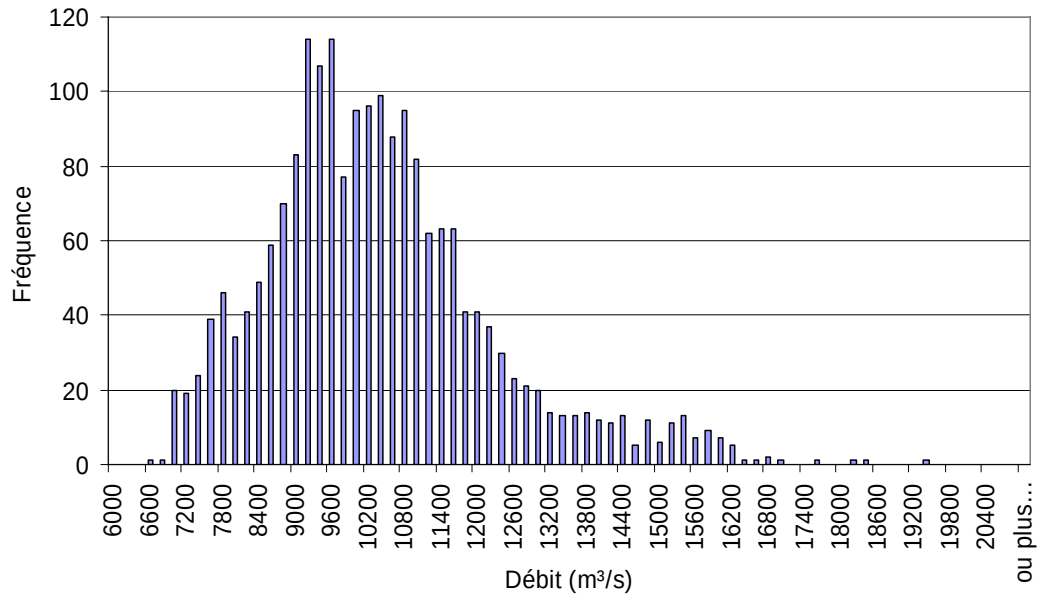


Figure 23 : Distribution des débits du fleuve Saint-Laurent entre 1960 et 1998, en moyenne hebdomadaire par tranches de 200 m³/s.

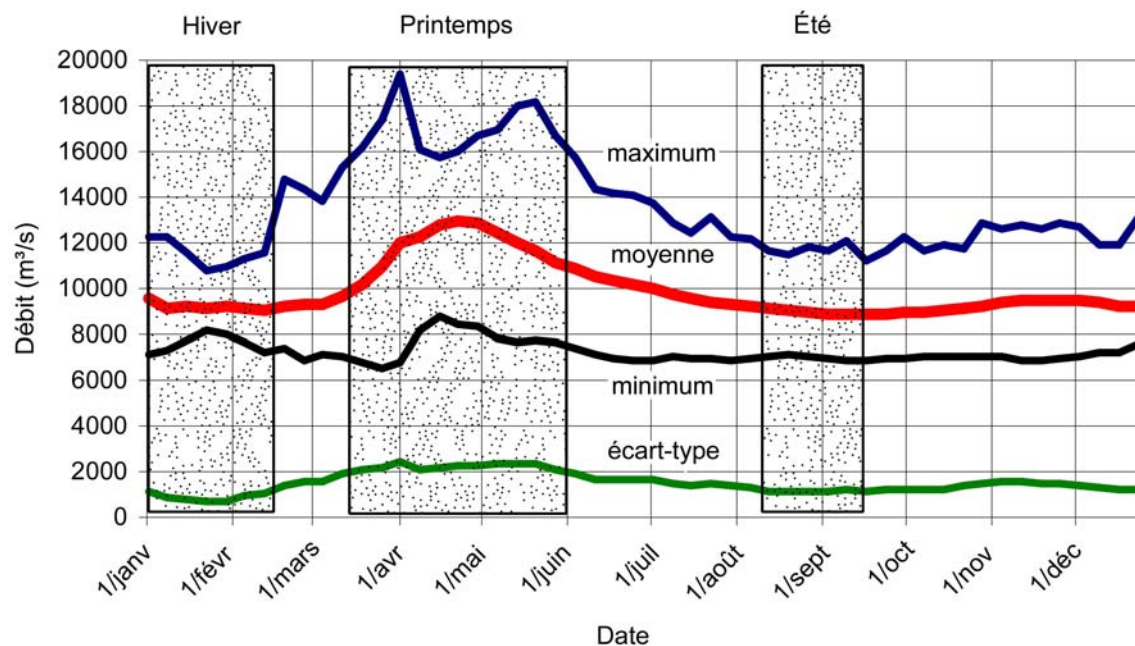


Figure 24 : Distribution des saisons hydrauliques à l'aide de la variation saisonnière de la moyenne interannuelle, du minimum et de l'écart-type des débits hebdomadaires à Sorel entre 1960 et 1998.

limitée au premier quart du mois d'août jusqu'à la mi-septembre. La variabilité dans les débits y est relativement faible.

La distribution des débits dans chacune des saisons hydrauliques est présentée à la Figure 25 par tranches de 200 m³/s entre 1960 et 1998. En période de couvert de glace, durant l'hiver, les débits varient de 7 115 m³/s à 12 290 m³/s. La distribution est à peu près normale, la moyenne et la médiane étant similaires à 9 525 m³/s. En période d'absence de glace et de plantes, au printemps, la distribution des débits est très étendue entre un minimum de 6 545 m³/s et un maximum 19 355 m³/s. La distribution est en apparence normale, bien que les extrêmes supérieurs soient très éloignés. La médiane est de 11 885 m³/s tandis que la moyenne est de 11 945 m³/s. En période de croissance maximale des plantes, durant la saison estivale, les débits ont une variabilité relativement faible avec des valeurs extrêmes de 6 865 m³/s et de 12 205 m³/s. La moyenne est de 9 400 m³/s et la médiane de 9 366 m³/s.

