

Université du Québec
INRS-ETE

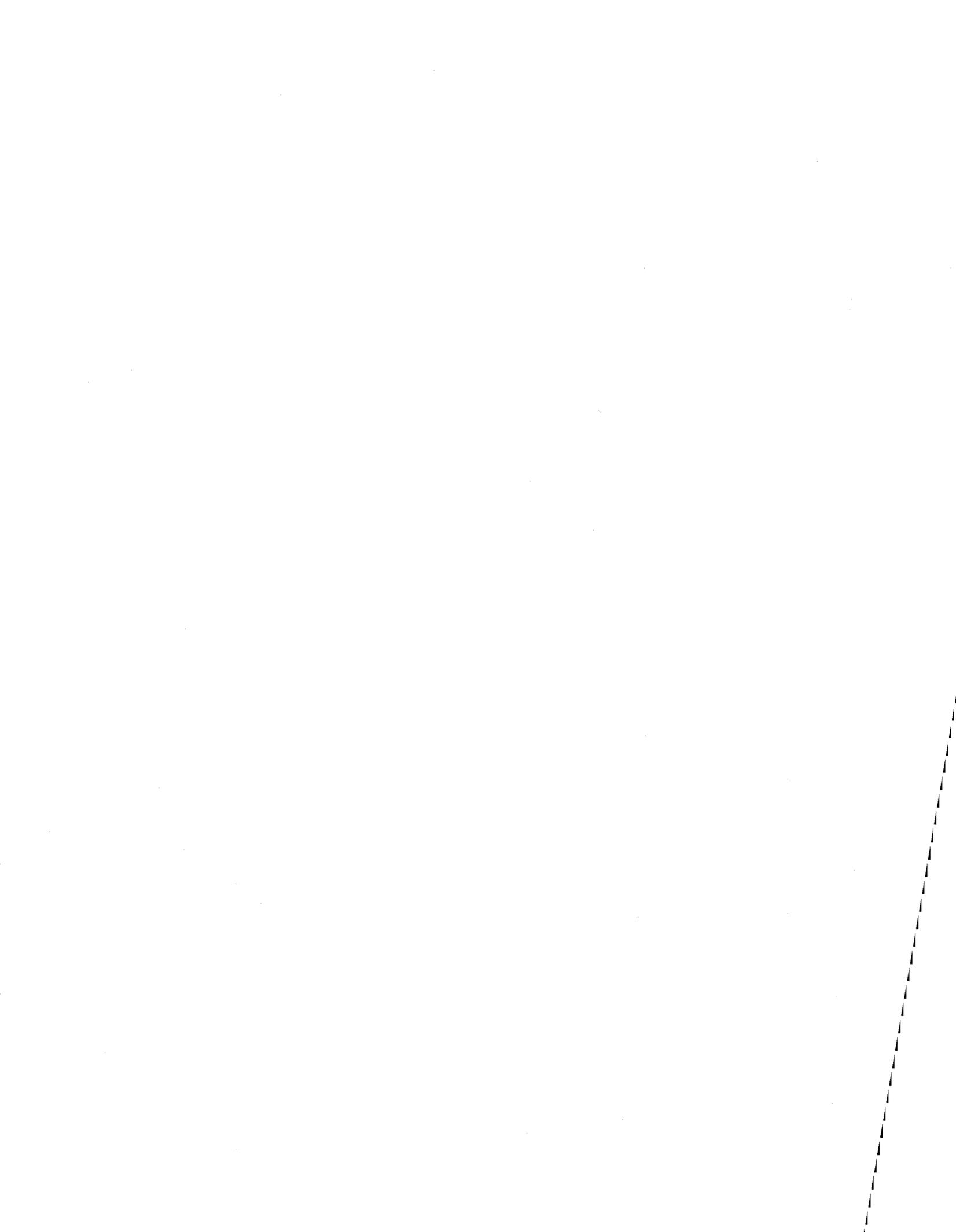
**Développement d'une procédure de mise en place
d'un modèle hydrologique global sur des bassins
jaugés et non jaugés : application du modèle MOHYSE
au Québec**

Par
THOMAS-CHARLES FORTIER FILION

Mémoire présenté
pour l'obtention
du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)
en maîtrise en sciences de l'eau

Examineurs

Directrice de recherche	Anne-Catherine Favre, INRS-ETE
Codirecteur de recherche	Richard Turcotte, CEHQ
Examineur interne	Alain Rousseau, INRS-ETE
Examineur externe	Jocelyn Gaudet, IREQ



Résumé

Ce mémoire a permis de développer une procédure afin de rapidement mettre en place un modèle hydrométéorologique global et conceptuel, **MOHYSE**. Cette méthode permet non seulement de répondre à des besoins de simulations sur des bassins jaugés, mais aussi sur des bassins non jaugés. Dans le cadre de ce projet, le modèle a été déployé sur 46 bassins versants du sud du Québec avec un critère de Nash-Sutcliffe médian de 0,62 en validation. Ces résultats ont été obtenus suite au développement d'une méthode novatrice de correction en continu des équivalents en eau de la neige au sol basées sur des mesures bimensuelles.

En plus des techniques traditionnelles de calage, une technique visant à produire un jeu de coefficients global, applicable sur tout le territoire étudié, a aussi été utilisée. Cette technique a permis l'obtention d'un critère de Nash-Sutcliffe médian de 0,49 en validation. Bien que cette technique ait répondu aux attentes et permette la simulation des débits sur des sites non jaugés, une interpolation a par la suite été effectuée. Ainsi, la qualité des simulations obtenues avec le jeu global a pu être améliorée à l'aide du krigeage simple d'un des paramètres du modèle. Il devenait donc possible de spatialiser le jeu global en fonction de l'emplacement géographique du bassin à l'étude. Cette technique, bien que simple, a permis l'obtention d'un critère de Nash-Sutcliffe médian de 0,57 en validation.

Avant-propos

Avant de débiter, j'aimerais en profiter pour remercier tous ceux qui m'ont soutenu dans ce projet. Merci tout d'abord à Anne-Catherine Favre, ma directrice de recherche, à Richard Turcotte, mon superviseur au Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) ainsi qu'à Mériem Saïd. Par vos conseils avisés et vos idées, vous avez su m'orienter tout au long de ce projet en me permettant néanmoins de l'explorer en toute liberté et vous m'avez toujours soutenu dans mes projets, qu'ils soient scolaires, professionnels ou personnels. Il m'apparaît aussi important de remercier Alain Rousseau et Jocelyn Gaudet qui, par leur lecture attentive, leurs commentaires et suggestions, ont permis de bonifier et préciser le contenu final de mon mémoire.

Au CEHQ toujours, je tiens à aussi remercier toute l'équipe de l'hydrométéorologie et plus particulièrement Pierre Lacombe, sans qui certaines des étapes réalisées n'auraient probablement pas été possibles, ainsi que l'équipe de géomatique pour les nombreuses demandes d'extractions de données et de cartes.

Je tiens aussi à remercier l'équipe de Vazken Andréassian et Charles Perrin du CEMAGREF d'Anthony en France, leurs conseils et leur savoir en hydrologie, qu'elle soit sociale ou appliquée, m'ont été et me seront certainement d'une grande utilité.

Finalement, un merci spécial à mes collègues, mes amis, ma famille, ma conjointe et mon fils pour tout le soutien et les heureux moments du quotidien de ces trois dernières années.

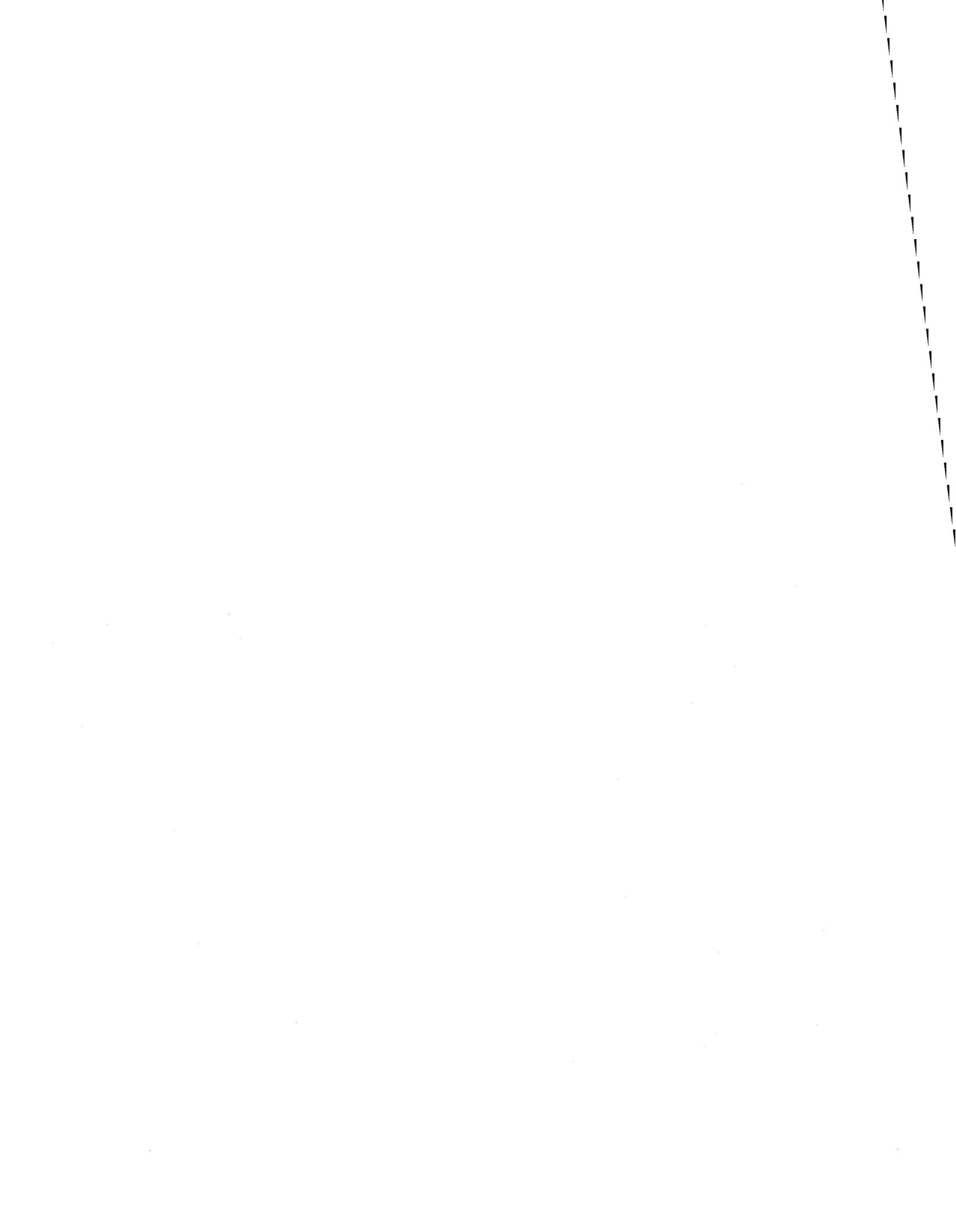


Table des matières

Résumé	iii
Remerciements	v
Table des matières	viii
Liste des tableaux	ix
Liste des figures	xi
Définition des sigles utilisés	xiii
1 Problématique	1
2 Revue de la littérature	5
2.1 Outils de prévision hydrologique	5
2.2 Modèles simples	8
2.3 Méthodes d'optimisation	9
2.4 Bassins non jaugés	11
3 Méthode	13
3.1 Choix du domaine d'application	13
3.1.1 Critères hydrométriques	13
3.1.2 Critères météorologiques	14
3.1.3 Caractéristiques des bassins retenus	15
3.2 Choix du modèle	17
3.2.1 Description de MOHYSE	17
3.3 Choix de la méthode d'optimisation	20
3.4 Estimation des paramètres aux sites jaugés	22
3.4.1 Choix de la fonction objectif	22
3.4.2 Choix du jeu de paramètres optimal	23
3.4.3 Calage de tous les paramètres	24
3.4.4 Calage des paramètres de bilan vertical et d'écoulement	24
3.5 Amélioration de la gestion du couvert nival	26

3.5.1	Description des apports verticaux	26
3.5.2	Problèmes liés à l'utilisation des apports verticaux	27
3.5.3	Approche de correction développée	28
3.5.4	Nomenclature des calages locaux	32
3.6	Identification des paramètres aux sites non jaugés	33
3.6.1	Création d'un jeu de paramètres global	33
3.6.2	Choix de la fonction objectif	34
3.6.3	Calage des paramètres de bilan vertical	35
3.6.4	Détermination théorique des paramètres d'écoulement	35
3.6.5	Interpolation géostatistique par krigeage d'un paramètre de bilan vertical	36
4	Résultats et discussion	39
4.1	Validation météorologique	40
4.2	Amélioration de la gestion du couvert nival	40
4.3	Résultats aux sites jaugés	42
4.4	Résultats aux sites non jaugés	43
4.4.1	Détermination théorique des paramètres d'écoulement	44
4.4.2	Calage « global »	44
4.4.3	Calage « global P locaux »	46
4.4.4	Résultats d'interpolation par krigeage	46
5	Conclusions et perspectives	51
	Bibliographie	59
A	Codes pour executer MOHYSE	61
A.1	Codes PB locaux	61
A.2	Codes AV locaux	64
A.3	Codes PB globaux	67
A.4	Codes AV globaux	69
B	Résultats exhaustifs	73
C	Simulations hydrologiques	81
D	Validation météorologique	99
E	Cartes C_{Etp}	117

Liste des tableaux

3.1	Paramètres du modèle MOHYSE	19
3.2	Types de calages locaux	32
3.3	Nomenclature en fonction du type de calage	37
4.1	NS obtenus suivant les calages « locaux »	43
4.2	Comparaison des NS « global » – « locaux »	45
4.3	Comparaison des différents NS « global P locaux »	47
4.4	Comparaison des différents NS avec « global C_{Etp} interpolé »	49
4.5	Paramètres globaux sur le sud du Québec du modèle MOHYSE	49
B.1	Caractéristiques des bassins sélectionnés	74
B.2	Temps de montée définis par la formule de Watt et Chow (1985)	75
B.3	Résultats (NS) « locaux » exhaustifs	76
B.4	Résultats (NS) « globaux » exhaustifs	77
B.5	Résultats (NS) « global P local » exhaustifs obtenus en calage (Nov. 2000 – Nov. 2004)	78
B.6	Résultats (NS) « global P local » exhaustifs obtenus en vérification (Nov. 2004 – Nov. 2008)	79
B.7	Résultats (NS) « global C_{Etp} interpolé » exhaustifs	80

Liste des figures

3.1	Zoom sur la partie Sud du Québec illustrant la couverture géographique des stations météorologiques	15
3.2	Zoom sur le Sud du Québec illustrant la couverture géographique des bassins versants sélectionnés	16
3.3	Classement de MOHYSE par rapport à 16 autres modèles en fonction du centile sur 1061 bassins	18
3.4	Schéma de production de MOHYSE	19
3.5	Illustration du fonctionnement de SCE-UA en quatre étapes	20
3.6	Exemple d'évolution de l'EEN selon la méthode de correction ponctuelle	31
3.7	Exemple d'évolution de l'EEN selon la méthode de correction en continu	31
4.1	Exemple de correction ponctuelle de l'équivalent en eau	41
4.2	Exemple de correction continue de l'équivalent en eau	41
4.3	Illustration de l'effet du coefficient de décrue.	45
4.4	Variogramme exponentiel anisotropique ajusté par <i>ArcGIS</i>	48
4.5	Résultats du krigeage ordinaire pour le paramètre C_{Etp}	48
C.1	Hydrogrammes simulés et observés pour la période de calage sur chacun des bassins	89
C.2	Hydrogrammes simulés et observés pour la période de validation sur chacun des bassins	97
D.1	Figures présentant la validation des précipitations	107
D.2	Figures présentant la validation des températures	115
E.1	Carte permettant d'identifier le coefficient C_{Etp} à l'intérieur de la fenêtre définie par les coordonnées suivantes : [80° O - 49° N] à [70° O - 55° N]	118
E.2	Carte permettant d'identifier le coefficient C_{Etp} à l'intérieur de la fenêtre définie par les coordonnées suivantes : [70° O - 49° N] à [60° O - 55° N]	119
E.3	Carte permettant d'identifier le coefficient C_{Etp} à l'intérieur de la fenêtre définie par les coordonnées suivantes : [80° O - 43° N] à [70° O - 49° N]	120
E.4	Carte permettant d'identifier le coefficient C_{Etp} à l'intérieur de la fenêtre définie par les coordonnées suivantes : [70° O - 43° N] à [60° O - 49° N]	121



Définition des sigles utilisés

AISH : Association Internationale des Sciences Hydrologiques ;

AV : Apports verticaux ;

AVC : Apports verticaux corrigés en continu ;

AVP : Apports verticaux corrigés ponctuellement ;

BNJ : Bassins non jaugés ;

CEHQ : Centre d'expertise hydrique du Québec ;

EEN : Équivalent en eau de la neige au sol ;

HU : Hydrogramme unitaire ;

PB : Précipitations brutes ;

NS : Critère de Nash-Sutcliffe ;

PDT : Pas de temps ;

WMO : *World Meteorological Organisation.*

Chapitre 1

Problématique

La prévision et l'adaptation aux crues à l'aide de modèles hydrologiques revêtent une importance capitale afin d'assurer une gestion sécuritaire et efficace des eaux (Campbell et Bates, 2001). Au Québec, ce phénomène est d'autant plus important que durant l'hiver, de grandes quantités de neige s'accumulent au sol et participent ensuite à la crue printanière des rivières, donnant une ampleur considérable aux crues (Turcotte *et al.*, 2007). Il est donc primordial d'être en mesure d'évaluer correctement les quantités d'équivalents en eau de la neige au sol tout au long de l'hiver, afin, le printemps venu, d'être en mesure de fournir une évaluation adéquate de l'importance qu'auront les crues.

Le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) possède comme mandat de gérer le domaine hydrique du Québec (CEHQ, 2001). Pour mener à bien cette gestion, le modèle HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001) est présentement implanté pour une quarantaine de sites. Il est utilisé au CEHQ afin de fournir des données en temps réel, au pas de temps de 3 h, et ainsi permettre une meilleure prévision en cas d'événements météorologiques d'envergure (Turcotte *et al.*, 2004). En raison de sa complexité, le modèle HYDROTEL ne peut cependant pas être mis rapidement en place sur un nouveau bassin versant, ce qui peut s'avérer nécessaire en cas d'événements importants et soudains. De plus, il s'agit d'un modèle distribué pour lequel beaucoup d'informations sur le bassin versant sont nécessaires, données qui peuvent être longues et fastidieuses à obtenir. Avec un modèle hydrologique plus simple que le modèle HYDROTEL à mettre en place, le CEHQ souhaiterait en cas d'urgence avoir la possibilité de simuler rapidement des débits sur les bassins versants de la partie sud du Québec. En effet, il arrive parfois qu'une demande urgente d'estimation de débit survienne alors qu'aucun modèle, voire aucune station de mesure, n'est en place sur le bassin d'intérêt. Lorsqu'aucune station n'est présente sur le bassin, nous sommes en situation de prévision sur un bassin non jaugé. Cette volonté d'obtenir des prévisions de qualité sur des bassins non jaugés n'est pas unique à ce projet

et ces enjeux et obstacles sont d'ailleurs les points d'ancrage du programme décennal (2003 – 2012) de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (AISH) tel que présenté par Sivapalan *et al.* (2003).