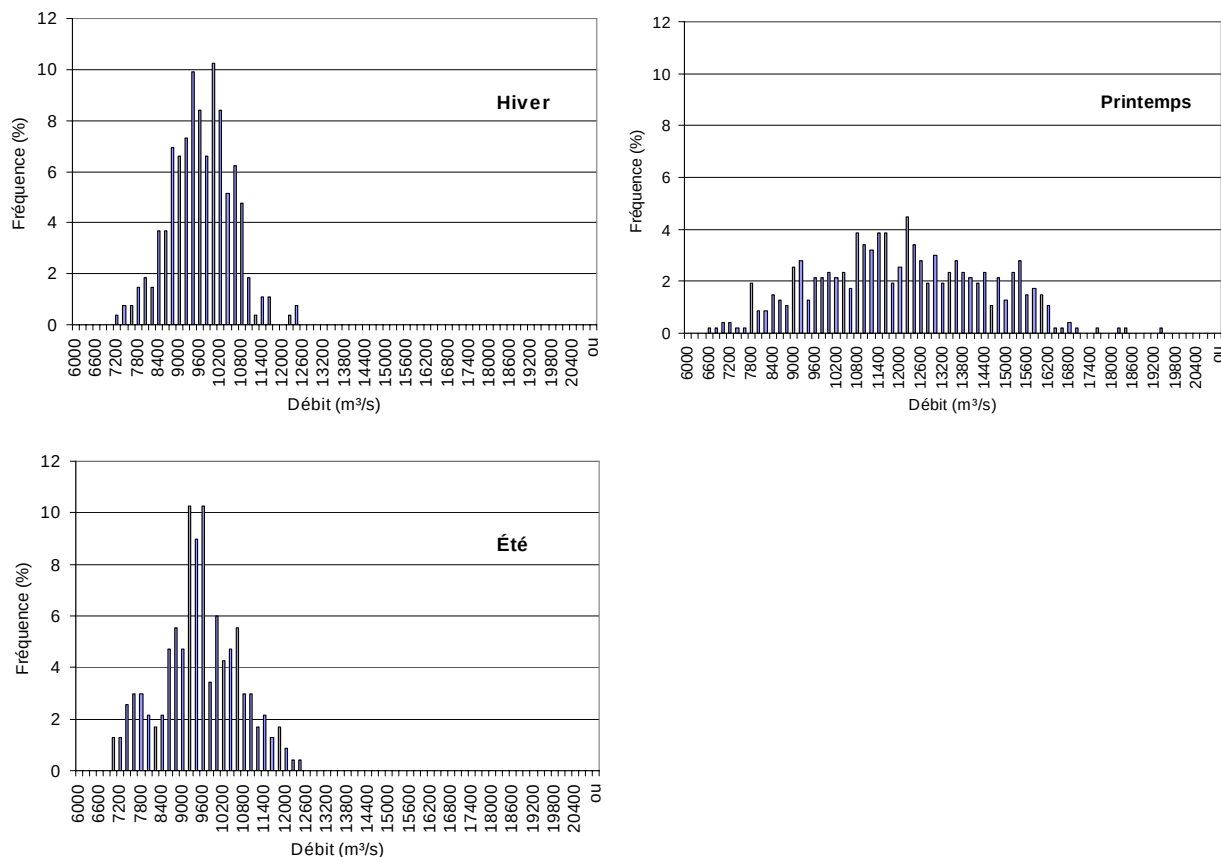


Figure 25 : Distribution des débits à l'intérieur des saisons hydrauliques de l'hiver (glace : 1 janvier-15 février), du printemps (substrat seulement : 15 mars-1 juin) et de l'été (macrophytes : 7 août-15 septembre) à Sorel entre 1960 et 1998.

7.2 Récurrence des débits en étiage et en crue

Une analyse de récurrence a été réalisée pour les débits reconstitués pour la période de 1960 à 1998 à Sorel et à Trois-Rivières. Les valeurs maximales (crue) et minimales (étiage) annuelles tirées des séries de moyennes hebdomadaires ont été utilisées et afin de permettre les comparaisons, les calculs ont aussi été effectués en utilisant les valeurs maximales et minimales des séries journalières. Chaque série de valeurs maximales ou minimales annuelles a été caractérisée au moyen d'une distribution Log-Pearson Type III à l'aide du logiciel HYFRAN qui remplace maintenant le logiciel AJUSTE (Perreault *et al.*, 1994) et qui comprend plusieurs des méthodologies proposées par Bobée et Ashkar (1991). La distribution Log-Pearson Type III est recommandée par le conseil des ressources en eau américain pour la représentation des crues maximales annuelles (WRC, 1967 ; Benson, 1968).

De façon générale, les crues ou les maximums annuels apparaissent durant le printemps, tandis que les étiages ou minimums annuels sont présents durant l'été et l'hiver. Le débit maximal de 19 355 m³/s observé au printemps dans la série de débits hebdomadaires à Sorel correspond à une crue de période située entre 100 et 500 ans (Figure 26). En été, le débit minimal de 6 865 m³/s observé dans la série de débits hebdomadaires à Sorel correspond à un étiage de période située entre 10 et 50 ans (Figure 27). La différence entre les périodes de récurrence en crue et en étiage est probablement liée à la régularisation du système.