L'objectif de ce mémoire s'inscrit donc dans ce besoin du CEHQ et consiste à développer une procédure de mise en place d'un modèle simple pour la prévision hydrologique sur des bassins jaugés et non jaugés du sud du Québec.

Il existe plusieurs modèles hydrologiques, qui peuvent généralement être divisés en deux grandes catégories : les modèles conceptuels et les modèles à base physique (Ancil *et al.*, 2005). Ces dernières années, plusieurs recherches s'orientent vers les modèles simples offrant une rapidité et une facilité de calage accrue (Bárdossy et He, 2006). Les paramètres de ces modèles, pour être efficaces, ont avantage à être calés localement sur le bassin versant où ils seront utilisés afin de fournir de bons résultats. Comme le calage nécessite une station de mesure de débits, les sites où il est possible de caler ces modèles sont restreints. En plus d'obtenir la possibilité de rapidement déployer un modèle sur les bassins jaugés, l'objectif de ce mémoire consiste aussi à obtenir une technique pour transposer les paramètres de bassins jaugés vers les bassins non jaugés. En effet, il est fréquent que des demandes soient faites au CEHQ dans le but d'estimer rapidement le débit à un site où aucune station de débit n'est en fonction. Une technique fréquemment utilisée est d'effectuer une transformation des paramètres par régression linéaire en fonction des caractéristiques physiographiques des bassins. Cette technique n'est cependant pas toujours judicieuse, car il est parfois difficile d'obtenir ces paramètres physiographiques de façon précise (Hundecha *et al.*, 2008).

Dans le présent projet, trois techniques seront envisagées. Premièrement, puisque la neige revêt une importance considérable lors des crues printanières et que sa modélisation n'a pas à être spécifique pour chaque bassin versant, ce qui en facilite la régionalisation, une nouvelle technique correctrice s'ajoutant à la méthode de simulation opérationnelle de la neige au Québec présentée par Turcotte *et al.* (2007) sera développée afin de permettre de meilleures simulations. Cette nouvelle technique présentée à la section 3.5.3 vise à corriger l'équivalent en eau de la neige en fonction des relevés terrains de façon continue entre deux mesures. La deuxième technique envisagée est d'obtenir un ensemble de paramètres global sur la totalité du territoire couvert par l'étude. Finalement, une technique semi-globale, c'est-à-dire basée sur l'ensemble global avec la régionalisation d'un des paramètres en fonction de l'emplacement géographique du bassin cible, sera aussi développée.

Pour remplir ces objectifs, le modèle hydrologique simple MOHYSE (Fortin *et al.*, 2011) sera utilisé. MOHYSE, qui signifie « MOdèle HYdrologique Simplifié à l'Extrême »,

possède l'avantage de pouvoir être très facilement mis en place sur un nouveau bassin. Cette facilité est due au fait que MOHYSE est un modèle ne nécessitant que très peu d'informations physiques sur le bassin versant et présentant un temps de calage très court. Cette rapidité de calage s'explique notamment par le fait que c'est un modèle global, ne comportant que dix paramètres. Dans le présent travail, le modèle sera calé sur un ensemble de bassins localisés dans chacune des régions constituant la zone d'intérêt souhaitée.

Afin de présenter de façon claire et synthétique le travail accompli, ce mémoire sera divisé en trois chapitres principaux. Premièrement, le chapitre 2 sera consacré à une revue de la littérature concernant les principaux sujets traités dans ce mémoire. Ensuite, la méthode employée au cours de ce projet sera exposée en détail au chapitre 3. Finalement, le chapitre 4 permettra de présenter et d'analyser les résultats ainsi que les différentes applications possibles en regard aux objectifs proposés.

Chapitre 2

Revue de la littérature

La prévision hydrologique constitue une tâche essentielle pour un bon nombre d'applications ; elle est utilisée notamment pour l'adaptation aux crues, pour la gestion et la conception des barrages ou encore, pour le suivi des étiages. Pour présenter un aperçu des principales approches sur le sujet, nous nous emploierons à recenser les études existantes, que nous diviserons en quatre sujets principaux. Premièrement, la vaste gamme d'outils de prévision hydrologique disponible sera présentée de façon générale. Ensuite, au sein de ces différents outils, l'emphase sera mise sur les modèles simples, puisque comme il a déjà été mentionné, c'est le type d'outils qui sera privilégié dans ce mémoire. Nous présenterons ensuite les possibilités d'optimisations qui s'offrent à nous. Finalement, les différentes options possibles pour fournir une prévision hydrologique sur des bassins versants non jaugés seront traitées.

2.1 Outils de prévision hydrologique

Afin d'effectuer une prévision hydrologique, le prévisionniste dispose de certains outils pouvant être très simples et demandant une quantité d'information limitée, ou, au contraire, être beaucoup plus sophistiqués et nécessiter une connaissance très détaillée des caractéristiques du bassin versant. L'utilisation d'un type ou d'un autre dépendra essentiellement des applications requises, ainsi que des informations et des ressources humaines et matérielles disponibles. Il est nécessaire de posséder au moins une source d'information pour faire de la prévision hydrologique : ce peut être le débit, utilisé dans un modèle dit débit-débit. Lorsqu'il est observé à une station amont, on utilisera un modèle de propagation tandis que s'il est disponible au point de prévision, on peut

utiliser des modèles de type ARMA ou de réseau de neurones artificiels basés sur des fonctions aléatoires (Bras et Rodriguez-Iturbe, 1985). La deuxième source d'information possible est la météorologie qui, elle, sera utilisée par un modèle hydro-météorologique souvent nommé pluie-débit ou, dans un contexte où il y a présence de neige, météo-débit. Ce second type de modèles sera mis en relief et étudié dans le cadre du présent projet.

Il existe plusieurs catégories de modèles hydrologiques et, pour une même application, le prévisionniste peut choisir parmi une variété de modèles disponibles. Fortin *et al.* (1997) fournissent une classification détaillée des différents types d'outils disponibles pour les prévisionnistes. On distinguera notamment les modèles conceptuels et les modèles empiriques. Les modèles conceptuels constituent une « *représentation mathématique simplifiée [...] du cycle hydrologique par un ensemble de concepts [...] reliés entre eux dans des séquences temporelle[s] et spatiale[s] correspondant à celles que l'on observe dans la nature* » (Glossaire international d'hydrologie). Les modèles empiriques sont plutôt considérés comme des boîtes noires (Clarke, 1973) : peu importe de savoir ce qui se passe au sein de ces modèles, pourvu que la sortie donne une information cohérente avec les valeurs observées. Les paramètres ne possèdent donc pratiquement pas de sens physique, car ils n'essaient pas de reproduire des processus réels, mais simplement de trouver une relation mathématique entre l'entrée et la sortie (Linsley, 1982). Puisque les modèles conceptuels tentent au contraire de représenter les divers processus hydrologiques tels que le ruissellement, l'infiltration et l'évapotranspiration, ils sont généralement intéressants pour les prévisionnistes opérationnels (Mein et Brown, 1978).

Dans la présente étude, l'intérêt se porte sur les modèles conceptuels, qui peuvent eux aussi être subdivisés en deux grandes catégories : les modèles distribués et les modèles globaux. On peut différencier ces deux types simplement par le fait que pour un modèle distribué, les processus hydrologiques varient spatialement au sein du bassin versant, tandis que les modèles globaux ne prennent en compte aucune variation spatiale (Chow *et al.*, 1988). Les modèles distribués ont été développés plus récemment, car pour des raisons pratiques de temps de calcul, les modèles traditionnellement utilisés à des fins prévisionnelles étaient globaux. Les modèles distribués ont donc profité du développement informatique rapide qui a permis de réduire considérablement les temps de calcul créant ainsi un intérêt pour des modèles distribués plus complexes (Smith *et al.*, 2004). En effet, il devenait alors possible d'intégrer une très grande quantité d'informations et ainsi modéliser de façon plus réaliste les équations physiques du bassin versant. Cependant, malgré toutes ces possibilités, un fort intérêt demeure pour les modèles simples étant donné leur utilisation facilitée par le peu de données nécessaires et leur niveau de performance satisfaisant (Perrin *et al.*, 2001). D'ailleurs, lors d'une étude comparative ayant pour objectif de rendre opérationnels des modèles distribués, Reed

et al. (2004) montrent qu'un modèle global parvient plus fréquemment à de meilleurs résultats que les modèles distribués. Un avantage certain des modèles globaux vient aussi du fait qu'au lieu d'utiliser les capacités informatiques afin de complexifier le modèle et d'effectuer les calculs nécessaires à de nombreux points sur le bassin versant, il est possible d'employer ces ressources pour modéliser un échantillon plus important de bassins versants. On constate en effet que les études présentant un très grand nombre de bassins sont souvent réalisées à l'aide de modèles globaux (Sefton et Howarth, 1998; Perrin *et al.*, 2001; Merz et Blöschl, 2004; Oudin *et al.*, 2008; Berthet *et al.*, 2009).

Une dernière distinction possible, permettant de différencier les modèles, qu'ils soient de nature conceptuelle ou empirique ou encore de nature globale ou distribuée, vient de la façon dont le modèle est initialisé. Nous distinguerons en effet les modèles événementiels des modèles continus. Les modèles événementiels doivent être initialisés avec les meilleures conditions initiales possibles pour bien simuler le débit d'un événement donné (Goodrich *et al.*, 1994). Cette initialisation peut être effectuée soit à partir de valeurs mesurées directement sur le bassin versant, soit estimées par le prévisionniste ou encore déterminées à partir de tables de références en fonction de l'état du bassin. Le modèle fonctionnant en continu nécessite pour sa part un certain temps, que l'on nomme le temps de chauffe du modèle, afin que les valeurs initiales n'aient plus d'impact sur la simulation. Par la suite, les états sont considérés comme étant des variables internes. Le temps d'initialisation d'un modèle continu varie d'un modèle à un autre, mais peut être facilement déterminé de façon empirique. Si les données le permettent, les hydrologues s'entendent souvent pour une initialisation standard d'un an.

Puisqu'ils ne tiennent pas compte de tous les processus que l'on retrouve dans les modèles continus, les modèles événementiels ont tendance à être plus simples et moins demandant en données d'entrée (Berthet *et al.*, 2009). Ils sont donc souvent favorisés par les prévisionnistes pour les applications opérationnelles en prévision temps réel (Lamb et Kay, 2004). Cependant, comme l'ont démontré Zehe et Blöschl (2004), une légère incertitude sur les conditions initiales peut donner des résultats très différents, rendant ainsi les prévisions effectuées par des modèles événementiels moins bonnes que celles obtenues avec un modèle continu, la différence augmentant avec la période de chauffe du modèle (Berthet *et al.*, 2009).

En résumé, il a été vu qu'il existe divers outils pour faire de la prévision hydrologique, chacun présentant un ensemble d'avantages et de limites qui lui sont propres. Dans le présent mémoire, l'intérêt sera porté sur les modèles simples. Nous entendons par ce terme les modèles conceptuels et globaux tels que définis dans la comparaison de Sittner (1976).

2.2 Modèles simples

La comparaison effectuée par Sittner (1976) constitue l'une des premières études en matière d'hydrologie opérationnelle. Ses travaux ont permis de faire la comparaison de 10 modèles issus de pays différents tous utilisables en hydrologie opérationnelle et d'ainsi orienter le développement de ces modèles. Malheureusement, aucune des solutions prises en compte à l'époque ne comportait d'algorithme d'accumulation et de fonte de l'équivalent en eau de la neige ; cette lacune est importante, car la modélisation de la neige constitue évidemment un enjeu majeur dans une région comme le Québec. Bien que les limites informatiques aient été de nombreuses fois franchies depuis la parution du rapport de Sittner (1976), les modèles simples demeurent d'actualité. D'ailleurs, plusieurs études citées dans Perrin *et al.* (2001) montrent que de tels modèles réussissent à donner de bons résultats dans diverses applications en hydrologie telles que la prévention des crues, la gestion des barrages, etc.

Avec le temps, plusieurs modèles ont été développés et ont évolué tels que HBV (Bergström et Forsman, 1973), TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979), les modèles GR (Michel, 1983) pour n'en citer que quelques-uns. Cependant, les différents modèles pluie-débit utilisés en hydrologie possèdent un grand nombre de similitudes décrites par Moore *et al.* (2005) : la plupart des modèles sont de nature conceptuelle, respectent un bilan de masse et comportent trois processus principaux : le ruissellement de surface, l'écoulement sub-superficiel et l'écoulement de base. Pour une comparaison et une description détaillée des modèles globaux utilisables en hydrologie opérationnelle, le lecteur se référera à la thèse de Perrin (2000) dans laquelle on retrouve une synthèse de 35 modèles. Une autre comparaison de modèles, résumée par Smith *et al.* (2004), propose d'analyser les performances de 12 modèles distribués et de les comparer à celle d'un modèle global. Les conclusions de cette étude montrent que, contrairement à ce qui avait d'abord été émis comme hypothèse, le modèle global conceptuel s'avère être plus performant (Reed *et al.*, 2004).

Nous constatons donc qu'une grande variété de modèles est disponible, mais que peu d'entre eux sont à la fois globaux, utilisables en hydrologie opérationnelle et permettant la modélisation de la neige, trois caractéristiques primordiales pour la présente étude. Maintenant qu'un bref survol des modèles a été effectué, les techniques d'optimisation de ceux-ci sont présentées.

2.3 Méthodes d'optimisation

Lorsque l'on souhaite implanter un modèle hydrologique à grande échelle, il devient primordial de s'attarder sur la façon dont le calage sera effectué. En effet, bien que les capacités informatiques soient de nos jours un atout considérable dans le domaine des sciences appliquées, on peut vite se heurter aux limitations des ordinateurs. Ainsi, dans un projet où le nombre d'optimisations sera important, il est à la fois nécessaire d'avoir une méthode d'optimisation fiable et performante en fonction du modèle utilisé, et de réaliser celle-ci rapidement afin d'atteindre les objectifs poursuivis dans les délais impartis. Nous référons par ailleurs le lecteur à la synthèse exhaustive des méthodes d'optimisation proposée par Turcotte (2010), dont nous présentons ici les principaux éléments.

Les techniques de calage sont généralement divisées en deux grandes catégories : le calage manuel et le calage automatique (Duan, 2003). Le calage manuel est en quelque sorte une méthode par essais – erreurs. Le modélisateur utilise ses connaissances du modèle, des critères de performances mathématiques et des outils visuels tels que la comparaison d'hydrogrammes pour effectuer le calage (Duan, 2003). Cependant, le temps nécessaire à l'obtention d'un calage satisfaisant par cette technique et le fait que le modélisateur doit bien connaître la physique du modèle et sa structure interne font en sorte que la recherche s'est surtout orientée vers les méthodes de calage automatique (Boyle *et al.*, 2000). Dans le cadre de cette maîtrise, puisque de nombreux calages seront effectués, l'approche utilisée sera le calage automatique.

Il est possible de distinguer quatre types généraux d'estimation automatique de paramètres :

1. La recherche locale ;
2. Le parcours en entier du domaine ;
3. La recherche génétique ;
4. Une approche mixte.

La recherche locale procède en explorant le domaine à proximité d'un jeu de paramètres initial. Bien que peu coûteuse, cette méthode a le défaut d'être fortement dépendante du jeu initial impliquant ainsi des résultats peu satisfaisants (Turcotte, 2010).

Il est aussi possible de parcourir le domaine des paramètres en entier. Cette méthode est très efficace afin d'atteindre le minimum global, mais s'avère vite extrêmement coûteuse en temps de calcul. En effet, pour que cette méthode puisse s'appliquer, les

paramètres doivent être complètement indépendants les uns des autres ou être très peu nombreux. Effectivement, l'augmentation du temps de calcul sera linéaire en fonction du nombre de paramètres s'ils sont indépendants tandis qu'elle sera exponentielle s'ils sont dépendants.

La recherche génétique telle que présentée par Goldberg (1989) peut aussi être utilisée. Cependant, cette méthode comporte certains désavantages ; notamment, il est possible que l'évolution se dirige vers un point n'étant pas optimal si ce dernier est sur-représenté au sein de la population. De plus, le temps d'optimisation peut être très élevé (Poli *et al.*, 2008).

Certains auteurs ont donc tenté de s'inspirer des méthodes génétiques tout en palliant les problèmes inhérents à cette méthode. C'est notamment le cas de Duan *et al.* (1992) qui avec la méthode de SCE-UA, s'inspirent de l'évolution génétique, mais ajoutent la notion de mélange des différentes populations. Cette méthode permet donc d'éviter que la population ne converge vers un optimum non souhaité. Plusieurs études citées dans Vrugt *et al.* (2003) ont démontré que SCE-UA parvenait à trouver le minimum global, et ce, pour différents modèles hydrologiques. Nous expliquerons donc plus en détail cet algorithme lors de la présentation de la méthode.

2.4 Bassins non jaugés

Le but de ce mémoire consiste à développer une procédure de mise en place d'un modèle hydrologique global sur le sud du Québec, aussi bien pour les bassins jaugés que les bassins non jaugés (BNJ)¹. Une méthode applicable en hydrologie opérationnelle afin de fournir, au besoin, des prévisions en temps réel sur des bassins non jaugés devra donc être développée. Il convient de recenser ce que l'on retrouve dans la littérature à ce sujet.

Le Québec ne possédant qu'un nombre limité de bassins jaugés, il apparaît important de développer une méthode permettant la simulation de BNJ. Le problème principal lors de la modélisation des débits sur des BNJ vient du fait que l'absence de débits mesurés ne permet pas de caler les paramètres du modèle (Merz *et al.*, 2006). La modélisation d'un bassin versant par un modèle conceptuel utilisant des paramètres n'ayant pas été calés sur ce bassin contrevient en quelque sorte à la définition même d'un modèle conceptuel. Néanmoins, cela permet d'obtenir un minimum d'information (Bergström, 2006). Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour les BNJ. Bergström (2006) et Merz *et al.* (2006) en font une revue complète et détaillée. Les méthodes apparaissant les plus importantes seront mises en lumière dans les paragraphes suivants. Il faut cependant garder à l'esprit que les techniques de régionalisation sont souvent utilisées pour reconstituer les débits *a posteriori* tandis que dans le présent contexte, le principal objectif reste une prévision opérationnelle en temps réel.

Selon Bergström (2006), il existe trois façons de déterminer les paramètres d'un modèle sur un BNJ : la première consiste à utiliser les paramètres obtenus sur un autre bassin versant ; la deuxième vise à établir des relations entre les paramètres et les caractéristiques du bassin ; et la troisième méthode se base sur un modèle purement physique ne nécessitant pas de calage. Un modèle purement physique nécessitant une très grande quantité d'informations sur le bassin versant, cette troisième possibilité est exclue de notre étude. Merz *et al.* (2006) affirment que la régionalisation peut être fonction de la position géographique ou des caractéristiques du bassin versant. Ils concluent cependant en affirmant que les études développées ne permettent pas de trouver de relation satisfaisante entre les paramètres du modèle et les caractéristiques du bassin versant. Arheimer (2005) tire d'ailleurs des conclusions similaires et affirme aussi que l'utilisation des caractéristiques physiographiques en vue d'évaluer les paramètres d'un modèle (dans son cas le modèle HBV) n'est pas concluante.