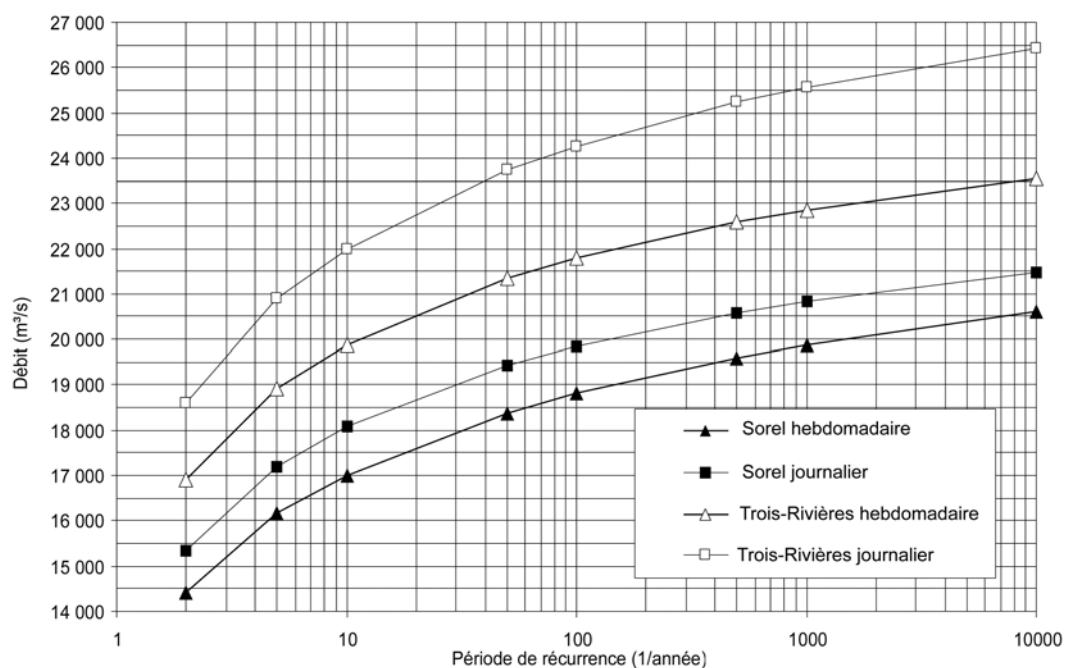


Figure 26 : Analyse de récurrence des crues en moyennes hebdomadaires et journalières du fleuve Saint-Laurent entre 1960 et 1998.

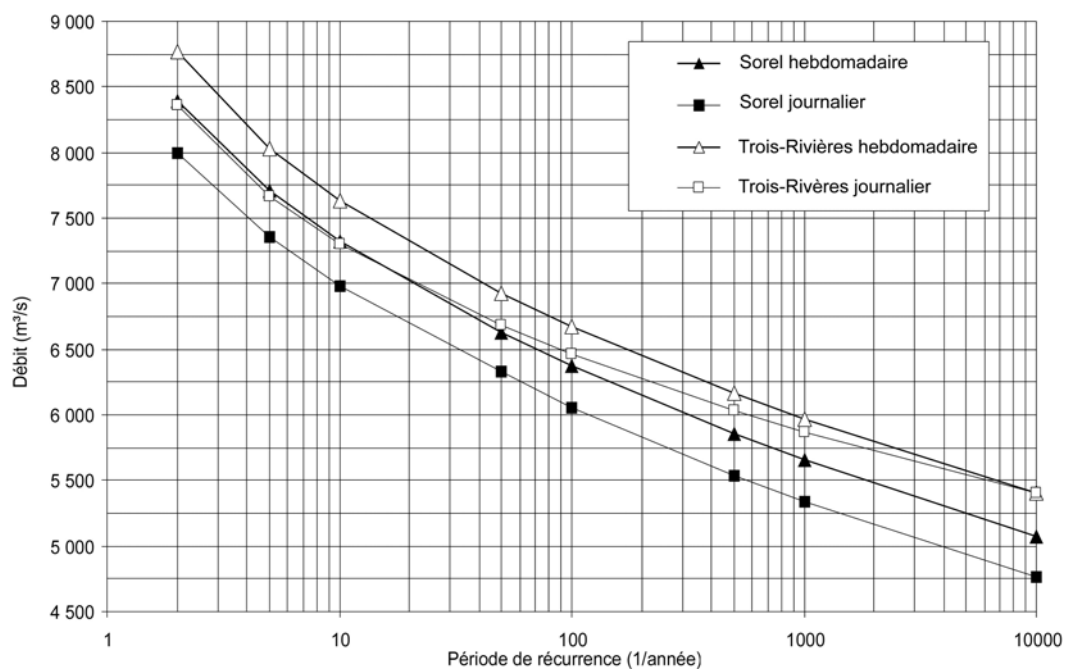


Figure 27 : Analyse de récurrence des étiages en moyennes hebdomadaires et journalières du fleuve Saint-Laurent entre 1960 et 1998.

7.3 Définition des scénarios

Le choix des scénarios doit tenir compte des saisons hydrologiques, des périodes de retour et doit couvrir le spectre des conditions possibles. De plus, comme l'objectif des scénarios est de simplifier et mettre en contraste des conditions hydrauliques, les scénarios doivent être en nombre restreint. Il faut cependant qu'ils soient suffisamment nombreux pour pouvoir observer les changements de façon graduelle et déterminer les conditions critiques, lors de la modélisation d'un compartiment quelconque de l'écosystème. Par expérience, on sait que des changements dans les débits de l'ordre de 1 500 à 3 000 m³/s sont satisfaisants. Enfin, il est intéressant d'être en mesure de comparer les saisons hydrauliques entre elles, et de choisir des tranches de débit similaires pour les différentes saisons.

Les huit scénarios choisis ont été caractérisés par le débit à Sorel (Tableau 8). Ces scénarios couvrent tout le spectre des débits observés et s'étendent à une récurrence de près de 1/10 000 ans pour les crues et les étiages. Tous les débits ne sont pas présents dans chacune des saisons hydrauliques puisque certains débits ont une probabilité d'occurrence extrêmement faible en certaines saisons. Les scénarios ont été définis à partir des moyennes de l'été et de l'hiver, qui sont près de 9 500 m³/s (Scénario 4) et par la moyenne du printemps qui est de près de 12 000 m³/s (Scénario 5). L'écart de 2 500 m³/s entre les scénarios a été conservé jusqu'au scénario 7 qui représente une récurrence de 1/16 ans. Le scénario extrême de 20 500 m³/s est de 1 500 m³/s plus élevé que le maximum hebdomadaire calculé. Pour les scénarios de faible débit, un pas de 1500 m³/s a été choisi. Ce pas est plus faible et permet d'obtenir une résolution relative similaire aux débits plus élevés. Les récurrences des scénarios d'étiage sont similaires à celles retenues pour les débits de crue. Le scénario extrême de 5 000 m³/s correspond à une récurrence très faible de près de 1/10 000 ans. Bien qu'aucun débit similaire ne soit observé dans la série reconstituée, il a été choisi afin de représenter les conditions possibles d'une baisse d'au moins 20% des apports en eau.