1. Afin de faciliter la lecture, le sigle BNJ sera utilisé dans la suite de ce manuscrit pour désigner les bassins non jaugés.

Bergström (2006) montre aussi que les résultats sur les BNJ sont très dépendants de la qualité des données d'entrée puisqu'aucun calage ne permet de pallier la mauvaise qualité de données, donc de bonnes séries de données météorologiques permettent une simulation plus juste des débits sortants. D'autres auteurs supposent quant à eux que les paramètres du modèle sont en fait dépendants des caractéristiques physiques du bassin (Young, 2006). De plus, comme les modèles globaux considèrent en quelque sorte la moyenne de ces caractéristiques sur un vaste territoire (Beldring *et al.*, 2003), on peut supposer que cette moyenne ne varie pas nécessairement de façon brusque dans l'espace. La proximité géographique devient donc intéressante à explorer.

La recension des écrits à permis de constater que plusieurs essais ont été effectués pour exploiter la proximité géographique : soit d'utiliser les paramètres calés sur un bassin voisin, soit de caler sur une certaine région englobant le BNJ et ainsi obtenir des paramètres régionaux ou soit encore de mettre en oeuvre des méthodes géostatistiques afin de déduire les paramètres sur des BNJ, situés entre les bassins jaugés. Plusieurs auteurs (Vandewiele et Elias, 1995; Merz et Blöschl, 2004; Young, 2006) évoquent les problèmes pouvant survenir lorsque l'on tente de simuler en utilisant directement un jeu de paramètres calé non pas sur le bassin à l'étude mais sur un bassin voisin. Ces études concluent toutes que les performances sont meilleures lorsque l'on se base sur les paramètres issus du krigeage à moins d'être en mesure d'utiliser des paramètres résultant d'une moyenne entre ceux du bassin immédiatement à l'amont et ceux du bassin à l'aval du BNJ.

Maintenant qu'un bref survol de la littérature scientifique concernant les principaux aspects de ce mémoire a été effectué, la méthode choisie afin d'atteindre les objectifs fixés sera exposée en détail au chapitre 3.

Chapitre 3

Méthode

3.1 Choix du domaine d'application

Comme il a déjà été mentionné, le présent mémoire, en partenariat avec le CEHQ, vise à développer une procédure de mise en place d'un modèle hydrologique global sur des bassins jaugés et non jaugés. Étant donné la nature opérationnelle du sujet, il a été décidé que l'étude ne porterait pas seulement sur quelques bassins versants tests, mais bien sur tous les bassins possibles sous la responsabilité du Centre ; la zone d'étude souhaitée correspond donc à l'ensemble du Québec. Cependant, bien que la province compte plusieurs milliers de bassins versants, de nombreux facteurs limitent la possibilité de les inclure dans notre analyse. Dans le cadre de notre problématique, nous nous sommes basés sur des critères hydrométriques et météorologiques pour choisir les bassins formant notre échantillon.

3.1.1 Critères hydrométriques

La première catégorie de facteurs pouvant limiter le choix des bassins est constituée des critères de nature hydrométrique.

Pour qu'un bassin donné puisse être inclus dans l'étude, le débit à l'exutoire doit notamment avoir été mesuré de façon presque continue depuis novembre 2000, date à laquelle débute l'historique météorologique au pas de temps de trois heures du CEHQ. Cette condition est assez discriminante étant donné que le nombre de bassins versants possédant une station débitométrique est assez limité. De même, il faut aussi prendre en

compte le fait que la disponibilité des stations pour lesquelles les données sont accessibles au CEHQ n'est pas constante ; par exemple, certaines stations peuvent avoir été fermées de façon définitive ou durant une grande partie de la période d'étude. D'autres, au contraire, peuvent simplement être trop récentes pour disposer d'un historique fiable et utilisable. Un autre facteur hydrométrique discriminant provient du fait que le bassin ne doit pas être influencé, c'est-à-dire que l'écoulement doit être naturel. En effet, le modèle choisi, MOHYSE, n'a pas été conçu afin de modéliser un écoulement sortant d'un barrage ou laminé par un seuil. Enfin, un dernier facteur limitatif du point de vue hydrométrique peut être lié à l'emplacement géographique du bassin. Il arrive en effet qu'une station de jaugeage soit située en amont d'une autre, soit sur le même cours d'eau ou sur un tributaire. Les bassins versants n'étant pas indépendants, nous considérons que la qualité de modélisation résultant du calage en amont influencerait les données obtenues en aval ; nous n'incluons donc que la station en aval pour ne pas « dédoubler » nos résultats lorsque cette situation se présente. On choisit la station en aval afin de drainer le plus grand territoire possible. Les critères hydrométriques proposés s'appliquent seulement dans le cas de cette étude. Dans un contexte opérationnel, où la comparaison des résultats entre les bassins versants et l'analyse globale des critères sont moins cruciales, ces conditions peuvent évidemment être assouplies.

Lorsqu'aucun de ces critères limitatifs ne s'applique à un bassin versant, nous pouvons alors l'inclure dans l'échantillon à l'étude, à condition qu'il réponde aussi aux critères météorologiques décrits dans la section suivante.

3.1.2 Critères météorologiques

Contrairement aux facteurs hydrométriques, la nature discriminante météorologique ne relève pas de facteurs propres aux bassins, mais de l'origine des données. Pour bien comprendre ces limitations, il convient de présenter la façon dont les données sont traitées par le CEHQ. Le Centre dispose d'informations météorologiques issues d'un grand nombre de stations réparties sur l'ensemble du territoire québécois. Cependant, les données utilisables de façon opérationnelle doivent provenir de stations transmettant les mesures en temps réel à un pas de temps inférieur ou égal à 3h. Ces stations sont généralement situées dans les régions les plus densément peuplées du Québec. Par la suite, plutôt que d'utiliser les valeurs brutes de ces stations, les données de précipitations et de températures sont interpolées par krigeage simple avec respectivement un semi-variogramme sphérique de portée de 200km et un semi-variogramme de puissance de portée de 800km sur une grille allant de 43° à 55° et de -80° à -60° avec une valeur à chaque $0,1^\circ$. Les stations utilisées pour effectuer ce krigeage sont présentées à la figure 3.1. L'avantage d'utiliser un tel système de traitement de données réside dans le fait

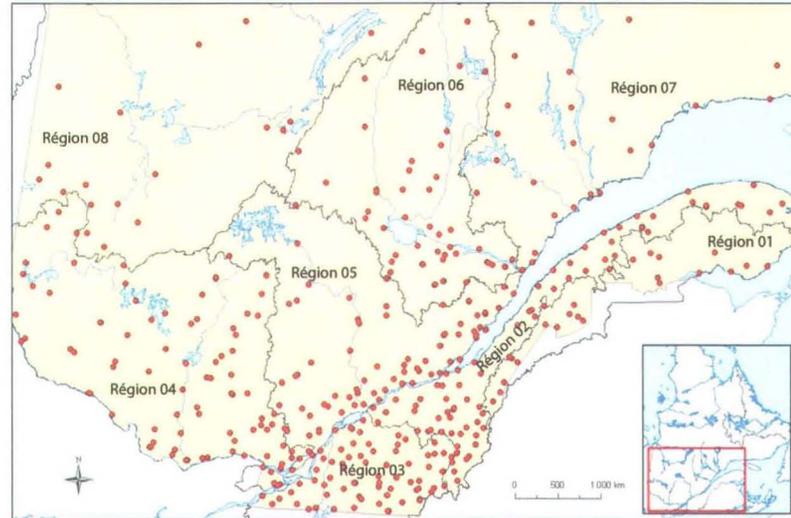


FIGURE 3.1 – Zoom sur la partie Sud du Québec illustrant la couverture géographique des stations météorologiques

qu'il permet de ne jamais obtenir de lacunes météorologiques sur la grille; en effet, puisque les différents modèles hydro-météorologiques implantés au CEHQ ne sont pas événementiels, mais fonctionnent en continu, des données météorologiques manquantes viendraient perturber le bon fonctionnement opérationnel de ces outils. Il faut cependant comprendre que même si les données météorologiques sont ainsi disponibles de façon uniforme sur la région couverte par le krigeage, la qualité de ces données varie en fonction de la densité de stations disponibles aux environs. Nous constatons que les régions hydrographiques 07 et 08 présentent une densité très faible de postes météorologiques conduisant donc à une variance du krigeage très élevée. Ces régions ont donc été exclues complètement dans la suite de cette étude. Tel que mentionné précédemment, ces données météorologiques interpolées débutent en novembre 2000; bien qu'il aurait pu être souhaitable d'avoir plus de huit ans d'historique, la nature opérationnelle du projet imposait le pas de temps de trois heures et une météorologie sans discontinuité.

Les critères de sélection ayant été énumérés, il est maintenant possible de présenter les bassins sélectionnés dans le cadre de cette maîtrise.

3.1.3 Caractéristiques des bassins retenus

Notre échantillon se compose de 46 bassins versants couvrant 22,6 % du territoire des régions hydrographiques 01 à 06 tel qu'illustré à la figure 3.2. Le tableau B.1 à l'annexe B présente les caractéristiques des différents bassins retenus. Voici un résumé

de notre échantillon.

- Nombre de bassins par région hydrographique :
 - Région 01 - Baie des Chaleurs et Percé : 3
 - Région 02 - Saint-Laurent sud-est : 12
 - Région 03 - Saint-Laurent sud-ouest : 7
 - Région 04 - Outaouais et Montréal : 6
 - Région 05 - Saint-Laurent nord-ouest : 8
 - Région 06 - Saguenay et lac Saint-Jean : 10

- Superficie :
 - Le plus petit : Morin - 022501 - 254 km²
 - Le plus grand : Ashuapmushuan - 061901 - 15300 km²
 - La superficie médiane : 1095 km²

- Emplacement géographique :
 - Le plus au Nord : Mistassini - 062102 - (-72,74 ; 49,85)
 - Le plus au Sud : Châteauguay - 030905 - (-73,89 ; 45,12)
 - Le plus à l'Est : Dartmouth - 020602 - (-64,91 ; 49,04)
 - Le plus à l'Ouest : Kinojevis - 043012 - (-78,56 ; 48,39)

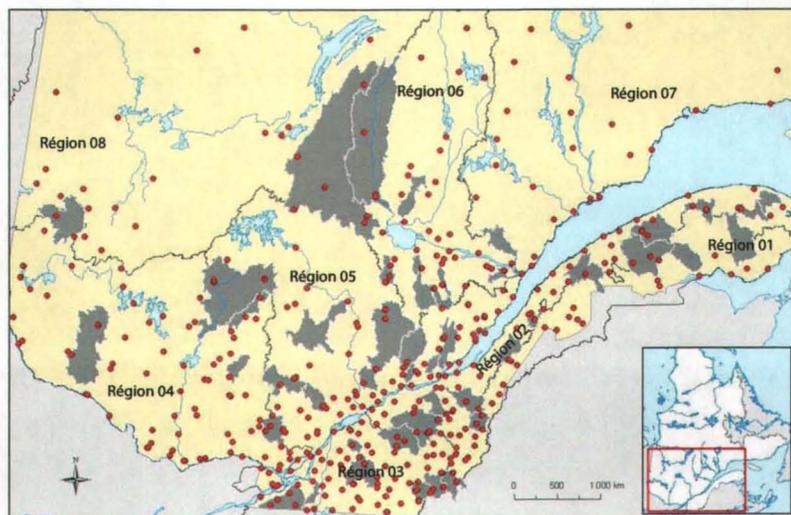


FIGURE 3.2 – Zoom sur le Sud du Québec illustrant la couverture géographique des bassins versants sélectionnés

3.2 Choix du modèle

Une grande variété de modèles hydro-météorologiques est disponible dans la littérature. Nous avons retenu le modèle MOHYSE pour les raisons suivantes : premièrement, le but étant d’obtenir un modèle applicable rapidement à des bassins non jaugés, il était indispensable d’implanter un modèle très simple : notre choix s’est donc arrêté sur un modèle conceptuel et global. De plus, le modèle devait pouvoir tenir compte du couvert de neige puisque la région d’application couvre le sud du Québec. MOHYSE répondait à toutes ces exigences et possédait de surcroît la qualité d’être connu de l’équipe opérationnelle du CEHQ. De plus, une récente comparaison de performance basée sur le critère de Nash-Sutcliffe a été effectuée parmi 17 modèles simples différents sur 1061 bassins français, ce qui a permis de situer MOHYSE parmi les modèles simples les plus couramment utilisés en hydrologie opérationnelle. En regard de ces résultats, on constate que pour les bassins plus difficiles à modéliser (centile ≤ 25), MOHYSE se situe au-dessus de la moyenne et qu’ensuite, la qualité se détériore (J.-A. Velázquez, communication personnelle, septembre, 2010). Ces résultats sont illustrés à la figure 3.3 qui montre l’évolution du rang obtenu en classant les modèles selon le critère de Nash-Sutcliffe en fonction du centile.¹ Cela en soi est intéressant, car pour la simulation sur des bassins versants non jaugés, il est important que le modèle soit robuste. MOHYSE possède donc plus de difficultés à performer très bien sur un bassin, mais fournit plus souvent des résultats acceptables. De plus, il faut souligner que parmi les 17 modèles testés, certains n’étaient pas aussi simples que MOHYSE. Nous notons aussi que peu de ces modèles permettaient de modéliser la neige. Toutes ces raisons nous confortent dans le choix de MOHYSE. La prochaine section est consacrée à la description de la structure et du fonctionnement de MOHYSE.

3.2.1 Description de MOHYSE

Le nom de MOHYSE, qui signifie MOdèle HYdrologique Simplifié à l’Extrême, traduit bien les choix de modélisation qui ont été effectués lors de sa conception. Ce modèle a été développé à partir de 2004 à l’Université du Québec à Montréal (UQAM) dans le cadre d’un cours gradué en sciences de la terre par Fortin et Turcotte (2006). De ce fait, lors de sa création, MOHYSE était essentiellement un outil pédagogique. La division de l’hydrologie et de l’hydraulique du Centre d’expertise hydrique du Québec a récemment identifié le besoin de posséder un modèle hydrologique simple pouvant être mis en

1. Cette analyse a été effectuée sur 1061 bassins versants français n’étant pas concernés par les besoins de simulation de la neige

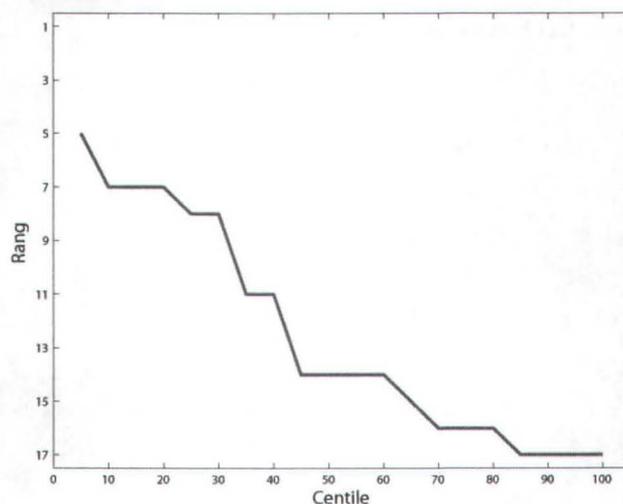


FIGURE 3.3 – Classement de MOHYSE par rapport à 16 autres modèles en fonction du centile sur 1061 bassins – Adaptée des résultats de Velázquez *et al.* (2010)

place rapidement et permettant d'effectuer des simulations hydrologiques à partir d'un minimum d'informations hydro-météorologiques. Afin de combler ces attentes, MOHYSE doit donc être adapté pour passer d'un statut pédagogique à un statut opérationnel.

Malgré sa simplicité, ce modèle tient compte des principaux aspects couramment modélisés pour un bassin versant nordique. MOHYSE comporte dix paramètres qui sont décrits dans le tableau 3.1. Le modèle transforme les données de météorologie observées en un débit à l'exutoire du bassin versant selon le schéma de production présenté à la figure 3.4. MOHYSE constitue un modèle hydro-météorologique global conceptuel fonctionnant en continu.

Les précipitations ainsi que les températures minimales et maximales constituent les intrants alors que la valeur sortante est le débit. Ce modèle simule l'équivalent en eau de la neige avec une approche d'indices de température. De cette façon, un couvert nival est simulé tout au long de l'hiver. La fonte de la neige, régissant les crues printanières, est ainsi déterminée par deux des dix paramètres, soient le taux de fonte et la température de fonte. En plus des données météorologiques entrantes, MOHYSE requiert un minimum d'information sur le bassin versant pour fonctionner adéquatement. La superficie et la latitude du centroïde constituent des éléments indispensables. Certaines modifications apportées à MOHYSE dans le but de simuler sur des BNJ ont nécessité le recours à la longueur du cours d'eau principal ainsi qu'à la pente. Ces informations sur chaque bassin versant constituent donc elles aussi des paramètres essentiels pour compléter la modélisation. L'ensemble des équations du modèle (codées en Fortran) est présenté à l'annexe A.