Par saison, la numérotation des scénarios est accompagnée d'une lettre identifiant la saison hydraulique. Le Tableau 8 présente avec les saisons, le pourcentage observé de la tranche de débit représentée par un scénario. Par exemple, les scénarios moyens de l'hiver (4H) et de l'été (4E) représentent respectivement 74% et 62% des observations pour la saison dans la tranche de débit variant de 8 750 à 10 750 m³/s.

Tableau 8 : Numérotation et caractéristique du débit à Sorel pour les scénarios retenus selon les saisons hydrauliques.

Scénario	Débit à Sorel m ³ /s	Différence m ³ /s	Récurrance ans	Hiver	Printemps	Été
8	20 500	+ 3 000	1/7000		8P (0.2%)	
7	17 500	+ 2 500	1/16		7P (2.8%)	
6	14 500	+ 2 500	1/2		6P (26.7%)	
5	12 000	+ 2 500		5H (6.2%)	5P (38.7%)	5E (12.4%)
4	9 500			4H (74.4%)	4P (22.4%)	4E (62.0%)
3	8 000	- 1 500	1/3	3H (18.7%)	3P (7.9%)	3E (22.2%)
2	6 500	- 1 500	1/70	2H (0.7%)	2P (1.3%)	2E (3.4%)
1	5 000	- 1 500	~1/10 000		1P	1E

Note : En gras : scénario moyen pour la saison et entre parenthèses : pourcentage observé dans la tranche des débits par saison.

7.4 Débits et niveaux du Saint-Laurent et de ses tributaires

7.4.1 Conditions limites en débit

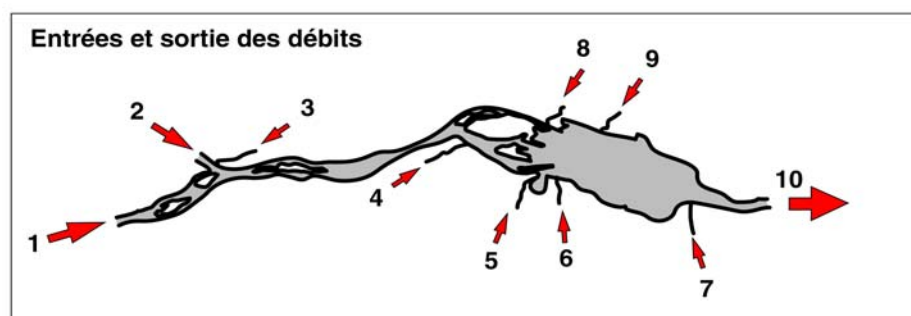
Les scénarios de débits définis précédemment doivent être complétés avec les conditions d'entrée d'eau des tributaires dans le système. Il est évident qu'avec un nombre aussi restreint (8) de conditions, on ne peut avoir la prétention de tout décrire. Les conditions des tributaires et la proportion d'eau provenant des rivières des Mille-Îles/des Prairies *versus* celle provenant du rapide de Lachine peuvent varier pour un même débit à Sorel. Afin de réduire la complexité et de donner une vision globale, les conditions moyennes observées ont été colligées pour chacun des scénarios. Par exemple, pour le scénario 4 à 9 500 m³/s à Sorel, la distribution des débits des entrées d'eau de chacun des tributaires pour les journées correspondant à un débit de 9 500 m³/s $\pm$ 5% a été construite. De ces distributions de débits, la moyenne a été conservée pour produire les scénarios. Pour les débits extrêmement rares, sur lesquels il n'existe pas de données de tributaires, les débits ont été extrapolés à partir des courbes établies pour chacun des tributaires avec les scénarios communs (Scénarios 2 à 7).

La position des entrées d'eau provenant des tributaires principaux et du cours principal du fleuve dans le tronçon est présentée à la Figure 28. Pour chacun des scénarios retenus, les conditions de débits de tous les tributaires retenus y sont présentées. Il est à noter que les débits à Trois-Rivières correspondent, en termes de récurrences calculées, avec les récurrences calculées à Sorel (voir section 7.2).

7.4.2 Conditions limites en niveau

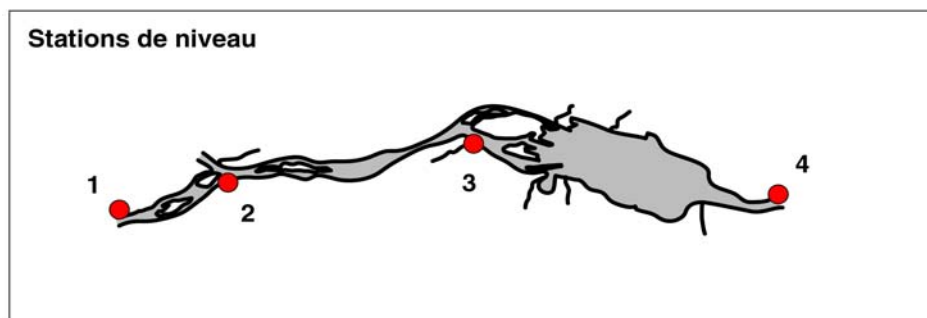
Les conditions limites en niveau qui doivent être utilisées pour les différents scénarios doivent varier selon la saison. En effet, l'impact sur l'écoulement des plantes aquatiques et de la glace ainsi que les débits des tributaires à l'aval, font varier le niveau à la sortie du tronçon à Trois-Rivières et dans le tronçon même (voir section 4.3). Les conditions de niveau peuvent changer considérablement à l'intérieur d'une même saison hydraulique et d'une saison à l'autre. Par exemple, la quantité de plantes aquatiques atteint un maximum annuel entre la mi-août et la mi-septembre mais selon les conditions de niveau d'eau la quantité de plantes change. Le parallèle avec la glace est également aisé à comprendre. Il devient évident que les niveaux à Trois-Rivières pourront être utilisés comme conditions limites des simulations hydrodynamiques tandis que les autres stations sont présentées à titre indicatif.

Les stations de niveau utilisées sont présentées à la Figure 29 et comprennent les stations de la Jetée #1, de Varennes, de Sorel et de Trois-Rivières. Les données journalières de niveau à ces stations ont été utilisées afin de montrer la distribution des observations correspondant aux scénarios de référence définis. Les périodes cumulées correspondent aux saisons hydrauliques définies à la Figure 24. Les niveaux correspondant aux débits des scénarios durant la saison hydraulique ont été conservés. Par exemple, pour le scénario 4 en saison estivale, tous les niveaux mesurés durant les jours d'été (7 août-15 septembre) où le débit à Sorel était de $9\,500\text{ m}^3/\text{s} \pm 1\%$ ont été conservés et la médiane de ces données est présentée à la Figure 29. Les valeurs de certains scénarios peu fréquents ont été extrapolés dans 4 cas ; les données sont soit manquantes (scénario 2) ou encore les niveaux n'ont jamais été observées (scénario 1). L'extrapolation a été effectuée à l'aide d'une polynomiale du second ordre.



Scénario	Tributaires amont de Sorel			Tributaires aval de Sorel						Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Sorel	Lasalle	MIP	Assomption	Richelieu	Yamaska	Saint-François	Nicolet	Maskinongé	duLoup	Trois-Rivières
m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s
8 20 500	14 531	5 374	550	1 100	410	980	380	122	107	23 554
7 17 500	13 174	3 824	502	1 044	345	850	233	119	97	20 188
6 14 500	11 396	2 772	332	898	220	572	130	105	92	16 517
5 12 000	10 102	1 750	148	615	126	330	76	43	37	13 227
4 9 500	8 304	1 142	54	326	52	155	30	16	14	10 093
3 8 000	6 997	960	43	240	38	139	24	14	14	8 469
2 6 500	5 740	728	32	148	29	128	19	8	11	6 843
1 5 000	4 572	398	30	137	28	120	17	7	10	5 319

Figure 28 : Conditions limites en débits des entrées et de la sortie d'eau pour le tronçon Montréal/Trois-Rivières.



Scénario	Hiver				Printemps				Été			
	Jetée #1	Varennnes	Sorel	Trois-Rivières	Jetée #1	Varennnes	Sorel	Trois-Rivières	Jetée #1	Varennnes	Sorel	Trois-Rivières
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	zc = 5.564	zc = 4.836	zc = 3.775	zc = 2.942	zc = 5.564	zc = 4.836	zc = 3.775	zc = 2.942	zc = 5.564	zc = 4.836	zc = 3.775	zc = 2.942
8					9.82	9.06	8.01	7.24				
7					8.80	7.98	6.92	6.16				
6					7.99	7.20	6.22	5.53				
5	7.29	6.33	5.40	4.55	7.19	6.37	5.42	4.69	7.24	6.31	5.22	4.34
4	6.71	5.99	5.04	3.99	6.30	5.57	4.74	4.06	6.34	5.47	4.60	3.70
3	8.71	6.32	4.86	3.84	5.61	4.95	4.17	3.55	5.84	5.06	4.24	3.32
2	5.50	4.99	4.26	3.40	4.95	4.20	3.56	2.75	5.21	4.42	3.60	2.65
1					4.29	3.48	2.96	2.52	4.48	3.93	2.97	2.29

Note : zc= zéro des cartes (m). Les valeurs en italique gras sont reconstituées étant donné l'absence d'observation près des valeurs réels. Datum = IGLD85.

Figure 29 : Conditions limites en niveau à Trois-Rivières et stations de niveau repères du tronçon Montréal/Trois-Rivières selon les saisons et les scénarios.

7.5 Discussion

Parmi les 18 événements de référence identifiés au sein des 8 scénarios de débit à Sorel, seuls les événements du printemps et de l'été seront simulés soit un total de 13 cas. Les événements en période de couvert glaciaire ne seront pas considérés, étant donné l'absence de données spatiales de l'épaisseur de glace et la complexité du phénomène à simuler. L'intérêt actuel est surtout porté sur les événements et phénomènes en absence de glace.

7.5.1.1 Sur la représentativité des scénarios

Les scénarios retenus ne représentent qu'une partie de la complexité de l'écoulement dans le fleuve, la proportion du débit provenant des Grands Lacs par rapport à celui de la rivière des Outaouais pouvant varier grandement. Le Tableau 9 montre les variations du ratio des débits entre Lasalle et MIPA (Milles-Iles/Prairies/Assomption) et on y retrouve les moyennes des ratios observés dans la série hydrologique. Afin d'augmenter la taille de l'échantillon pour chacun des scénarios, les valeurs nominatives du débit à Sorel (ex : Scénario 1 = 12 000 m³/s) contiennent toutes les données de débit correspondant au scénario plus ou moins 1% (ex : 9 880 à 12 120 m³/s). Les ratios scénarios rarissimes comme les scénarios 1 et 8, représentent le ratio de la moyenne journalière du débit minimum et maximum observé. Au printemps, la proportion du débit provenant de MIPA est nettement plus élevée que pour les autres saisons. Ces considérations pourront être importantes dans les analyses nécessitant la position des masses d'eau.

Tableau 9 : Variations du ratio du débit provenant de Lasalle et de MIPA (rivière des Prairies, des Milles Iles et l'Assomption dans les scénarios retenus.