Tableau 3.1 – Paramètres du modèle MOHYSE

Fonction	Symbole	Signification	Unité
Équivalent en eau de la neige	C_F	Taux de fonte	$\text{mm } (^\circ \text{Celsius})^{-1}$
	T_F	Température seuil pour la fonte	$^\circ \text{Celsius}$
Bilan vertical	C_{Etp}	Coefficient d'ajustement de l'évaporation potentielle	$\text{mm } (\Delta t)^{-1}$
	C_{Tr}	Coefficient d'ajustement de la transpiration	$(\Delta t)^{-1}$
	V_{Max}	Niveau maximum de la zone vadose	mm
	C_{VA}	Coefficient de vidange de la zone vadose vers l'aquifère	$(\Delta t)^{-1}$
	C_V	Coefficient de vidange de la zone vadose vers le cours d'eau	$(\Delta t)^{-1}$
Hydrogramme unitaire	α	Paramètre de forme de l'hydrogramme unitaire	adimensionnel
	β	Paramètre d'échelle de l'hydrogramme unitaire	adimensionnel

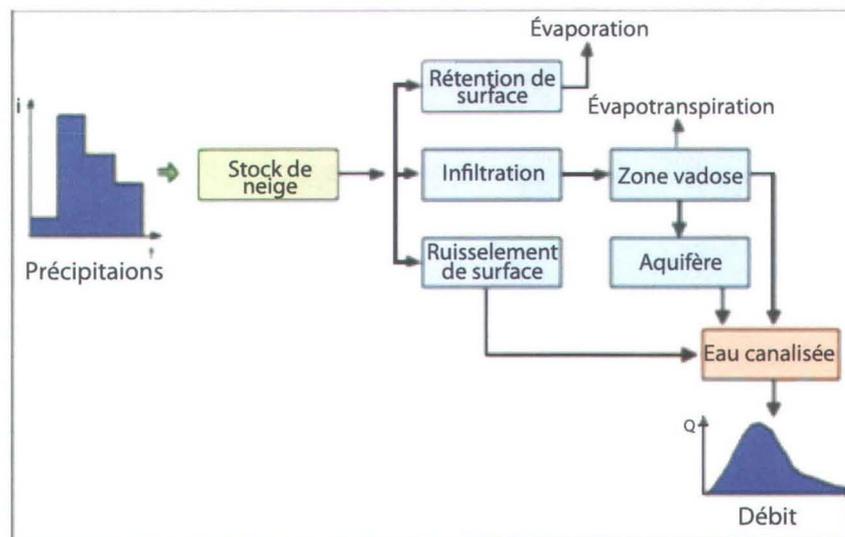
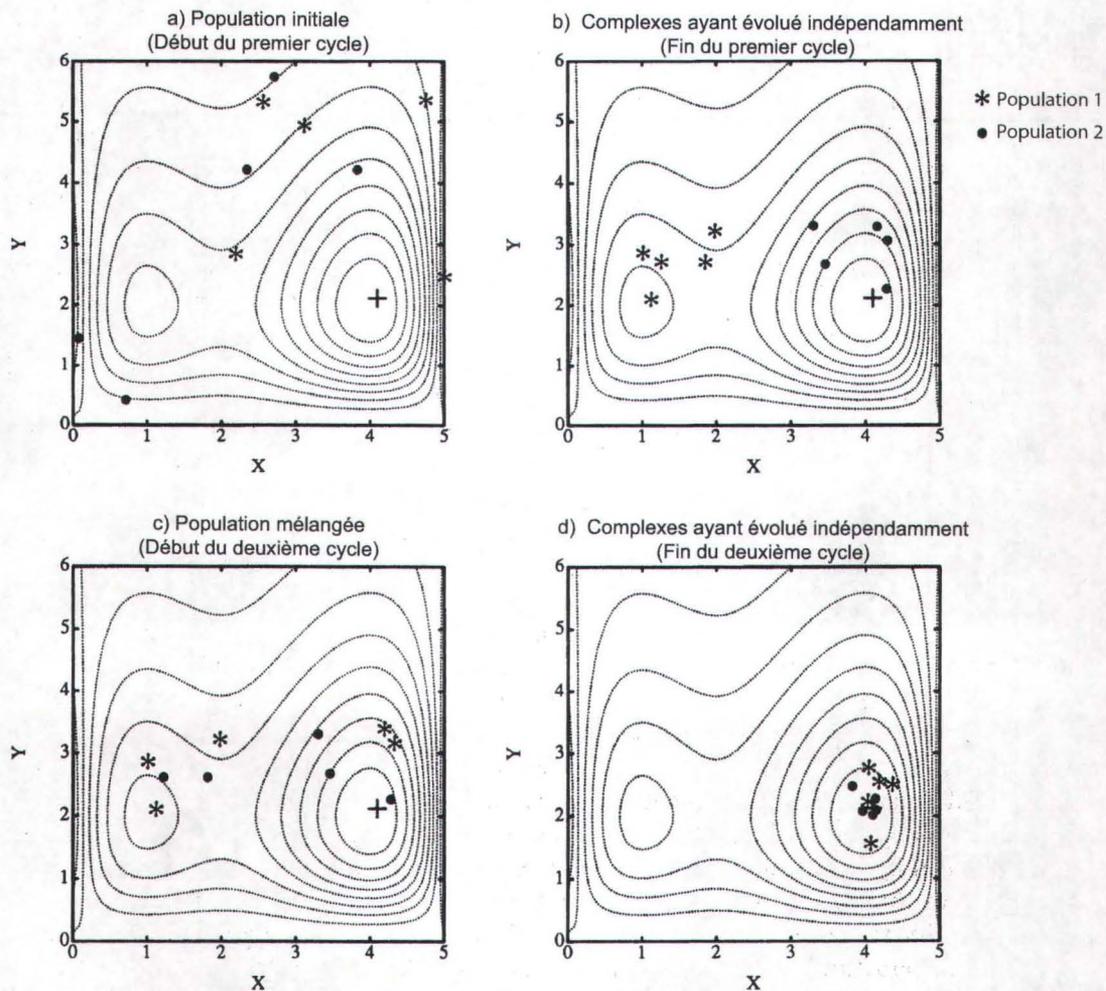


FIGURE 3.4 – Schéma de production de MOHYSE – Les couleurs sont en concordance avec le tableau 3.1

3.3 Choix de la méthode d'optimisation

L'échantillon sur lequel l'étude s'effectuera ayant été formé et le modèle hydrologique utilisé ayant été décrit, il convient d'aborder la méthode suivie pour le calage des paramètres du modèle.

Lorsque le nombre de paramètres est relativement élevé, il peut parfois être difficile d'atteindre le minimum global dans le domaine de définition des paramètres en utilisant une méthode d'optimisation locale. Pour cette raison, une méthode de convergence globale sera plutôt utilisée, soit *Shuffled Complex Evolution - University of Arizona* (SCE-UA) (Duan *et al.*, 1992). Cette technique d'optimisation, qui fait matière de



Source : Duan (2005)

FIGURE 3.5 – Illustration du fonctionnement de SCE-UA en quatre étapes

référence dans le domaine de l'hydrologie, permet l'optimisation de plusieurs paramètres simultanément et utilise une approche tentant de converger vers les minima absolus. Tel qu'illustrée à la figure 3.5, l'évolution de l'optimisation se déroule comme suit :

- Figure 3.5 a : Plusieurs jeux de paramètres divisés en quelques sous-ensembles sont d'abord générés.
- Figure 3.5 b : En début d'optimisation, on tente d'améliorer chaque sous-ensemble de façon indépendante.
- Figure 3.5 c : Ensuite, de nouveaux sous-ensembles sont formés en mélangeant les précédents.
- Figure 3.5 d : Cette dernière étape vise à éviter de converger vers un minimum local, mais plutôt d'atteindre le minimum global.

Les jeux de paramètres initiaux sont générés de façon aléatoire ; cependant, il a été montré que les nombres aléatoires ne peuvent pas réellement être générés en informatique et sont en fait issus d'une séquence de nombres statistiquement indépendants les uns des autres issus d'une fonction déterministe. Pour que cette fonction génère ladite série, nous devons lui fournir un point de départ appelé « germe ». L'initialisation à partir d'un même germe présente l'avantage d'offrir des résultats reproductibles. Dans le cas présent, pour plus de robustesse, 24 germes de départs différents ont été utilisés, soit tous les nombres premiers inférieurs à 100 puisque certains algorithmes de génération de nombres aléatoires sont plus efficaces avec des nombres premiers comme germe.

3.4 Estimation des paramètres aux sites jaugés

Il convient maintenant de déterminer, pour chacun des bassins versants, quel jeu de paramètres permet d'obtenir les meilleurs résultats possibles en simulation. Pour ce faire, nous procédons en trois étapes.

1. La fonction objectif est déterminée.
2. Le critère selon lequel il sera jugé qu'un jeu de paramètres est le plus performant est fixé.
3. Pour chacun des bassins, les trois types de paramètres présentés à la section précédente, soit les paramètres de neige, de bilan vertical et d'écoulement, seront calés.

À la suite de ce premier calage, une méthode permettant de ne caler que les paramètres de bilan vertical et d'écoulement sera présentée. Ce nouveau type de calage a pour objectif de simplifier le modèle et d'améliorer les résultats obtenus.

Il convient aussi de rappeler que dans la présente section, seul le calage bassin par bassin aussi appelé calage « local » nous intéresse. Ainsi, aucune méthode générale en vue de régionaliser ne sera pour l'instant présentée.

3.4.1 Choix de la fonction objectif

La première étape de notre méthode consiste à définir une fonction objectif. Lors du calage local, le choix de la fonction objectif s'est arrêté sur le critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970) (NS)

$$NS = 1 - \frac{\sum_{p=1}^P (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{p=1}^P (Q_o - \overline{Q_o})^2} \quad (3.1)$$

où

$\overline{Q_o}$: moyenne du débit observé ;

Q_o : débit observé ;

Q_s : débit simulé ;

p : pas de temps.

. Ce choix, fréquent en hydrologie, est justifié par plusieurs raisons ; premièrement, les hydrologues sont généralement intéressés par les crues, et par construction mathématique, le critère de NS, tout comme l'erreur quadratique moyenne (EQM), par exemple, donne un poids relatif beaucoup plus important aux débits élevés. Il est donc tout indiqué pour favoriser une bonne reproduction des débits de pointe par simulation. La modélisation des périodes d'étiages n'étant ce que nous souhaitons effectuer dans le présent contexte, l'attribution d'un poids relatif moins important est justifiée.

Un autre avantage du critère de NS consiste en sa facilité de comparaison. En effet, une sélection selon l'EQM serait tout aussi valable, mais pour une qualité de simulation identique sur des bassins ayant des débits moyens annuels différents, par exemple à cause de leurs superficies distinctes, les EQM pourraient être très différentes. Au contraire, le critère de NS, toujours inférieur à un, est pondéré en fonction du débit moyen : il est donc très facile de comparer rapidement les performances d'un bassin donné par rapport au reste de l'échantillon avec ce seul critère.

Il est toutefois important de mentionner que ce critère possède aussi certains défauts. De ce fait, plusieurs alternatives sont proposées. Mentionnons simplement Gupta *et al.* (2009) et Westerberg *et al.* (2010) pour ne citer que deux exemples récents. Toutefois, pour les raisons évoquées plus haut et puisqu'aucun critère précis ne fait l'unanimité au sein de la communauté scientifique, nous poursuivrons avec le critère de NS.

3.4.2 Choix du jeu de paramètres optimal

Dans un deuxième temps, le jeu de paramètres jugé optimal est choisi à l'aide de la fonction objectif en appliquant la méthode suivante. La période d'étude s'échelonne du 2 novembre 2000 au 2 novembre 2008. Pour chacun des bassins à l'étude, le calage est effectué sur la première moitié de la période (novembre 2000 à novembre 2004) avec l'algorithme d'optimisation SCE-UA. Pour chacun des 24 germes de départ, SCE-UA fournit un jeu de paramètres maximisant le critère de NS. Parmi ces 24 germes, le jeu ayant maximisé la fonction objectif est considéré comme optimal. La deuxième période, soit de novembre 2004 à novembre 2008, ne sert donc qu'à effectuer une validation et ainsi analyser les performances hors de la période calage.

Il est à souligner qu'un autre choix méthodologique a été effectué. Lors du calcul du critère de NS, les débits des mois de décembre, janvier et février sont exclus et ne participent donc pas à la sélection du jeu optimal. Différents phénomènes, propres à l'hydrométrie sous glace, entraînent une mauvaise mesure des débits en temps réel (Turcotte *et al.*, 2005) et il devient ainsi plus prudent de simplement les exclure lors

du calage puisque l'erreur peut parfois atteindre 1000% (J. Lacasse, communication personnelle, mars, 2008).

3.4.3 Calage de tous les paramètres

La troisième étape de notre démarche méthodologique consiste à effectuer le calage. Tel que mentionné à la section 3.2.1, les paramètres de MOHYSE peuvent être divisés en trois catégories selon le rôle qu'ils jouent au sein du modèle. Cette classification permet notamment de séparer les processus d'identification des paramètres selon l'application souhaitée. Dans un premier temps, tous les paramètres sont calés. Pour ce faire, les intrants du modèle comprennent les précipitations totales observées interpolées tel qu'expliqué à la section 3.1.2. Les précipitations totales résultent de la somme entre la pluie et l'équivalent en eau de la précipitation solide. Pour la période hivernale, les équivalents en eau de la neige sont fournis au modèle ; ce dernier séparera ensuite la précipitation solide de la précipitation liquide. À la suite du calage, un jeu de paramètres par germe de départ est obtenu. Tel que mentionné à la section 3.4.2, le jeu optimal est déterminé en fonction du meilleur critère sur la période de calage. À cette étape, un jeu de paramètres optimal pour chacun des bassins à l'étude est donc obtenu. Ensuite, une simulation est effectuée sur la période de validation avec les paramètres optimaux, ce qui permet d'évaluer la performance du modèle sur le bassin versant pour lequel le calage a été effectué.

3.4.4 Calage des paramètres de bilan vertical et d'écoulement

Suite au premier calage, un nouveau calage est effectué pour chacun des bassins ; cependant, seuls les paramètres du bilan vertical et d'écoulement sont calés selon la même méthode et les mêmes critères de sélections que nous venons de présenter. Le rôle de ces deux groupes de paramètres au sein du modèle est illustré à la figure 3.4. Comme il a été mentionné à la section 3.2.1, le modèle MOHYSE contient un module de fonte de neige assez approximatif. Puisque la fonte de la neige constitue le moteur des principales crues annuelles au Québec, soient les crues printanières, il a été décidé d'implanter un autre module de fonte de neige disponible au CEHQ afin d'améliorer et de simplifier le modèle. Cette façon de faire, qui consiste à modifier les entrées en amont du modèle, n'influence pas la technique de calage et de sélection du jeu optimal, mais seulement les résultats. Elle sera présentée en détail dans la section 3.5.

Puisque cette étape vise à définir un nouveau jeu de paramètres optimal pour chacun

des bassins de notre échantillon, il n'est pas possible de simplement nommer les jeux de paramètres en fonction du bassin sur lequel ils s'appliquent. Il convient donc de définir une certaine nomenclature afin de pouvoir facilement distinguer de quel type de calage est issu un jeu donné, par exemple lors de la présentation des résultats. Cette nomenclature, spécifique aux calages locaux, sera présentée à la section 3.5.4.

3.5 Amélioration de la gestion du couvert nival

Comme il a été mentionné à la section 3.2.1, la modélisation de la neige effectuée par le modèle MOHYSE constitue une approximation extrêmement simplifiée des processus réels. Puisque cette estimation de l'équivalent en eau de la neige au cours de l'hiver est cruciale afin d'obtenir de bonnes prévisions sur les différents bassins versants du Québec, la possibilité d'extraire cette partie du modèle en modifiant le type de données d'entrée a été étudiée. En effet, plutôt que d'alimenter le modèle directement avec les précipitations, il est possible d'utiliser les apports verticaux (AV).

Le terme « apports verticaux » n'étant pas un terme reconnu formellement en hydrologie, il convient de le préciser. Ces apports représentent l'eau parvenant au sol sous forme liquide, c'est-à-dire soit les précipitations liquides, soit l'eau résultant de la fonte de la neige ou encore une combinaison des deux phénomènes. Afin que le concept soit parfaitement clair, illustrons le par quelques exemples. En été, les AV sont égaux aux précipitations. En hiver, lorsque les températures sont sous le point de congélation, les précipitations tomberont sous forme de neige, il n'y aura pas de fonte et les AV seront nuls. Au printemps, lors d'une journée chaude sans précipitation, la fonte de la neige entraînera des AV. Il se pourrait aussi qu'il pleuve au printemps et que les AV soient la somme de la précipitation et de la fonte. Finalement, il pourrait y avoir de la pluie en hiver qui soit partiellement retenue par le couvert nival et que les AV représentent une certaine fraction des précipitations.

3.5.1 Description des apports verticaux

Afin d'obtenir ces apports verticaux, un module de fonte de neige indépendant de MOHYSE, à la base issu du modèle Hydrotel (Turcotte *et al.*, 2007), est implanté. Ce modèle présente de nombreux avantages. Premièrement, le module de fonte issu d'Hydrotel est moins simpliste que celui de MOHYSE puisqu'il fait intervenir à la fois un bilan de masse et un bilan d'énergie thermique plutôt qu'une simple approximation basée sur un indice de température. De plus, ce modèle a été calé de façon indépendante sur le sud du Québec (Turcotte *et al.*, 2007), ce qui le rend moins dépendant des aléas hydrologiques découlant d'un calage sur les bassins. En effet, le calage du modèle de neige avait précisément comme objectif une bonne simulation du couvert de neige plutôt que du débit. Cela le rend plus robuste puisque l'optimisation de la partie neige d'un modèle hydrologique peut servir à compenser d'autres phénomènes lorsque le calage concerne la reproduction du débit, tandis que lorsque le calage du modèle de neige est effectué de façon séparé, l'objectif final demeure la neige et la compensation

devient moins probable. Il est important de mentionner qu'il n'est pas nécessaire que les apports verticaux soient issus du même modèle que celui utilisé au CEHQ. Tout autre modèle pouvant simuler en continu les équivalents en eau du couvert nival et produire des apports verticaux serait adapté. Pour un échantillon de modules de neige simples et facilement déployable, le lecteur peut se référer à la thèse de Valery (2010) dans laquelle, en plus de développer un nouveau module de neige, sept modules existants sont présentés.

Bien que les points mentionnés précédemment soient importants, l'avantage principal de l'utilisation des apports verticaux provient du fait qu'une correction des équivalents en eau de la neige au sol (EEN)² est effectuée de façon bimensuelle au cours de la période hivernale, ce qui permet l'assimilation par le modèle d'une mesure supplémentaire. Pour ce faire, des relevés par ligne de neige sont effectués sur une centaine de points au Québec (Ministère du développement durable, Environnement et Parcs, Gouvernement du Québec, 2002). Ainsi, il est possible de façon bimensuelle au cours de l'hiver d'ajuster ponctuellement le stock de neige en fonction du couvert nival observé et ainsi d'éviter une divergence du modèle. Ces corrections sont interpolées sur tout le sud du Québec, permettant au final l'obtention d'apports verticaux sur l'ensemble du sud du Québec avec une résolution de $0,1^\circ$, c'est-à-dire sur la même grille que laquelle est effectuée l'interpolation des précipitations et des températures. Un autre avantage, cette fois indirect, vient du fait qu'en utilisant les apports verticaux en entrée, le nombre de paramètres à estimer est réduit de dix à huit, ce qui diminue la complexité du modèle MOHYSE.

3.5.2 Problèmes liés à l'utilisation des apports verticaux

À l'origine, cette technique de mise à jour du stock de neige selon les relevés nivométriques a été développée au CEHQ à des fins de prévisions opérationnelles tandis que dans le présent projet, elle sert à fournir les données d'entrée d'un modèle. Elle est donc appliquée dans la perspective d'obtenir des données historiques. La différence peut paraître subtile, mais les implications sont importantes et il convient donc de s'attarder sur ce point.

En effet, dans un cadre opérationnel, une mise à jour du stock de neige ne peut être que bénéfique puisque seules les données du futur sont d'intérêt. Ainsi, une correction sur l'état présent du couvert nival améliorera les prévisions puisque les états présents

2. Afin de faciliter la lecture, le sigle EEN sera utilisé dans la suite de ce manuscrit pour désigner l'équivalent en eau de la neige.

du modèle sont réajustés en fonction d'une mesure prise sur le terrain considérée plus fiable que le modèle. Cependant, dans un contexte où l'on se situe *a posteriori* de toutes ces corrections et que l'application souhaitée concerne un calage sur l'historique, nous éprouvons de la difficulté à boucler le bilan annuel. Chaque fois où une correction est apportée, de l'eau apparaît ou disparaît sous forme de neige dans le modèle. Prenons comme exemple le cas où le couvert de neige est sous-évalué par le modèle : si le problème provient d'une fonte trop forte, le fait d'ajuster le stock de neige induira un problème potentiel puisque cette fonte aura eu lieu avant la correction et aura à nouveau lieu après. Le volume d'écoulement résultant sera donc trop important.