	Débit des scénarios			Ratio moyen observé		Ratio moyen des débits selon la saison hydrologique (observations)							
	Sorel	Lasalle	MIPA	Lasalle	MIPA	Hiver (jan-mars)		Printemps (avril-mai)		Été (juin-sept)		Automne (oct-déc)	
	M ³ /s	m ³ /s	M ³ /s	(min/max)	(min/max)	Lasalle	MIPA	Lasalle	MIPA	Lasalle	MIPA	Lasalle	MIPA
8	20500	14531	5924	73%	27%	~	~	73%	27%	~	~	~	~
7	17500	13174	4326	75% (80/69)	25% (30/19)	~	~	75%	25%	~	~	~	~
6	14500	11396	3104	78% (84/69)	21% (31/16)	~	~	78%	21%	~	~	~	~
5	12000	10102	1898	84% (89/74)	16% (25/11)	84%	16%	82%	18%	86%	14%	85%	15%
4	9500	8304	1196	86% (93/70)	14% (30/7)	86%	14%	83%	17%	89%	11%	88%	12%
3	8000	6997	1003	87% (93/75)	13% (24/7)	86%	14%	80%	20%	89%	11%	88%	12%
2	6500	5740	760	88% (92/81)	12% (18/8)	87%	13%	~	~	89%	11%	88%	12%
1	5000	4572	428	92%	8%	~	~	~	~	92%	8%	~	~

Les niveaux présentés pour la définition des scénarios représentent la médiane des niveaux d'eau mesurés. Ces niveaux proviennent d'un échantillonnage des niveaux mesurés aux stations retenues pour les événements de débits, et correspondant aux scénarios définis précédemment (débit $\pm 1\%$). Pour un même événement de débit à Sorel, les niveaux d'eau du tronçon peuvent varier énormément. Les causes de ces fluctuations sont nombreuses : variations dans le frottement causé par la glace, les plantes et possiblement le substrat, l'effet des vents, des marées et du débit des tributaires plus en aval. Le Tableau 10 présente la variabilité des niveaux à l'intérieur même d'un scénario de débit. On y retrouve, pour chacune des stations retenues, la médiane, ainsi que les niveaux maximum et minimum. Afin d'éviter les aberrations possibles ou les cas rarissimes dans les mesures de niveau, les niveaux maximum et minimum représentent respectivement les quantiles de 90% et de 10% des séries.

Tableau 10 : Variations des niveaux aux stations de mesure retenues pour les scénarios définis par le débit à Sorel.

Scénario	Hiver				Printemps				Été			
	Jetée #1	Varennes	Sorel	Trois-Rivières	Jetée #1	Varennes	Sorel	Trois-Rivières	Jetée #1	Varennes	Sorel	Trois-Rivières
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	zc = 5.564	zc = 4.836	zc = 3.775	zc = 2.942	zc = 5.564	zc = 4.836	zc = 3.775	zc = 2.942	zc = 5.564	zc = 4.836	zc = 3.775	zc = 2.942
8					9.82 (1)	9.06 (1)	8.01 (1)	7.24 (1)				
7					8.80 (5)	7.98 (5)	6.92 (5)	6.16 (5)				
					9.15	8.41	7.45	6.79				
					8.63	7.73	6.56	5.78				
6					7.99 (62)	7.20 (62)	6.22 (62)	5.53 (62)				
					8.17	7.43	6.42	5.73				
					7.82	6.99	5.96	5.18				
5	7.29 (6)	6.33 (6)	5.40 (6)	4.55 (6)	7.19 (98)	6.37 (98)	5.42 (98)	4.69 (98)	7.24 (13)	6.31 (13)	5.22 (13)	4.34 (13)
	7.41	6.63	5.91	5.06	7.44	6.72	5.82	5.14	7.39	6.56	5.56	4.81
	7.04	6.18	5.16	4.40	7.03	6.19	5.17	4.37	7.08	6.13	5.02	4.09
4	6.71 (143)	5.99 (143)	5.04 (143)	3.99 (143)	6.30 (34)	5.57 (34)	4.74 (34)	4.06 (34)	6.34 (134)	5.47 (134)	4.60 (134)	3.70 (134)
	8.75	7.14	5.68	4.33	6.55	5.93	5.17	4.46	6.43	5.61	4.74	3.88
	6.39	5.69	4.74	3.70	6.12	5.30	4.47	3.66	6.25	5.39	4.46	3.50
3	8.71 (24)	6.32 (24)	4.86 (24)	3.84 (24)	5.61 (13)	4.95 (13)	4.17 (13)	3.55 (13)	5.84 (31)	5.06 (31)	4.24 (31)	3.32 (31)
	10.15	7.14	5.15	4.21	5.84	5.17	4.44	3.94	5.93	5.19	4.45	3.62
	6.20	5.69	4.55	3.57	5.52	4.84	3.99	3.31	5.68	4.81	4.04	3.02
2	5.50 (1)	4.99 (1)	4.26 (1)	3.40 (1)	4.95	4.20	3.56	2.75	5.21	4.42	3.60	2.65
1					4.29	3.48	2.96	2.52	4.48	3.93	2.97	2.29

Les données en gras = la médiane, entre parenthèse () = le nombre d'échantillons, et les deux autres valeurs correspondent au maximum (90% Quantile) et au minimum mesuré (10% Quantile), les extrêmes peuvent donc être légèrement plus importants. Les données en italique sont des reconstitutions.

7.5.1.2 *Sur le zéro des cartes*

L'analyse des niveaux d'eau a été faite en utilisant le datum international des Grands Lacs version 1985 (IGLD-85). Plusieurs études ont été réalisées en utilisant le zéro des cartes comme référence verticale, ce qui cause de sérieux problèmes de fiabilité. Contrairement au IGLD-85 qui est une référence fixe, le zéro des cartes est un datum en pente qui a été conçu aux fins de la navigation et son homogénéité spatiale doit être vérifiée avant son utilisation. Le niveau du zéro des cartes en IGLD-85 pour les stations de Jetée #1, Varennes, Sorel et Trois-Rivières est respectivement de 5.564 m, 4.836 m, 3.775 m et 2.942 m. Ces niveaux correspondent à des récurrences en étiage de 4.3, 4.2, 10.5 et 6.7 ans respectivement. Ces périodes de récurrence devraient normalement être similaires ce qui n'est pas le cas. Il est possible que cette observation soit liée à l'effet des reversoirs dont l'efficacité est supérieure à bas niveau. L'effet de refoulement des reversoirs est plus fort à Sorel qu'au port de Montréal et la différence d'effet entre les deux points devrait être plus grande en période d'étiage. Nonobstant la cause de cette différence, il est important de noter que l'utilisation du zéro des cartes comme datum pour des études sur l'impact des niveaux d'eau n'est pas appropriée, ce datum n'étant pas homogène sur le plan spatial (i.e. le zéro des cartes ne correspond pas à une période de récurrence fixe sur le plan longitudinal). L'utilisation du niveau moyen des mers (NNM, datum géodésique) ou du IGLD-85 comme référence est recommandée.