3.5.3 Approche de correction développée

La technique de correction proposée, afin de résoudre ce problème, qui permet également d'honorer les valeurs mesurées sur le terrain, est la suivante : plutôt que de corriger le stock de neige de façon ponctuelle lors d'un relevé, l'idée serait de corriger les intrants du modèle de façon à obtenir une courbe de neige continue dans le temps. De cette façon, les bilans en eau ne seraient pas biaisés lors du calage.

Il est légitime à l'intérieur des hypothèses à la base d'Hydrotel et de MOHYSE de supposer que, lors de la fonte, le principal facteur pouvant causer les écarts entre le modèle et la réalité est la température, puisque cette dernière détermine le taux de fonte. Lors de l'accumulation, bien que la température puisse aussi jouer un rôle aux environs du point de congélation, le facteur principal serait plutôt la précipitation puisque le sous-captage des précipitations solides est depuis longtemps bien connu des météorologues. En effet, le captage n'atteint fréquemment qu'à peine 50-70% des précipitations réellement tombées selon le type de jauges utilisé (Sugiura *et al.*, 2006).

Cependant, entre deux relevés de neige, la variation finale sera considérée soit comme une augmentation, soit comme une diminution de l'EEN de la neige, malgré le fait qu'en réalité il soit fort probable que les deux phénomènes se soient produits de façon alternée. De plus, lorsque les températures se situent aux alentours du point de congélation, il est très difficile d'avoir la certitude que le problème provienne d'une mauvaise estimation des températures ou des précipitations. Pour ces raisons, il a été décidé de toujours modifier de façon conjointe la précipitation et la température. La modification appliquée à la température (ΔT) utilisée est additive et la modification de la précipitation (ΔP) est quant à elle multiplicative. Il est cependant impératif de trouver un équivalent entre ΔT et ΔP afin d'effectuer les deux modifications à la fois. En effet, puisque nous considérons qu'une augmentation d'un degré Celsius, conduisant à une augmentation de la fonte, équivaut à diminuer d'un certain pourcentage la précipitation, nous nous trouvons face

à une infinité de solutions. Nous cherchons donc une façon de fixer cette équivalence. Pour ce faire, nous définissons deux facteurs égaux dénotés A et B permettant de respectivement modifier la température et les précipitations. Les prémices de départ résident dans le fait qu'un ΔT donné doit toujours correspondre au même ΔP et qu'ils varient de façon inverse. En effet, une diminution de température doit correspondre à une augmentation des précipitations, car ces deux modifications augmentent le couvert de neige, et *vice versa*. Pour trouver l'équivalence mathématique, nous utilisons le fait que le taux de fonte moyen de notre module de neige, au Québec, est de $\frac{2,9 \text{ mm}}{^\circ\text{C jour}}$ (Turcotte *et al.*, 2004). Nous considérons ensuite les précipitations moyennes sur une fenêtre mobile de 24h pour chaque pas de temps où des précipitations sont observées. Cette précipitation moyenne correspond à $\frac{2,82 \text{ mm}}{\text{jour}} \approx \frac{2,9 \text{ mm}}{\text{jour}}$ sur les bassins de la présente étude. Il est à remarquer qu'un seuil de 0,2 mm a été fixé afin de négliger les précipitations correspondant à l'incertitude des précipitomètre. Nous pouvons donc conclure qu'augmenter la température de 1 °C donne en moyenne 2,9 mm d'EEN en moins au couvert nival, ce qui est aussi équivalent à couper en moyenne 100% des précipitations. Nous pouvons finalement exprimer nos corrections avec les équations suivantes, l'exemple ci dessus correspondant à $A = 1^\circ\text{C}$ et $B = 1$:

$$T_{\text{mod}} = T_{\text{ini}} + A \quad (3.2)$$

$$P_{\text{mod}} = \max(P_{\text{ini}} \cdot (1 - B); 0) \quad (3.3)$$

$$\frac{A}{B} = 1^\circ\text{C} \quad (3.4)$$

où

A désigne le coefficient de correction des températures s'appliquant à un site donné et à un intervalle de temps donné entre deux relevés nivométriques; en théorie $A \in \mathbf{R}$ mais en pratique pour des raisons physiques $A \in [-15, 5]$

B désigne le coefficient de correction des précipitations s'appliquant à un site donné et à un intervalle de temps donné entre deux relevés nivométriques; en théorie $B \in \mathbf{R}$ mais en pratique pour des raisons physiques $B \in [-15, 5]$

T_{ini} et T_{mod} représentent les séries temporelles des températures initiales et modifiées à un site donné sur l'intervalle de temps entre deux relevés nivométriques;

P_{ini} et P_{mod} dénotent les séries temporelles des précipitations initiales et modifiées à un site donné sur l'intervalle de temps entre deux relevés nivométriques;

max désigne un opérateur qui retient la valeur maximale parmi les arguments.

Donc, pour chaque point de la grille, on optimise les facteurs A et B constants pour chacun des pas de temps entre deux relevés de neige. Nous considérons que les facteurs

sont optimisés lorsque, pour un point donné, la météorologie modifiée conduit à une différence de moins de 1 % entre le modèle et l'observation. La méthode d'optimisation utilisée est la méthode de Brent (Press *et al.*, 1989) qui permet de rapidement converger lorsque la recherche du minimum s'effectue au sein d'un domaine ayant la forme d'une parabole. Cette méthode à l'avantage de converger très rapidement, condition primordiale compte tenu du nombre d'optimisations nécessaires dans le cas présent. En effet, chaque grille comptant 24 000 points avec une moyenne de cinq périodes de correction par années pendant huit ans nous avons près d'un million d'optimisations à effectuer.

Illustrons la façon dont la méthode corrective fonctionne par un exemple visuel. La figure 3.6 présente la méthode de correction ponctuelle. On constate qu'en date du 31 janvier, une mesure est effectuée permettant de constater que le couvert nival correspond à 40 mm d'EEN. Le modèle qui prédisait 33 mm d'EEN est donc ajusté à la hausse. Lors du second relevé de neige (14 février), le modèle qui simulait alors 55 mm est ramené à la baisse pour atteindre le niveau du relevé, 50 mm. La figure 3.7 représente la nouvelle méthode. On voit que l'EEN cette fois est respecté pour les relevés. Dans cette figure, deux ensembles A et B de facteurs correctifs différents ont été appliqués. Le premier est constant du 1^{er} novembre de l'année précédente au 31 janvier et permet d'atteindre la cible de 40 mm. Il pourrait par exemple correspondre à $A = -0,15$ et $B = -0,15^{\circ}\text{C}$, ce qui aurait pour effet, selon l'équation 3.2 et l'équation 3.3, de respectivement diminuer toutes les températures mesurées entre le 1^{er} novembre et le 31 janvier de $0,15^{\circ}\text{C}$ et augmenter les précipitations de 15 %. Par la suite, un second facteur, différent du premier, est appliqué entre le 31 janvier et le 14 février. Celui-ci pourrait être cette fois-ci de $A = 0,05$ et $B = 0,05^{\circ}\text{C}$ ayant pour effet d'augmenter les températures de $0,05^{\circ}\text{C}$ et de diminuer les précipitations de 5 %.

Avec ce facteur, il est ensuite possible de trouver les données météorologiques corrigées qui permettent d'honorer les valeurs mesurées du stock de neige. Cette méthode est donc uniquement disponible *a posteriori*, la rendant ainsi inutile dans un contexte opérationnel, mais tout à fait adaptée dans le présent contexte de calage.

Après avoir mis au point cette méthode corrective, le calage tel que présenté à la section 3.4.4 est effectué à nouveau. En effet, puisque les relevés de neige sont respectés, la seule possibilité de validation quant à la pertinence de cette technique se situe dans l'amélioration possible des résultats de simulation hydrologique.

Pour un exemple d'application de cette méthode, le lecteur se référera à Turcotte *et al.* (2010).

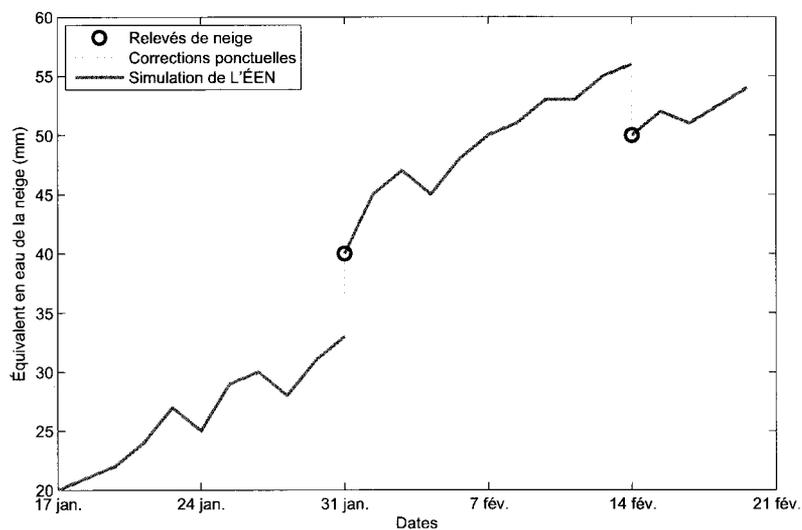


FIGURE 3.6 – Exemple d'évolution de l'EEN selon la méthode de correction ponctuelle

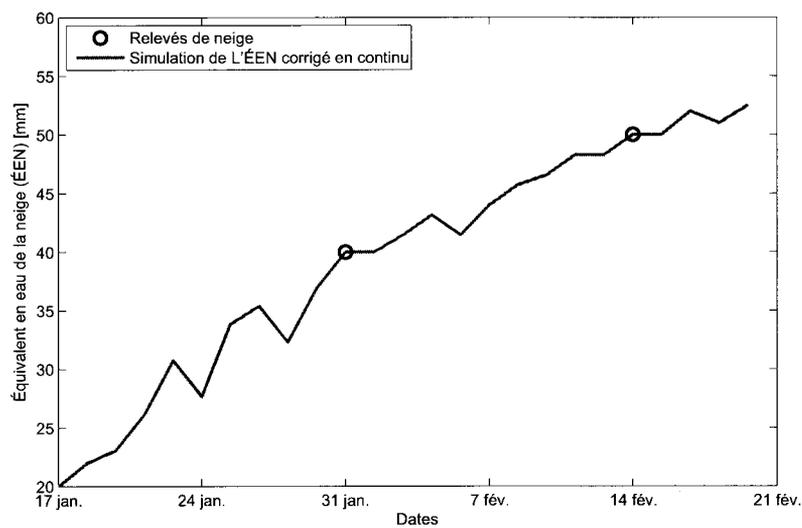


FIGURE 3.7 – Exemple d'évolution de l'EEN selon la méthode de correction en continu

3.5.4 Nomenclature des calages locaux

Le tableau 3.2 présente la nomenclature choisie pour caractériser les différents types de jeux de paramètres mentionnés au cours des sections précédentes. Trois types d'entrées au modèle MOHYSE sont ainsi considérés : les précipitations brutes (PB), les apports verticaux corrigés ponctuellement (AVP) et les apports verticaux corrigés en continu (AVC).

Tableau 3.2 – Types de calages locaux

Abréviation	Nombre de paramètres	Type d'entrée
PB	10	précipitations brutes
AVP	8	apports verticaux corrigés ponctuellement
AVC	8	apports verticaux corrigés en continu

3.6 Identification des paramètres aux sites non jaugés

Puisque le but du projet consiste à développer une méthode pour les cas où les bassins ciblés ne sont pas jaugés ou ne disposent pas d'un historique de jaugeages suffisant pour y effectuer un calage, il convient d'aborder l'approche méthodologique choisie pour parvenir à des simulations sur des BNJ. Pour ce faire, nous procéderons en deux étapes. Dans un premier temps, puisque l'objectif consiste à développer une application concrètement utilisable en contexte opérationnel, nous présenterons une approche très simple. Il s'agit de constituer un jeu unique de paramètres qui donnerait des résultats acceptables sur tous les bassins. Ce jeu de paramètres unique pour tous les bassins est appelé « jeu de paramètres global ». Nous référerons aussi au « calage global » lorsque nous présenterons la méthode permettant d'obtenir ce jeu global.

Par la suite, une technique de régionalisation de l'un des paramètres par interpolation sera proposée. Un seul paramètre sera interpolé afin d'éviter d'éventuels problèmes de compensation des paramètres puisque même si MOHYSE possède peu de paramètres, nous ne pouvons pas affirmer avec certitude qu'ils soient tous indépendants. Cette approche d'interpolation permet d'améliorer la qualité des prévisions par rapport à l'utilisation simple du jeu global.

3.6.1 Création d'un jeu de paramètres global

La première étape en vue d'obtenir une simulation sur des BNJ consiste en l'obtention d'un jeu unique de paramètres utilisable sur l'ensemble du territoire. Certains points importants doivent cependant être pris en compte avant d'effectuer cette étape. Premièrement, bien que notre étude ne porte que sur des bassins versants du Québec, le nombre de bassins, leur emplacement et leur superficie conduisent potentiellement à une non-homogénéité hydrologique ; certaines modifications doivent donc être apportées à MOHYSE afin de l'adapter à cette nouvelle problématique.

La première simplification proposée consiste à inclure comme intrants les apports verticaux. De cette façon, tous les bassins versants ne se voient pas imposer une température et un taux de fonte unique. En effet, le décalage des crues printanières entre les différentes régions du Québec ne saurait s'expliquer que par la différence de températures observées. Cette technique et ses avantages ont été discutés en détail à la section 3.5, donc nous ne nous y attarderons pas davantage. Le deuxième point impor-

tant est l'hydrogramme unitaire (HU). Comme nous l'avons mentionné à la section 3.2.1, deux des paramètres de MOHYSE servent à paramétrer cet hydrogramme. L'HU régissant le temps de réaction simulé du bassin versant, il serait aberrant de croire qu'un hydrogramme unitaire unique peut être appliqué sur tout le sud du Québec. La façon dont nous procédons pour contourner ce problème sera présentée en détail à la section 3.6.4. Pour l'instant, une autre modification à la méthode précédemment exposée afin de satisfaire les besoins de simulation sur les BNJ sera abordée, soit la fonction objectif.

3.6.2 Choix de la fonction objectif

Afin d'obtenir un seul jeu de paramètres pour tous nos bassins, nous devons aussi déterminer une nouvelle fonction objectif globale permettant d'inclure les informations provenant de chacun des bassins. La première piste envisagée fut d'abord d'introduire simplement la somme des critères de NS sur tous les bassins comme fonction objectif à maximiser. Cependant, cette méthode favorisait les bassins présentant de bons résultats au détriment des bassins où l'optimisation avait moins bien réussi. Il fut donc décidé d'utiliser l'écart entre le NS en calage local obtenu pour chacun des bassins versants et le NS résultant des paramètres globaux. Cette fonction objectif aura pour effet de favoriser une performance robuste, critère essentiel si on veut avoir la confiance nécessaire pour utiliser le modèle sur des BNJ. La fonction objectif globale, cette fois-ci à minimiser, est donc définie comme suit :

$$\text{Fonction objectif globale} = \sum_{b=1}^B \left(1 - \frac{\text{NS}_b}{\text{NS}_{Lb}} \right) \quad (3.5)$$

où

NS_{Lb} : NS obtenu précédemment lors du calage local ;

NS_b : NS résultant du jeu de paramètres global en cours d'optimisation ;

B : nombre total de bassins versants.

b : indice du bassin versant.

Cette façon de faire permet donc une plus grande robustesse sur les différents bassins versants et est donc tout indiquée pour une utilisation globale. Il est à noter que cette approche paraît novatrice, car aucune approche similaire n'a été constatée lors de la recension des écrits.

3.6.3 Calage des paramètres de bilan vertical

Dans la section 3.4.3, nous avons d'abord présenté une version du calage comprenant les trois types de paramètres, pour ensuite n'en garder plus que 2 à la section 3.4.4. Finalement, nous nous retrouvons à présent avec seulement les paramètres de bilan vertical à caler. Cette simplification progressive, permet d'assurer une simulation plus cohérente sur les BNJ. Malgré ces modifications, la procédure de calage reste globalement la même que celle présentée précédemment, c'est-à-dire que les périodes de calage et de validation sont les mêmes, que la configuration de SCE-UA reste inchangée et que l'on exclut toujours les mois hivernaux. Voyons maintenant concrètement comment se départir des paramètres responsables de l'hydrogramme unitaire au sein de MOHYSE.

3.6.4 Détermination théorique des paramètres d'écoulement

Avant de pouvoir obtenir un jeu de paramètres commun à tous les bassins, il apparaissait important de modifier la façon dont l'hydrogramme unitaire était géré par MOHYSE. En effet, il semblait inconcevable qu'un même hydrogramme unitaire puisse convenir à une gamme de superficies allant d'environ 250 km² à plus de 15 000 km².

L'option envisagée a donc été de trouver un hydrogramme unitaire non pas calé, mais plutôt basé sur les caractéristiques du bassin. Afin de déterminer de façon théorique l'hydrogramme unitaire, celui-ci fut premièrement simplifié afin qu'il soit de forme triangulaire et qu'il ne reste plus qu'à déterminer la durée de la montée et la durée totale. Il fut ensuite décidé d'utiliser un pourcentage de décrue pour connaître la durée totale. En fait, si l'on parvient à connaître le temps de réaction du bassin, il est ensuite possible de caler ce pourcentage de décrue. Par exemple, si le coefficient de décrue est de 200% , un bassin mettant dix heures à atteindre sa pointe de débit en mettra vingt à redescendre, tandis qu'un bassin où la montée ne mettrait que cinq heures redescendrait en dix heures. Cela revient en quelque sorte à fixer l'angle du triangle que forme l'HU. Pour déterminer la durée de la montée, une méthode numérique basée sur des caractéristiques physiques ayant l'avantage d'avoir été développée sur des bassins versants nord-américains de taille similaire aux nôtres a été utilisée (Watt et Chow, 1985). Cette formule possède aussi l'avantage de ne pas demander une trop grande quantité d'information puisque seul un modèle numérique de terrain avec le tracé hydrographique, voire une simple carte topographique, est nécessaire pour utiliser cette formule définie comme :

$$t_L = 0,000326 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,79} \quad (3.6)$$

où

t_L : nombre d'heures entre le barycentre de la pluie et la pointe de crue ;

L : longueur en mètres du cours d'eau principal ;

S : pente 85–10 du cours d'eau principal.

Il est important de mentionner que l'on doit ajouter un demi pas de temps $\left(\frac{PDT}{2}\right)$ à t_L pour obtenir le temps de montée, puisque dans cette formule, le barycentre de la pluie constitue le point de référence.

3.6.5 Interpolation géostatistique par krigeage d'un paramètre de bilan vertical

Dans l'optique d'améliorer la possibilité de simulation sur les bassins non jaugés, il fut tenté d'obtenir, en plus d'un jeu constant de paramètres, un certain jeu variable de paramètres qui dépendrait de l'emplacement géographique. Afin de rester le plus global possible, notre approche consistait à fixer tous les paramètres du jeu global sauf un paramètre qui lui serait variable. De cette façon, nous avons d'abord calé localement et de façon individuelle chacun des paramètres obtenus lors du calage global, c'est-à-dire que pour chacun des 6 paramètres correspondants au bilan vertical de MOHYSE, le calage local était à nouveau réalisé sur chacun des bassins. Cela donne donc un total de 276 ($46 \cdot 6$) jeux de paramètres où à chaque fois cinq sont issus du jeu global, le dernier étant calé localement.

La seconde étape consiste à identifier le paramètre permettant les meilleures améliorations en vue de le régionaliser. Pour la régionalisation, nous avons procédé au krigeage du paramètre. Lors du krigeage, chacun des bassins est tour à tour exclus afin de pouvoir ensuite évaluer le gain par rapport au jeu global sur le bassin exclus avec cette fois une valeur interpolée d'un paramètre au lieu de sa valeur établie lors du calage global. Afin de s'y retrouver plus facilement, un récapitulatif des différents jeux de paramètres est présenté au tableau 3.3. Le krigeage pouvant produire une grille de valeurs, la même grille que celle utilisée pour la météorologie a été utilisée. Ainsi, à partir de la même méthode que celle employée pour la météorologie, il est possible d'utiliser la moyenne des différents points présents sur le bassin versant.

Tableau 3.3 – Nomenclature en fonction du type de calage

Type de calage	Noms	Nombre de jeux
Calage sur chaque bassin pris individuellement	« locaux »	46
Calage sur l'ensemble des bassins pris simultanément	« global »	1
Calage d'un seul paramètre sur chaque bassin pris individuellement avec les autres paramètres fixés* à la valeur du jeu « global »	« global P** locaux »	$6 \cdot 46 = 276$
Interpolation du paramètre ayant procuré les meilleurs résultats « global P** locaux »	« global P** interpolé »	46

* Les paramètres fixes ont une variation de $\pm 0,001$.

** P correspond au nom du paramètre calé.



Chapitre 4

Résultats et discussion

Suivant l'ordre décrit dans la méthode, les résultats seront maintenant présentés. Premièrement, nous verrons comment les données météorologiques ont été contrôlées ; nous exposerons ensuite les résultats obtenus par l'approche développée de correction de la neige, avant de s'intéresser à ceux propres aux sites jaugés. Enfin, les résultats aux sites non jaugés seront exposés. Pour ce faire, nous débuterons en présentant les faits saillants de la détermination théorique des paramètres d'écoulement, suivi des résultats issus du jeu de paramètres purement « global ». Nous nous intéresserons par la suite aux résultats provenant des paramètres « global P Locaux », pour finalement aborder ceux de l'interpolation par krigeage dérivant des jeux « global P interpolé ».

Dans le corps du texte, nous ne présenterons que certaines statistiques descriptives résumant l'ensemble des valeurs obtenues, soit les trois quartiles (25^e centile, médiane et 75^e centile) des résultats. Les résultats obtenus bassin par bassin sont détaillés à l'annexe B. De plus, il est important de rappeler que seuls les résultats obtenus lors de la période de validation servent à définir la qualité de modélisation obtenue ; les résultats en calage sont toutefois présentés à des fins de comparaison et d'information.

Finalement, l'annexe C présente les hydrogrammes en calage et en validation obtenus lors du calage avec les AVC.

4.1 Validation météorologique

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 2, des données météorologiques de bonne qualité permettent de bonnes simulations hydrologiques. Il est généralement admis qu'une technique efficace pour valider les données de pluie sur une station est celle des doubles cumuls, c'est-à-dire qu'en se basant sur une station de référence, on compare une station voisine en cumulant les valeurs, généralement pour une année, des deux stations. Ainsi autant les valeurs aberrantes qu'un biais systématique pourront être décelés. Ainsi, malgré de légères différences ponctuelles, les valeurs cumulées par station sur une longue période devraient être très semblables. Cependant, dans le cas de notre étude, puisque les données utilisées n'étaient pas les données des stations brutes bassin par bassin, mais plutôt des données interpolées, il devenait difficile de les comparer ainsi puisque nous n'avions pas de valeurs de références indépendantes. Nous avons donc utilisé une façon visuelle simplifiée pour valider nos données. Premièrement, nous avons supposé que puisque les données étaient fréquemment utilisées par le CEHQ, une vérification avait été faite préalablement rendant peu probable un dysfonctionnement persistant d'une station. Il est tout de même envisageable que des erreurs ponctuelles pouvant parfois être très conséquentes aient pu passer inaperçues. De ce fait, pour tout de même révéifier les données, nous avons procédé en traçant le cumul des pluies par année hydrologique ; ainsi, les années très différentes pouvaient être analysées plus en détail.

Pour les températures, nous avons simplement tracé les moyennes journalières tout au long de l'année ; de cette façon, toute donnée s'écartant fortement des valeurs saisonnières standard était facilement identifiable. Ces données, une fois les quelques aberrations corrigées, sont présentées pour les huit années de l'étude à l'annexe D. En effet, certaines stations avaient des valeurs qui étaient trop élevées pour être physiquement possibles ou de grandes périodes vides d'enregistrement présentant la valeur zéro plutôt qu'une valeur manquante. Ces valeurs ont donc été exclues de notre interpolation météorologique.

4.2 Amélioration de la gestion du couvert nival

Avant d'entrer dans le vif de la présentation des résultats, il apparaît intéressant de présenter sommairement de façon visuelle les résultats obtenus lors de la correction des apports verticaux. En effet, alors que traditionnellement la technique consistait en une mise à jour ponctuelle de l'équivalent en eau de la neige, désormais la modification

s'effectue au niveau de la météorologie. La figure 4.1 montre le changement brusque qu'implique la correction ponctuelle sur l'équivalent en eau. Les apports verticaux sont

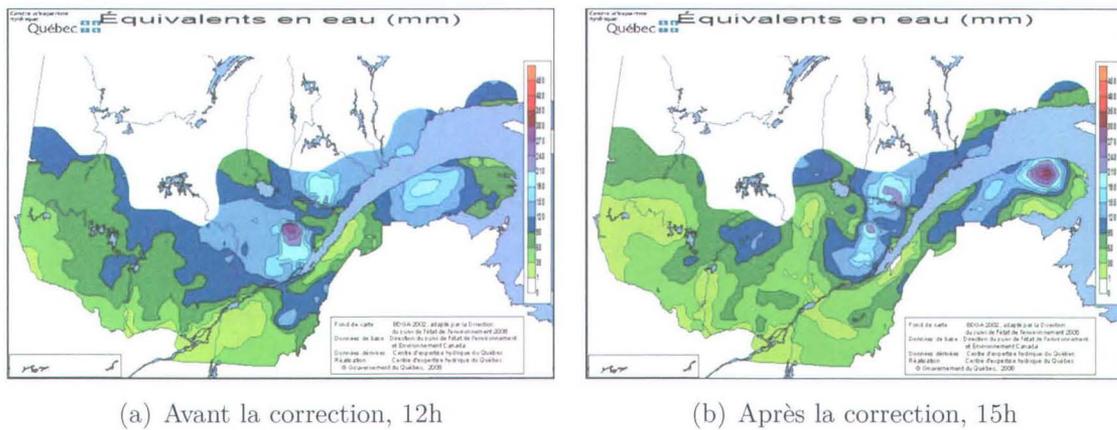


FIGURE 4.1 – Correction ponctuelle effectuée le 04/02/07 entre 12h (a) et 15h (b)

ensuite déduits de l'équivalent en eau. C'est pour cette raison que nous parlons d'apports verticaux corrigés, même si en réalité ce sont les équivalents en eau servant à produire les apports qui sont corrigés.

Ensuite, si l'on observe ce que donne la correction continue autour du relevé de neige, on voit facilement qu'entre les figure 4.2 (a) et figure 4.2 (b), il n'existe cette fois-ci pas de changement brusque puisque la météorologie a été modifiée sur toute la période afin d'obtenir une simulation continue honorant à $\pm 1\%$ le relevé de neige. Dans le cas où l'optimisation ne converge pas à moins d'un pour cent, on procède par l'ancienne technique consistant en l'application brusque du relevé de neige. Malgré cela, puisque chaque point est optimisé indépendamment, seuls quelques rares cas sont désormais soumis à un changement brusque et l'effet positif est facilement constatable.

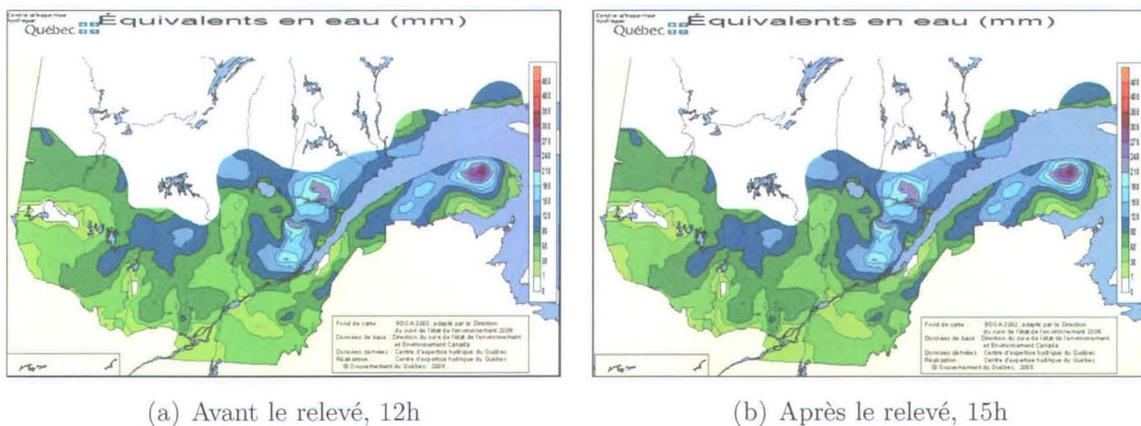


FIGURE 4.2 – Exemple de correction continue basée sur le relevé du 04/02/07 à 15h

Cependant, bien que cette technique semble prometteuse, les relevés de neige étant reproduits, la seule véritable validation ne peut être qu'hydrologique. Nous verrons donc maintenant les résultats « locaux » par lesquels nous pourrions juger de la qualité des données ayant servi à effectuer la modélisation.

4.3 Résultats aux sites jaugés

Comparons maintenant les résultats des différents types d'entrées, PB, AVP et AVC, en fonction des quartiles des résultats obtenus sur notre échantillon de bassins. Tout d'abord, il est bon de rappeler que l'entrée PB représente en quelque sorte l'entrée de base. C'est avec cette entrée que MOHYSE est utilisé de façon standard tel un modèle hydrologique comportant un module de fonte de neige, c'est-à-dire avec les précipitations brutes et les températures en entrée. À la lecture du tableau 4.1, qui présente les résultats obtenus lors de calages locaux aux sites jaugés, le premier constat est que l'utilisation des AVP fournit une qualité de simulation équivalente à l'utilisation de l'entrée PB en validation. Ce constat est intéressant puisque l'utilisation des AVP nous permet de nous affranchir du module de neige de MOHYSE ; ainsi, notre modèle comporte deux paramètres en moins, gagne en simplicité et ce tout en gardant la même qualité de modélisation. Cependant, le point sans contredit le plus important ressortant de l'analyse des résultats n'est pas en faveur des AVP mais plutôt des AVC, avec le constat que la méthode développée pour corriger les apports verticaux est fort prometteuse. En effet, les résultats obtenus en validation à la suite d'un tel calage montrent une amélioration médiane de 0,04 point de NS, que ce soit par rapport au forçage par PB ou AVP. C'est donc dire qu'avec notre méthode de correction des apports verticaux, non seulement on peut s'affranchir du module de fonte de neige de MOHYSE, mais on peut également valoriser l'information fournie par les relevés bimensuels de neige et ainsi améliorer nos résultats. Cette observation est d'autant plus intéressante que cette modification se situe, d'un point de vue opérationnel, en amont de l'utilisation du modèle hydrologique. Il est donc possible d'envisager que l'application de cette méthode corrective à des modèles plus performants ou mieux adaptés à certaines situations entraînerait aussi de meilleurs résultats.

Il convient de commenter quelque peu les scores de NS obtenus. En effet, il est fréquemment admis qu'un score au dessus de 0,7 indique une bonne qualité ; or, on constate qu'en validation, même le troisième quartile n'atteint pas ce taux. Il faut cependant garder en tête les éléments suivants ; premièrement, dans le cadre de notre projet, le modèle hydrologique utilisé, MOHYSE, est extrêmement simple, car le but n'est pas nécessairement d'obtenir une prévision très précise tout au long de l'année, mais

Tableau 4.1 – NS obtenus suivant les calages « locaux »

Calage : Novembre 2000 – Novembre 2004

type d'entrée	1 ^{er} quartile	médiane	3 ^e quartile
PB	0,62	0,71	0,78
AVP	0,58	0,66	0,76
AVC	0,62	0,67	0,78

Validation : Novembre 2004 – Novembre 2008

PB	0,49	0,58	0,65
AVP	0,50	0,58	0,66
AVC	0,51	0,62	0,68

plutôt de répondre aux urgences sporadiques pouvant survenir sur le territoire. De plus, tous les résultats présentés sont, nous le rappelons, obtenus en simulation sans qu'aucune mise à jour n'ait été effectuée. Dans un contexte opérationnel réel, il est bien évident qu'une mise à jour des variables d'états en fonction des débits observés serait effectuée (WMO, 1992).

À la vue de ces résultats, nous avons décidé d'utiliser comme entrée de base les AVC. De ce fait, dans les sections suivantes, lorsque nous référerons aux résultats « locaux » lors des comparaisons, il est bon de se rappeler que nous parlerons en fait du calage local obtenu avec les apports verticaux corrigés en continu en entrée.

L'obtention des résultats « locaux » est certes intéressante, mais l'objectif final de ce mémoire consiste à obtenir des résultats concrets et satisfaisants sur des BNJ. Nous nous servons donc de résultats « locaux » comme cible à atteindre, car nous considérons ces résultats comme étant les meilleures simulations possibles du modèle, et tentons ensuite de nous en approcher le plus possible avec des techniques de régionalisation.

4.4 Résultats aux sites non jaugés

La présentation des résultats aux sites non jaugés s'effectuera en trois parties. Tout d'abord, nous dévoilerons les résultats issus du calage « global » puis ceux du calage « global P locaux » et finalement, nous exposerons les résultats d'interpolation par krigeage. Afin d'éviter toute confusion, nous rappelons que bien que nous parlions de résultats aux sites non jaugés, tous les résultats présentés ici sont en fait des résultats

obtenus sur les différents bassins de notre échantillon, qui sont jaugés. C'est en quelque sorte une validation croisée où l'on valide notre jeu « global » sur chacun des bassins. Le nom de la section fait donc référence au fait que l'objectif est d'exposer les techniques développées pour la simulation de BNJ.

4.4.1 Détermination théorique des paramètres d'écoulement

Comme nous l'avons mentionné dans la méthode, il apparaissait impossible de simuler sur tous les bassins du sud québécois en utilisant un même hydrogramme unitaire. Nous avons donc déterminé le temps de montée selon la formule de Watt et Chow (1985) ; les temps de réaction ainsi calculés sont présentés au tableau B.2 de l'annexe B dans lequel sont aussi disponibles les temps de montées transformés en pas de temps de trois heures à la suite de l'ajout de 1h30 au temps de réaction.

Pour la décrue, nous avons décidé de caler un paramètre déterminant le poids relatif de la descente par rapport à la montée. Un exemple visuel de l'effet de ce coefficient est présenté à la figure 4.3. Le point surprenant est que, lors du calage, le coefficient de décrue optimal était de un, ce qui implique qu'en fait le débit chute instantanément après la crue. Notre première hypothèse pour expliquer cette baisse a d'abord été de croire que la formule de Watt et Chow (1985) surestimait les temps de montées et qu'ainsi, pour compenser, le modèle descendait de façon brusque après la montée. Nous avons donc refait cette partie d'optimisation en diminuant les temps de montée par pas de 10% jusqu'à 30% du temps initialement estimé par la formule. Le constat fut surprenant : le temps de décrue restait nul jusqu'à environ 50%, pour ensuite augmenter légèrement. Comme les temps initialement calculés avaient été jugés cohérents avec la réalité, nous avons conclu qu'il était peu probable que les temps aient autant été surestimés. Il faut donc accepter cette décrue « inexistante », puisque c'est bel et bien ce que donne le calage. Il est toutefois possible d'expliquer l'origine de ce phénomène ; en fait, pour le modèle, la meilleure décrue possible ne se fait pas à l'aide de l'hydrogramme unitaire, mais plutôt avec les réservoirs de routage. Ainsi, lors du calage, les plus forts gains sont réalisés en augmentant les temps de vidange des réservoirs et non la décrue.

4.4.2 Calage « global »

La qualité des résultats obtenus ici est plus difficilement quantifiable. Les temps de calcul pour une optimisation globale étant très longs, il n'a pas été possible d'utiliser la méthode de validation croisée consistant à exclure chacun des bassins tour à tour

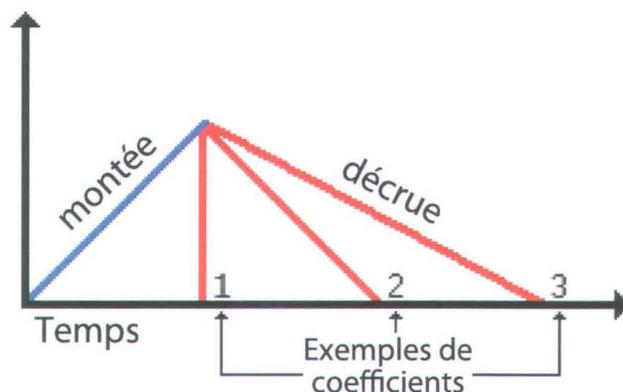


FIGURE 4.3 – Illustration de l'effet du coefficient de décrue.

pour ensuite évaluer les performances de la méthode sur ce bassin exclu. De ce fait, les résultats ne reflètent pas exactement la réalité d'un bassin non jaugé, puisque chacun des bassins a contribué au calage. On peut cependant considérer qu'étant donnée la nature hétérogène tant au niveau géographique, géologique qu'hydrologique des bassins versants étudiés, l'influence des bassins pris un à la fois est relativement faible et donc que les résultats reflètent bien la réalité. Les résultats de la première technique, consistant à simplement obtenir un jeu de paramètres unique pour tout l'échantillon, sont présentés au tableau 4.2 et sont comparés avec les résultats « locaux ».