7.5.1.3 *Sur les récurrences calculées*

Les périodes de récurrence et les débit de référence des scénario ont été calculées à l'aide de la série post-1960, soit la période post-régularisation. La Figure 30 montre les courbes de récurrence calculées pour les séries pré et post-régularisation à Sorel. L'effet de la régularisation a été de réduire la variabilité au sein des extrêmes annuels et donc de la pente de la courbe du débit en fonction de la période de récurrence. Le point de rencontre des deux courbes correspond à un débit de 17 700 m³/s et une récurrence approximative de 20 ans. Les débits de crue de période inférieure à 20 ans sont plus élevés post-régularisation alors que ceux de période supérieure à 20 ans sont plus faibles avec la régularisation.

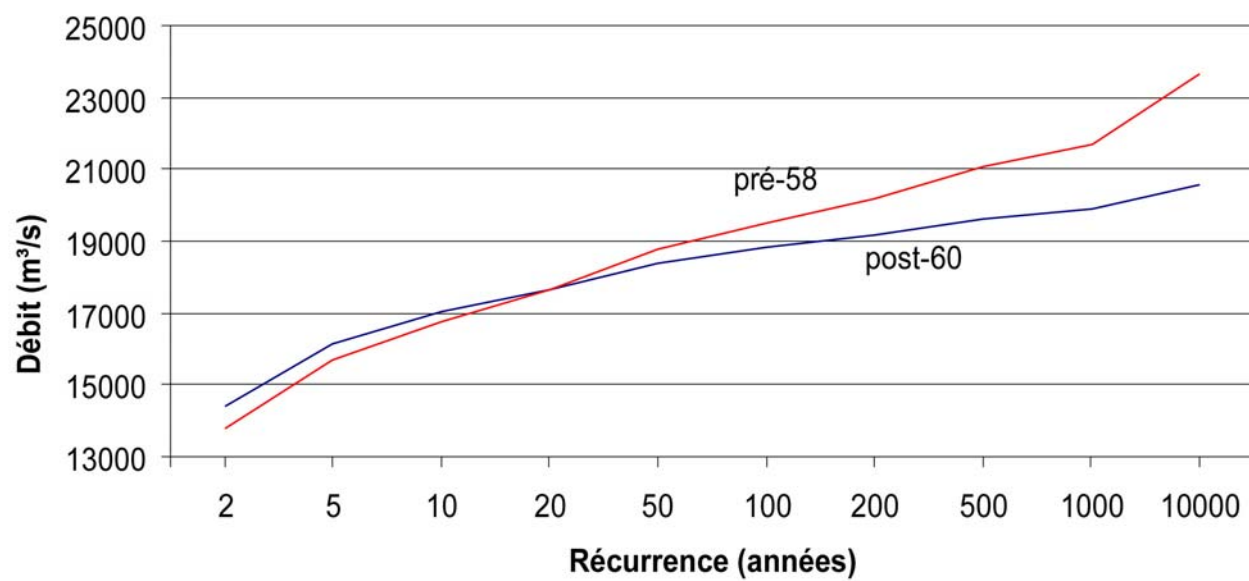


Figure 30 : Relations entre les débits et leur récurrence selon les séries post et pré régularisation à Sorel.

8 Conclusions

Les bases à la modélisation présentées dans ce rapport synthétisent les informations essentielles à la modélisation des facteurs abiotiques pour le tronçon Montréal/Trois-Rivières qui serviront, à leur tour, à la modélisation de plusieurs compartiments du vivant. Le tronçon a été analysé en termes de l'évolution des ouvrages, du niveau d'eau, du débit et du climat, afin de produire des scénarios de référence. En détail les activités réalisées sont :

- Séquence préliminaire des interventions dans le fleuve et historique des reversoirs
- Reconstitution des débits du fleuve entre Sorel et Trois-Rivières
- Analyse des fluctuations et de la régularisation des débits
- Analyse de niveaux d'eau du fleuve
- Analyse des vents du secteur
- Analyse des températures de l'air
- Période de récurrence des débits
- Production des scénarios de référence et des conditions limites en débits et en niveaux

Le travail accompli représente un point de départ pour plusieurs activités. Entre autres, l'effort de reconstitution des débits a été limité en amont par les rapides de Lachine et par les rivières des Prairies et des Mille-Iles. Une prochaine étape de ce travail serait de remonter aux sites des principaux intrants du fleuve Saint-Laurent soit Cornwall et Carillon. Au préalable, des relations niveau-débit fiables pour les chenaux de Saint-Anne et de Vaudreuil devront être développées. Ces relations serviront à reconstituer des séries de débits pour les structures hydrauliques de Beauharnois et de Carillon palliant ainsi au fait que les séries de débits disponibles à ces sites peuvent comporter des erreurs importantes (jusqu'à 10%).

L'évaluation de l'impact de la régularisation des Grands Lacs et du bassin de la rivière des Outaouais a mené à une découverte inattendue. En termes du débit à Sorel, la régularisation du bassin de la rivière des Outaouais a un impact important qui dépasse largement celle des Grands Lacs. Cette réalité devra donc être prise en compte dans de futures études sur le sujet.

La définition de scénarios de référence en niveau d'eau et en débit constitue un outil précieux pour les études portant sur l'impact des niveaux d'eau sur les divers compartiments du vivant dans l'écosystème du Saint-Laurent. En tout 13 scénarios ont été définis (8 au printemps et 5 en été) de

manière à couvrir l'ensemble des conditions hydrodynamiques probables. Pour chaque scénario, des simulations hydrodynamiques seront réalisées et les résultats combinés avec des informations et modèles du vivant constituant ainsi un système d'aide à la décision intégré. En termes de développements futurs, on peut certainement penser à l'intégration des saisons automnales et hivernales car à l'heure actuelle, la question de la glace n'est pas abordée en raison de sa complexité et du fait qu'en hiver, une bonne partie du vivant est en dormance.