Tableau 4.2 – Comparaison des NS « global » – « locaux »

Calage : Novembre 2000 – Novembre 2004				
Type de calage	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^e quartile	
« Locaux »	0,62	0,67	0,78	
« Global »	0,35	0,49	0,58	
Validation : Novembre 2004 – Novembre 2008				
« Locaux »	0,51	0,62	0,68	
« global »	0,37	0,49	0,55	

Le premier constat est une diminution de la qualité des résultats lors du passage d'un jeu calé localement à un jeu calé globalement, ce qui n'est pas du tout surprenant puisque la spécialisation possible lors du calage local n'est pas envisageable lors du calage global sur une étendue de territoire telle que le Québec. Toutefois, en comparant les valeurs en calage avec celles en validation, on note un aspect fort intéressant constaté en calage global. En effet, alors que normalement les résultats sont dégradés par le fait

de passer de la période de calage à la période de validation, cette dégradation est très faible, voire inexistante lorsque l'on regarde les résultats globaux. Cela nous pousse à croire que l'outil global n'est en fait que très peu spécialisé sur les bassins versants et reproduit plutôt bien les phénomènes communs à tous les bassins. Il est donc fort probable que l'application de ce jeu sur un bassin réellement non jaugé fournisse des résultats similaires puisque l'influence des données utilisées lors du calage apparaît comme très faible.

4.4.3 Calage « global P locaux »

Le tableau 4.3 présente le résumé des 480 différents jeux de paramètres testés au cours de la partie « global P locaux ». Il n'est pas surprenant que les résultats issus d'un tel calage soient systématiquement meilleurs que les résultats globaux, puisque l'on permet au modèle une légère spécialisation par rapport au bassin versant sur lequel le calage est effectué. Le calage global ayant à peu près exclu tout type de spécialisations, les caractères spécifiques des bassins peuvent s'ajuster quelque peu à l'aide du paramètre calé localement.

Ce qui est plutôt étonnant dans ces résultats est le fait que nous soyons en présence de cinq des six paramètres donnant des résultats à peu près semblables, tandis que le sixième, C_{Etp} , présente des valeurs significativement au-dessus des autres paramètres. Suivant ce constat il devient pertinent de se concentrer sur ce dernier coefficient afin de trouver une possibilité pour le régionaliser et ainsi en quelque sorte le spécialiser sans avoir recours au calage.

4.4.4 Résultats d'interpolation par krigeage

Maintenant que nous avons déterminé que le paramètre C_{Etp} permettait les meilleures améliorations par rapport au jeu de paramètres global, nous avons interpolé ce paramètre sur le domaine d'application de cette étude. L'interpolation, effectuée à l'aide d'*ArcGIS* était un krigeage ordinaire basé sur un variogramme exponentiel anisotrope que l'on peut voir à la figure 4.4. La figure 4.5 présente visuellement les résultats obtenus ; on constate que la distribution des valeurs n'est pas aléatoire et qu'il est possible d'observer une tendance géographique. Cette figure représente le krigeage de tous les bassins de l'étude, tandis que le tableau 4.4 présente le résumé des résultats obtenus cette fois-ci avec une méthode de validation croisée. Ainsi, chacun des résultats individuels des bassins a été obtenu en excluant le bassin concerné afin de correcte-

Tableau 4.3 – Comparaison des différents NS « global P locaux »
 Novembre 2000 – Novembre 2004

Type de calage	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^e quartile
« Locaux »	0,62	0,67	0,78
« Global »	0,35	0,49	0,58
« Global C_{Etp} locaux »	0,49	0,59	0,70
« Global C_{Tr} locaux »	0,41	0,55	0,65
« Global V_{Max} locaux »	0,43	0,52	0,61
« Global C_{VA} locaux »	0,39	0,51	0,60
« Global C_V locaux »	0,40	0,53	0,59
« Global C_A locaux »	0,39	0,51	0,57
Novembre 2004 – Novembre 2008			
« Locaux »	0,51	0,62	0,68
« Global »	0,37	0,49	0,55
« Global C_{Etp} locaux »	0,46	0,57	0,62
« Global C_{Tr} locaux »	0,39	0,51	0,60
« Global V_{Max} locaux »	0,40	0,53	0,58
« Global C_{VA} locaux »	0,39	0,51	0,60
« Global C_V locaux »	0,40	0,53	0,59
« Global C_A locaux »	0,39	0,51	0,57

ment simuler le comportement d'interpolation puisque la méthode de krigeage honore les points de mesure.

À la vue des résultats issus de l'interpolation, on constate que le fait d'utiliser des valeurs issues du jeu « global C_{Etp} interpolé » permet d'améliorer la performance en validation lorsque l'on compare au jeu « global ». De plus, si l'on compare les résultats « locaux » et « global C_{Etp} interpolé » médians lors de la période de validation, la détérioration des scores de NS n'est que de 0,1, ce qui paraît être un coût raisonnable pour être en mesure de simuler sur des BNJ. Ce comportement pourra être exploité puisqu'il permet d'avoir de bonne performance sur un bassin malgré l'utilisation de paramètres prédéterminés. Par ricochet, ceci implique qu'il est possible d'obtenir des performances du même genre sur des bassins non jaugés.

Le tableau 4.5 présente les paramètres nécessaires pour simuler sur les bassins non jaugés. Ces paramètres doivent être utilisés avec le code présenté en annexe E. Afin

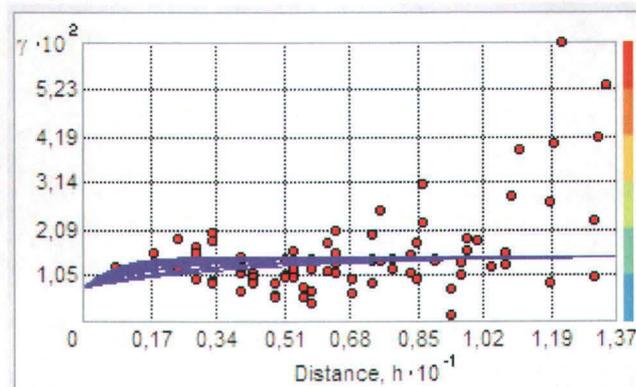


FIGURE 4.4 – Variogramme exponentiel anisotrope ajusté par *ArcGIS*

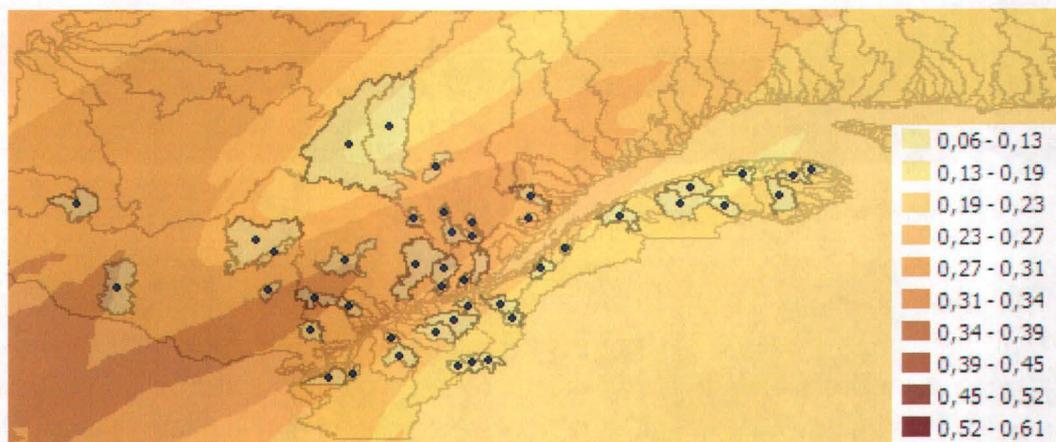


FIGURE 4.5 – Résultats du krigeage ordinaire pour le paramètre C_{Etp}

Tableau 4.4 – Comparaison des différents NS avec « global C_{Etp} interpolé »

Novembre 2000 – Novembre 2004			
Type de calage	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^e quartile
« Locaux »	0,62	0,67	0,78
« Global »	0,35	0,49	0,58
« Global C_{Etp} locaux »	0,49	0,59	0,70
« Global C_{Etp} interpolé »	0,39	0,49	0,63
Novembre 2004 – Novembre 2008			
« Locaux »	0,51	0,62	0,68
« Global »	0,37	0,49	0,55
« Global C_{Etp} locaux »	0,46	0,57	0,62
« Global C_{Etp} interpolé »	0,38	0,52	0,58

d'utiliser les résultats « Global C_{Etp} interpolé », il faut remplacer le paramètre C_{Etp} par une moyenne du paramètre cartographié en annexe E sur le bassin voulu. On fournit cependant le paramètre C_{Etp} « Global » afin d'offrir la possibilité de simuler en mode « Global » si le lecteur ne souhaite pas favoriser la méthode « Global C_{Etp} interpolé »

Tableau 4.5 – Paramètres globaux sur le sud du Québec du modèle MOHYSE

Paramètre	Valeur
C_{Etp}	0,5096
C_{Tr}	0,9123
V_{Max}	331,04
C_{VA}	0,0232
C_V	0,0147
C_A	0,0082



Chapitre 5

Conclusions et perspectives

Il convient maintenant de faire un bref retour sur le travail accompli au cours de ce mémoire. Dans un premier temps, rappelons que l'objectif de notre travail, qui découlait d'une volonté du Centre d'expertise hydrique du Québec, était de développer une méthode permettant la mise en place d'un modèle hydrologique simple pour la prévision hydrologique sur le sud du Québec. De plus, cette méthode devait être à la fois applicable sur les bassins versants jaugés, mais aussi pour les bassins non jaugés. Une autre particularité du mémoire était liée à une contrainte méthodologique ; il nous apparaissait en effet essentiel de développer des méthodes ne nécessitant qu'un minimum d'information, afin qu'une collecte fastidieuse de données ne vienne pas entraver la mise en place rapide souhaitée par l'organisme partenaire.

Lors du second chapitre, un survol de la littérature sur la question de la modélisation nous a permis de tirer profit des différentes études antérieures ; nous avons divisé les principaux concepts nécessaires à notre projet en trois catégories principales. Premièrement, nous avons vu que le prévisionniste peut choisir parmi une multitude d'outils afin de l'assister dans son travail de prévision hydrologique. Dans le cadre de nos objectifs, l'attention était essentiellement portée sur un modèle hydro-météorologique, c'est-à-dire utilisant en entrée la météorologie et donnant des débits en sortie. Tel que montré par un survol des travaux similaires, il existe plusieurs distinctions au sein de ce type de modèle ; en effet, ils peuvent par exemple être empiriques ou conceptuels, distribués ou globaux, ou encore, événementiels ou fonctionnant en continu. Notre choix s'est arrêté, par simplicité, sur un modèle conceptuel global et continu. Toujours dans le cadre de la revue théorique, nous avons mentionné des modèles simples. Bien qu'il existe de nombreux choix de modèles ayant tous certaines spécificités, il a été montré qu'en réalité plusieurs se ressemblent et que le choix final dépendra essentiellement non pas de la façon dont opère le modèle, mais plutôt de l'application souhaitée, plusieurs ayant été

développés pour des raisons bien précises. Troisièmement, la question de la méthode d'optimisation a été abordée. Les avantages et inconvénients de l'optimisation manuelle et des différentes méthodes d'optimisation automatiques ont été cités. Finalement, nous nous sommes attardés à l'aspect de régionalisation de ces modèles. C'est d'ailleurs cet aspect qui, à notre avis, est le moins documenté dans la littérature lorsque l'on se place d'un point de vue opérationnel. Forts de ces connaissances théoriques, nous avons ensuite proposé une méthode précise afin d'atteindre, étape par étape, les objectifs que nous nous étions fixés.

Le troisième chapitre de ce mémoire a permis d'en exposer la méthode. Afin d'effectuer notre étude, nous avons sélectionné 46 bassins versants couvrant 22,6 % du territoire des régions hydrologiques 01 à 06 du Québec. Les autres régions ont été exclues, car la densité des stations météorologiques y était trop faible. Ces bassins présentaient tous un historique fiable de débits de huit ans, soit de novembre 2000 à novembre 2008. Nous avons ensuite défini notre méthode d'optimisation pour les calages « locaux », qui consistait à choisir parmi 24 germes les paramètres maximisant le critère de Nash-Sutcliffe. Ces paramètres, rappelons-le, étaient obtenus à l'aide de l'algorithme de calage SCE-UA. Nous avons ensuite présenté le modèle choisi, MOHYSE, ce qui nous a permis de séparer les paramètres en trois groupes aux fonctions distinctes. Cette séparation en trois catégories allait nous permettre d'effectuer différents types de calage sur l'un ou l'autre des groupes de paramètres en fonction du type d'entrée choisi. En explorant les différents types d'entrées pour les calages « locaux », soit les précipitations ou les apports verticaux, nous avons été confrontés à un problème de bilan en eau annuel résultant de la méthode de correction des équivalents en eau de la neige. Afin de corriger ce problème, une méthode novatrice de correction des apports verticaux a donc été développée.

Il était ensuite nécessaire de développer une méthode distincte pour notre deuxième objectif, c'est-à-dire l'utilisation sur les bassins non jaugés. Pour ce faire, il était nécessaire de procéder par étapes ; tout d'abord, la fonction objectif a été modifiée, afin de trouver un jeu unique à tous les bassins produisant des résultats satisfaisants.

Pour créer ce jeu global, il fût jugé nécessaire de déterminer de façon théorique les paramètres relatifs à l'hydrogramme unitaire. Cette détermination théorique a été basée sur un hydrogramme unitaire triangulaire, dont la montée était déterminée à partir du temps de réaction tel que défini dans Watt et Chow (1985). La décrue, pour sa part, était fixée par un pourcentage de la montée commun à tous les bassins, ce temps de décrue, suite au calage, s'est avéré être nul. Il est possible de croire qu'une compensation à lieu au sein du modèle et bien que ce n'était pas ce qui était souhaité dans le présent contexte, il serait intéressant d'explorer cet aspect. Munis de ce jeu global, nous avons

ensuite calé localement tour à tour chacun des paramètres pour finalement interpoler par krigeage l'un de ceux-ci et ainsi obtenir un jeu de paramètres régionalisé.

Finalement, au chapitre quatre, les différents résultats obtenus tout au long de ce projet ont été présentés de façon synthétique. Lors des calages « locaux », il a été possible de conclure que la méthode permettant de corriger les apports verticaux en continu était la plus intéressante, puisqu'elle permettait d'obtenir une amélioration médiane de 0,04 de NS par rapport aux autres modes de forçage. L'un des principaux apports de ce mémoire est donc d'avoir permis l'élaboration d'une technique novatrice de correction en continu des apports verticaux par assimilation de relevés de neige.

Les objectifs de régionalisation ont aussi été atteints. Il a été montré que ces techniques de simulation sur BNJ n'étaient pas très pénalisantes, faisant passer les résultats médians du coefficient de Nash-Sutcliffe de 0,62 pour les résultats « locaux » à 0,49 et 0,52 pour les résultats du calage « global » et « global C_{Etp} interpolé » respectivement. Cette diminution de 0,1 nous paraît un prix raisonnable à payer afin d'être en mesure de simuler sur les BNJ. En outre, la volonté initiale de développer une méthode facilement applicable et ne demandant que peu de données a également été comblée. Effectivement, seules la superficie, la latitude moyenne, la longueur du cours d'eau principal et la pente 85-10 sont nécessaires à la simulation globale sur les territoires non jaugés, informations étant toutes disponibles à partir d'un modèle numérique de terrain. Il est important de mentionner qu'outre les résultats obtenus, l'approche du calage « global » en soi est novatrice ouvrant la voie sur une nouvelle façon d'aborder la modélisation de BNJ.

En somme, à la vue de nos résultats, nous sommes à même de conclure que les objectifs de ce mémoire ont été atteints avec succès. Il est néanmoins possible d'identifier certaines perspectives de recherche qu'il n'a pas été possible de réaliser dans le cadre de cette maîtrise, mais qui seraient intéressantes à explorer. Premièrement, il serait intéressant d'effectuer un calage global en utilisant une méthode de validation croisée. Puisqu'il aurait fallu faire le calage à 46 reprises et que le calage « global » nécessitait environ une semaine de calcul, nous avons dû exclure cette option. Cependant, il serait possible de paralléliser ces opérations sur une grappe de calcul et ainsi pousser cet aspect du mémoire. Ensuite, il serait aussi possible de tester la méthode du calage global sur un modèle plus complexe ou plus performant que MOHYSE ; il serait ainsi possible de vérifier si la robustesse du calage « global » est principalement due à celle de MOHYSE ou plutôt à la fonction objectif globale. Il serait finalement aussi pertinent de vérifier si l'interpolation géospatiale d'un paramètre serait applicable dans le cas où le modèle serait plus complexe.

Bibliographie

- ANCTIL, F., ROUSSELLE, J. et LAUZON, N. (2005). *Hydrologie : cheminements de l'eau*. Presses internationales Polytechnique, Montréal.
- ARHEIMER, B. (2005). Evaluation of water quantity and quality modelling in ungauged European basins. *Predictions in Ungauged Basins : Promises and Progress*, IAHS Publication 303:99–107.
- BÁRDOSY, A. et HE, Y. (2006). Application of a nearest neighbour method to a conceptual rainfall-runoff model. *Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering Philadelphia*.
- BELDRING, S., ENGELAND, K., ROALD, L., SAELTHUN, N. et VOKSO, A. (2003). Estimation of parameters in a distributed precipitation-runoff model for Norway. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(3):304–316.
- BERGSTRÖM, S. (2006). Experience from applications of the hbv hydrological model from the perspective of prediction in ungauged basins. *Large sample basin experiments for hydrological model parametrization : Results of the model parameter experiment – MOPEX*, IAHS Publication 307:97–107.
- BERGSTRÖM, S. et FORSMAN, A. (1973). Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model. *Nordic hydrology*, 4(3):147–170.
- BERTHET, L., ANDREASSIAN, V., PERRIN, C. et JAVELLE, P. (2009). How crucial is it to account for the antecedent moisture conditions in flood forecasting? Comparison of event-based and continuous approaches on 178 catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6):819–831.
- BEVEN, K. et KIRKBY, M. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1):43–69.
- BOYLE, D., GUPTA, H. et SOROOSHIAN, S. (2000). Toward improved calibration of hydrologic models : Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36(12):3663–3674.
- BRAS, R. et RODRIGUEZ-ITURBE, I. (1985). *Random Functions and Hydrology*, 559 pp. Addison-Wesley-Longman, Reading, Mass.