9 Remerciements

Nous tenons à remercier les personnes suivantes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du travail : Daniel Rioux pour l'analyse des données de température ; Marc Mingelbier pour l'obtention de données hydrologiques issues des banques du Ministère de l'Environnement du Québec ; Guy Morin pour son aide dans l'obtention de rapports historiques traitant de l'hydrologie du secteur ; Dany Faucher pour ses conseils sur les aspects statistiques de l'analyse de récurrence ; Michel Slivitsky pour ses conseils relatifs à plusieurs aspects du présent document ; Adrien Julien qui a fourni les données climatologiques utilisées ici.

10 Références

- Benson, M.A. (1968). *Uniform flood-frequency estimating methods for federal agencies*. Wat. Res. Res. 4(5) :891-908.
- Bobée, B. et F. Ashkar. (1991). *The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 203p.
- Bouchard, A. et J. Morin. (2000). *Reconstitution des débits du fleuve Saint-Laurent entre 1932 et 1998*. Environnement Canada, Service Météorologique du Canada, Monitoring et Technologies, Section Hydrologie, 71p.
- Bourgault, D., Koutitonsky, V.G. (1999). *Real-Time Monitoring of the Freshwater Discharge at the Head of the St. Lawrence Estuary*. Article soumis à Atmosphere-Ocean.
- Briand, J. (1963). *Survey of Sorel Weirs*. Department of Transport, St. Lawrence Ship Channel Division, Hydraulics Section.
- Carrier, Y. (1976). *Reconstitution des débits du fleuve Saint-Laurent*. Ministère des Richesses Naturelles, Service de l'hydrométrie, Division de la diffusion de l'information hydrologique, 7p., 2 annexes.
- CDMF (Canada Dept. of Marine and Fisheries) (1915). *Investigation of water levels, River St. Lawrence between Montreal and Lake St. Peter*. Ottawa, 15p.
- CTRO (Comité technique de la rivière Outaouais) (1965). *Rapport sur l'hydrologie et la régularisation de la rivière Outaouais*. Annexe 2 : Études de régularisation.
- Corley, N. (1961). *The St. Lawrence Ship Channel, 1805-1865*. Cahiers de géographie de Québec, 8 :277-306.
- Dryade (1981). *Habitats propices aux oiseaux migrants. Analyse des pertes de végétations riveraines le long du Saint-Laurent*. Annexe No. 6 au rapport final du comité d'étude sur le fleuve Saint-Laurent, Ministère de l'Environnement du Québec et Ministère de l'Environnement du Canada, 177 p.
- Dumont, S. (1996). *Étude de l'impact des revoirs de Sorel sur l'écoulement et les niveaux d'eau dans le tronçon Montréal-Sorel du fleuve Saint-Laurent*. Pêches et Océans Canada, Garde Côtière, Région Laurentienne, 9 pp. et annexes.
- Forrester, W.D. (1983). *Manuel canadien des marées*. Ministère des Pêches et des Océans, Service hydrographique du Canada, Ottawa, Ontario.
- Hoang, V.D. (1980). *Sommation des débits journaliers dans la région de Montréal et l'analyse statistique des débits maximaux journaliers consécutifs*. Ministère des Richesses Naturelles, Service de l'Hydrométrie, 16p.
- INRS-Eau (1990). *Modélisation hydrodynamique des écoulements en eau libre du tronçon Tracy-Lac Saint-Pierre*. INRS-Eau, Rapport RS-317a.
- Lapointe, M.F. (1994). *L'Évolution du lit du Saint-Laurent dans le secteur de Contrecoeur (Québec) depuis un siècle*. Géographie Physique et Quaternaire, 48: 39-50.

- Lassère, J.C. (1971). *Le Saint-Laurent, une voie d'eau exceptionnelle*. Information géographique, 35 :109-119.
- LHL (Laboratoire Hydraulique Lasalle) (1989). *Évaluation des revoirs de Sorel : Observations, relevés bathymétriques et modélisation numérique*. LHL-1018, Travaux publique Canada.
- Morin, J. and Leclerc, M. (1998). *From pristine to present state : hydrology evolution of Lake Saint-François, St.Lawrence River*. Canadian Journal of Civil Engineering, 25:864-879.
- Morse, B. (1990). *St-Lawrence River Water-Levels Study : Application of the One-D Hydrodynamic Model*. Transport Canada, Waterways Development Division, Canadian Coast Guard.
- Pasin, A. (1979). *Historique des revoirs des Îles de Sorel*. Garde Côtière Canadienne. Rapport V2-213, 23 pp.
- Perreault, L., Bobée, B., et P. Legendre. (1994). *Rapport Général du Logiciel AJUSTE-II : Théorie et Application*. Institut National de la Recherche Scientifique pour le Projet de partenariat Hydro-Québec/CRSNG – Modélisation des événements hydrologiques extrêmes à partir de lois statistiques, 92p.
- Robitaille, J.A., Y. Vigneault, G. Shooner, C. Pomerleau et Y. Maillot. (1988). *Modifications physiques de l'habitat du poisson dans le Saint-Laurent de 1945 à 1984 et effet sur les pêches commerciales*. Rapport tech. can. sci. halieut. aquati. 1608 : v + 45p.
- Sandwell, B.K. (1930). *The Saint-Lawrence Waterway*. Can. Geographic, 7 : 619-634.
- WRB (Water ressources Branch) (1961). *Hydrological investigations of the Ottawa River Basin, Appendix 3 : Stage discharge and water level relationships in the Lower Ottawa River*. Ottawa, June 1961.
- WRC (1967, 1975, 1976, 1977, 1981). *Guidelines for determining flood flow frequency*. US Water Resources Council Hydrology Committee, Washington, D.C. Revised versions : bulletin 15(1975) – 17(1976) – 17A(1977) – 17B(1981).