- CAMPBELL, E. et BATES, B. (2001). Regionalization of rainfall-runoff model parameters using Markov Chain Monte Carlo samples. *Water Resources Research*, 37(3):731–739.
- CENTRE D'EXPERTISE HYDRIQUE DU QUÉBEC (CEHQ). (2001). *Plan d'action 2001–2002*. Bibliothèque nationale du Québec.
- CHOW, V., MAIDMENT, D. et MAYS, L. (1988). Applied hydrology. *Department of Civil, Environmental & Chemical Engineering, Youngstown State University, Ohio*. Course Notes.
- CLARKE, R. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology*, 19(1):1–20.
- DUAN, Q. (2003). Global optimization for watershed model calibration. *Duan, Q., Gupta, H.V., Sorooshian, S., Rousseau, A.N. et Turcotte, R. Calibration of Watershed Models*, Water Science and Applications Series Volume 6:89–104.
- DUAN, Q. (2005). Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) Method. *Matlab Central File Exchange*. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7671>.
- DUAN, Q., SOROOSHIAN, S. et GUPTA, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4):1015–1031.
- FORTIN, J. P., TURCOTTE, R., MASSICOTTE, S., MOUSSA, R., FITZBACK, J. et VILLENEUVE, J. P. (2001). Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I : Description of model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2):91–99.
- FORTIN, V., FORTIER FILION, T.-C., TURCOTTE, R., FAVRE, A.-C. et SAÏD, M. (2011). Présentation et application d'une modélisation hydrologique simple à des bassins versants jaugés et non jaugés du Québec. Partie I. *En préparation*.
- FORTIN, V., OUARDA, T. B. M. J., RASMUSSEN, P. F. et BOBÉE, B. (1997). Revue bibliographique des méthodes de prévision des débits. *Revue des Sciences de l'Eau*, 10(4):461–487.
- FORTIN, V. et TURCOTTE, R. (2006). *Le modèle hydrologique MOHYSE*. Notes de cours pour SCA7420. Université du Québec à Montréal : Département des sciences de la terre et de l'atmosphère.
- GLOSSAIRE INTERNATIONAL D'HYDROLOGIE, UNESCO (page consultée en 2009). Modèle hydrologique conceptuel. <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/FR/GF0225FR.HTM>.
- GOLDBERG, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley.
- GOODRICH, D., SCHMUGGE, T., JACKSON, T., UNKRICH, C., KEEFER, T., PARRY, R., BACH, L., AMER, S. et USDA, A. (1994). Runoff simulation sensitivity to remotely sensed initial soil water content. *Water Resources Research*, 30(5):1393–1405.

- GUPTA, H., KLING, H., YILMAZ, K. et MARTINEZ, G. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2):80–91.
- HUNDECHA, Y., OUARDA, T. et BÁRDOSSY, A. (2008). Regional estimation of parameters of a rainfall-runoff model at ungauged watersheds using the “spatial” structures of the parameters within a canonical physiographic-climatic space. *Water Resources Research*, 44(1):W01427.
- LAMB, R. et KAY, A. (2004). Confidence intervals for a spatially generalized, continuous simulation flood frequency model for great britain. *Water Resources Research*, 40(7):W07501, doi :10.1029/2003WR002428.
- LINSLEY, R. (1982). Rainfall-runoff models-An overview. *Rainfall-runoff relationship*, V. P. Singh (Ed.), *Water Ressources Publications*, pages 3–22.
- MEIN, R. et BROWN, B. (1978). Sensitivity of optimized parameters in watershed models. *Water Resources Research*, 14(2):299–303.
- MERZ, R. et BLÖSCHL, G. (2004). Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 287(1-4):95 – 123.
- MERZ, R., BLÖSCHL, G. et PARAJKA, J. (2006). Regionalization methods in rainfall-runoff modelling using large catchment samples. *Large sample basin experiments for hydrological model parametrization : Results of the model parameter experiment – MOPEX*, IAHS Publication 307:117–125.
- MICHEL, C. (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *Houille blanche(Grenoble)*, 38(1):39–44.
- Ministère du développement durable, Environnement et Parcs, Gouvernement du QUÉBEC (2002). *Surveillance du climat, Réseau et paramètres*. [http ://www.mddep.gouv.qc.ca/climat/surveillance/index.asp](http://www.mddep.gouv.qc.ca/climat/surveillance/index.asp). Consultée en septembre 2009.
- MOORE, R. J., BELL, V. A. et JONES, D. A. (2005). Forecasting for flood warning. *Comptes Rendus Geosciences*, 337(1-2):203–217.
- NASH, J. et SUTCLIFFE, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part i – a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3):282–290.
- LOUDIN, L., ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C., MICHEL, C. et LE MOINE, N. (2008). Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments : A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44(3):W03413.
- PERRIN, C. (2000). *Vers une amélioration d’un modèle global pluie-débit au travers d’une approche comparative*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

- PERRIN, C., MICHEL, C. et ANDRÉASSIAN, V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, 242(3-4):275–301.
- POLI, R., LANGDON, W. et MCPHEE, N. (2008). *A field guide to genetic programming*. Lulu Enterprises Uk Ltd.
- PRESS, W., FLANNERY, B., TEUKOLSKY, S. et VETTERING, W. (1989). *Numerical Recipes in Pascal*, chapitre 10, pages 318–322. Cambridge University Press, New York.
- REED, S., KOREN, V., SMITH, M., ZHANG, Z., MOREDA, F., SEO, D.-J. et DMIP PARTICIPANTS, a. (2004). Overall distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrology*, 298(1-4):27–60.
- SEFTON, C. et HOWARTH, S. (1998). Relationships between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales. *Journal of Hydrology*, 211(1-4):1–16.
- SITTNER, W. (1976). World Meteorological Organization project on intercomparison of conceptual models used in hydrological forecasting. *Hydrol. Sci. Bull*, 21:203–213.
- SIVAPALAN, M., TAKEUCHI, K., FRANKS, S., GUPTA, V., KARAMBIRI, H., LAKSHMI, V., LIANG, X., McDONNELL, J., MENDIONDO, M., O'CONNELL, P., OKI, T., POMEROY, J., SCHERTZER, D., UHLENBROOK, S. et ZEHE, E. (2003). IAHS decade on prediction in ungauged basins (PUB), 2003-2012 : Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques*, 48(6):857–880.
- SMITH, M. B., SEO, D.-J., KOREN, V. I., REED, S. M., ZHANG, Z., DUAN, Q., MOREDA, F. et CONG, S. (2004). The distributed model intercomparison project (DMIP) : motivation and experiment design. *Journal of Hydrology*, 298(1-4):4–26.
- SUGIURA, K., OHATA, T. et YANG, D. (2006). Catch characteristics of precipitation gauges in high-latitude regions with high winds. *Journal of Hydrometeorology*, 7(5):984–994.
- TURCOTTE, R. (2010). *Éléments du calage et de l'implantation d'un modèle hydrologique dans une perspective d'utilisation opérationnelle en prévision hydrologique*. Thèse de doctorat, INRS-Eau, Terre et Environnement.
- TURCOTTE, R., FAVRE, A. C., LACOMBE, P., POIRIER, C. et VILLENEUVE, J. P. (2005). Estimation des débits sous glace dans le sud du Québec : comparaison de modèles neuronal et déterministe. *Revue canadienne de génie civil*, 32(6):1039–1050.
- TURCOTTE, R., FORTIER FILION, T.-C., LACOMBE, P., FORTIN, V., ROY, A. et ROYER, A. (2010). Simulation hydrologique des derniers jours de la crue de printemps : le problème de la neige manquante. *Hydrological Sciences Journal*, 55(6):872–882.

- TURCOTTE, R., FORTIN, L. G., FORTIN, V., FORTIN, J. P. et VILLENEUVE, J. P. (2007). Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Quebec, Canada. *Nordic Hydrology*, 38(3):211–234.
- TURCOTTE, R., LACOMBE, P., DIMNIK, C. et VILLENEUVE, J. P. (2004). Préviation hydrologique distribuée pour la gestion des barrages publics du Québec. *Revue canadienne de génie civil*, 31(2):308–320.
- VALERY, A. (2010). *Modélisation précipitations – débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants*. Thèse de doctorat, L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParis-Tech).
- VANDEWIELE, G. et ELIAS, A. (1995). Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. *Journal of Hydrology*, 170(1-4):277–291.
- VELÁZQUEZ, J.-A., ANCTIL, F. et PERRIN, C. (2010). Performance and reliability of multimodel hydrological ensemble simulations based on seventeen lumped models and a thousand catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14:2303–2317.
- VRUGT, J., GUPTA, H., BOUTEN, W. et SOROOSHIAN, S. (2003). A shuffled complex evolution metropolis algorithm for estimating posterior distribution of watershed model parameters. *Duan, Q., Gupta, H.V., Sorooshian, S., Rousseau, A.N. et Turcotte, R. Calibration of Watershed Models*, Water Science and Applications Series Volume 6:105–112.
- WATT, W. et CHOW, K. (1985). A general expression for basin lag time. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12(2):294–300.
- WESTERBERG, I., GUERRERO, J., YOUNGER, P., BEVEN, K., SEIBERT, J., HALLDIN, S., FREER, J. et XU, C. (2010). Calibration of hydrological models using flow-duration curves. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7:9467–9522.
- WMO (1992). Simulated real-time intercomparison of hydrological models, WMO operational hydrology report no 38, WMO no 779. *World Meteorological Organisation, Geneva*.
- YOUNG, A. (2006). Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 320(1-2, Sp. Iss. SI):155–172.
- ZEHE, E. et BLÖSCHL, G. (2004). Predictability of hydrologic response at the plot and catchment scales : Role of initial conditions. *Water Resources Research*, 40. W10202, doi :10.1029/2003WR002869.



Annexe A

Codes pour executer MOHYSE

Cette section comprend quatre versions du code : celle fonctionnant avec les précipitations brutes, celle fonctionnant avec les apports verticaux et finalement celles utilisant les paramètres globaux ou interpolés avec soit les apports verticaux, soit les précipitations brutes. Il est à noter que pour chaque section deux scripts sont présent : `mohyse.f` et `MOHYSE_SIMULATION.f`

A.1 Codes PB locaux

Cette section présente le code Fortran permettant l'exécution de MOHYSE avec les jeux « Locaux » utilisant les précipitations brutes en intrants.

```
1 MOHYSE_SIMULATION(TH,K,B,L,DT,NAN,N,JD,MET,E,H,QS)
2
3 C Variables d'entrées :
4 C TH : Vecteur des paramètres
5 C K : Dimension de l'hydrogramme unitaire (en pas de temps)
6 C B : Superficie du bassin versant (km2)
7 C L : Latitude du bassin versant (Degrés)
8 C DT : Durée en heure d'un pas de temps
9 C JD : Jour julien de chaque pas de temps pour la météorologie observée
10 C N : Nombre de pas de temps
11 C MET : Météorologie observée (3xN)
12 C 1) Pluie (MM)
13 C 2) Neige (MM)
14 C 3) Température (C)
15 C
16 C Variables internes :
17 C E : Reservoirs d'eau pour le bilan vertical (3)
18 C H : Eau en transit vers l'exutoire (K)
19 C U : Forme de l'hydrogramme unitaire
20 C
```

```

21 C Variable de Sortie :
22 C QS : Débit simulé (m3/s)
23 C
24 C Début du code :
25 C
26     IMPLICIT NONE
27 C
28 C PARAMETERS
29     INTEGER K,N,JD(N)
30     REAL B,L,DT,NAN,TH(10),MET(3,N),E(3),h(k),QS(N)
31 C
32 C LOCAL VARIABLES
33     INTEGER I,NOK
34     REAL SUM,U(K)
35 C
36 C COMPUTE THE SHAPE OF THE UNIT HYDROGRAPH
37     SUM = 0
38     DO I=1,K
39         U(I) = I**((TH(9)-1)*EXP(-I/TH(10)))
40         SUM = SUM + U(I)
41     END DO
42     DO I=1,KU
43         U(I) = (I) / SUM
44     END DO
45 C
46 C CALL MOHYSE FOR EACH TIME STEP
47     DO I=1,N
48         CALL MOHYSE(K,B,L,DT,TH,U,JD(I),MET(3,I),E,H,QS(I))
49     END DO
50
51     END

1     SUBROUTINE mohyse(
2     1  membv,airebv,latbv,dt,theta,hydun,jjulien,meteo,
3     2  etat,eauhydun,debit)
4
5 C Variables d'entrées :
6 C theta : Vecteur des paramètres
7 C membv : Dimension de l'hydrogramme unitaire (en pas de temps)
8 C hydun Forme de l'hydrogramme unitaire
9 C airebv : Superficie du bassin versant (km2)
10 C latbv : Latitude du bassin versant (Degrés)
11 C dt : Durée en heure d'un pas de temps
12 C jjulien : Jour julien de chaque pas de temps pour la météorologie observée
13 C meteo : Météorologie observée (3xN)
14 C 1) Pluie (MM)
15 C 2) Neige (MM)
16 C 3) Température (C)
17 C
18 C Variables internes :
19 C etat : Reservoirs d'eau pour le bilan vertical (3)
20 C eauhydun : Eau en transit vers l'exutoire (K)
21 C
22 C Variable de Sortie :
23 C debit : Débit simulé (m3/s)
24 C
25 C Début du code :
26 C
27     IMPLICIT NONE
28 C
29 C Parametres de la sous-routine

```

```

30     INTEGER nivsor ,membv ,jjulien
31     REAL airebv ,latbv ,dt ,debit
32     REAL theta (8) ,hydun (membv) ,meteo (3) ,etat (3) ,eauhydun (membv)
33     C
34     C Variables locales
35     INTEGER j
36     REAL decsol ,etp ,evapodir ,transpir ,fonte ,infil ,h1 ,h2 ,h3 ,q23
37     REAL regel ,fracregel ,lame ,rhosat ,dureejour ,sumhydun
38     C
39     C Constantes
40     REAL PI
41     PARAMETER (PI=3.1415927)
42     C
43     C Decalage de l'eau en transit
44     DO j=0 ,membv-2
45         eauhydun (membv-j)=eauhydun (membv-j-1)
46     END DO
47     C
48     C Calcul de l'evapotranspiration potentielle
49     decsol=.41*SIN ((jjulien-80)/365.*2*PI)
50     rhosat=1.3*EXP ((17.3*meteo (3))/(238.+meteo (3)))
51     dureejour=24./PI*ACOS (-TAN (latbv*PI/180.)*TAN (decsol))
52     etp=theta (1)*dureejour/12*rhosat/2.6
53     C
54     C Calcul de l'evaporation directe et de la transpiration
55     evapodir=MIN (meteo (1) ,etp)
56     transpir=MIN (theta (2)*etat (2) ,etp-evapodir)
57     C
58     C Simulation du couvert nival
59     fonte=MIN ((0.0125*meteo (1)+theta (3)*dureejour)*
60     1     MAX (meteo (3)-theta (4) ,0.) ,etat (1))
61     C
62     C Calcul de l'infiltration
63     lame=meteo (1)+fonte-evapodir
64     infil=MAX (0. ,1. -(theta (7)*etat (2)+lame)/theta (5))*lame
65     C
66     C Calcul des flux
67     h1=meteo (1)+fonte-evapodir-infil
68     h2=theta (7)*etat (2)
69     h3=theta (8)*etat (3)
70     q23=theta (6)*etat (2)
71     eauhydun (1)=h1+h2
72     C
73     C Regel de l'eau en transit
74     regel=theta (3)*MAX (theta (4)-meteo (3) ,0.)
75     sumhydun=0.
76     DO j=1 ,membv
77         sumhydun=sumhydun+eauhydun (j)
78     ENDDO
79     regel=MIN (regel ,sumhydun)
80     IF (sumhydun.GT.0.) THEN
81         fracregel=1.-regel/sumhydun
82         DO j=1 ,membv
83             eauhydun (j)=eauhydun (j)*fracregel
84         ENDDO
85     ENDIF
86     C
87     C Mise a jour des variables d'etat
88     etat (1)=etat (1)+meteo (2)-fonte+regel
89     etat (2)=etat (2)+infil-transpir-q23-h2
90     etat (3)=etat (3)+q23-h3

```

```

91 C
92 C Calcul de la lame d'eau
93     debit=h3
94     DO j=1,membv
95         debit=debit+eauhydun(j)*hydun(j)
96     ENDDO
97 C
98 C Conversion en mcs
99     debit=airebv/3.6/dt*debit
100 C
101 C Impression de l'etat du systeme
102     IF(nivsor.EQ.1)THEN
103         WRITE(*,'(12F8.3,3F8.1)')meteo(1),meteo(2),meteo(3),
104         2  decsol,etp,evapodir,transpir,fonte,infil,h1,h2,h3,
105         3  etat(1),etat(2),etat(3)
106     ENDIF
107 C
108     RETURN
109     END

```

A.2 Codes AV locaux

Cette section présente le code Fortran permettant l'exécution de MOHYSE avec les jeux « Locaux » utilisant les apports verticaux en intrants, qu'ils soient corrigés ponctuellement ou en continu.

```

1 MOHYSE_SIMULATION(TH,K,B,L,DT,NAN,N,JD,MET,E,H,QS)
2
3 C Variables d'entrées :
4 C TH : Vecteur des paramètres
5 C K : Dimension de l'hydrogramme unitaire (en pas de temps)
6 C B : Superficie du bassin versant (km2)
7 C L : Latitude du bassin versant (Degrés)
8 C DT : Durée en heure d'un pas de temps
9 C JD : Jour julien de chaque pas de temps pour la météorologie observée
10 C N : Nombre de pas de temps
11 C MET : Météorologie observée (3xN)
12 C 1) Pluie (MM)
13 C 2) Neige (MM)
14 C 3) Température (C)
15 C
16 C Variables internes :
17 C E : Reservoirs d'eau pour le bilan vertical (3)
18 C H : Eau en transit vers l'exutoire (K)
19 C U : Forme de l'hydrogramme unitaire
20 C
21 C Variable de Sortie :
22 C QS : Débit simulé (m3/s)
23 C
24 C Début du code :
25 C
26     IMPLICIT NONE
27 C
28 C PARAMETERS

```

```

29      INTEGER V,VER,K,N,JD(N)
30      REAL B,L,DT,NAN,TH(10),MET(2,N),E(2),h(k),QS(N)
31      C
32      C LOCAL VARIABLES
33      INTEGER I,NOK
34      REAL SUM,U(K)
35      C
36      C COMPUTE THE SHAPE OF THE UNIT HYDROGRAPH
37      SUM = 0
38      DO I=1,K
39          U(I) = I**((TH(9)-1)*EXP(-I/TH(10)))
40          SUM = SUM + U(I)
41      END DO
42      DO I=1,K
43          U(I) = U(I) / SUM
44      END DO
45      C
46      C CALL MOHYSE FOR EACH TIME STEP
47      DO I=1,N
48          CALL MOHYSE(V,K,B,L,DT,TH,U,JD(I),MET(1,I),E,H,QS(I))
49      END DO
50      C
51      END

1      SUBROUTINE mohyse(
2          1 membv,airebv,latbv,dt,theta,hydun,jjulien,meteo,
3          2 etat,eauhydun,debit)
4
5      C Variables d'entrées :
6      C theta : Vecteur des paramètres
7      C membv : Dimension de l'hydrogramme unitaire (en pas de temps)
8      C hydun Forme de l'hydrogramme unitaire
9      C airebv : Superficie du bassin versant (km2)
10     C latbv : Latitude du bassin versant (Degrés)
11     C dt : Durée en heure d'un pas de temps
12     C jjulien : Jour julien de chaque pas de temps pour la météorologie observée
13     C meteo : Météorologie observée (3xN)
14     C 1) Pluie (MM)
15     C 2) Neige (MM)
16     C 3) Température (C)
17     C
18     C Variables internes :
19     C etat : Reservoirs d'eau pour le bilan vertical (3)
20     C eauhydun : Eau en transit vers l'exutoire (K)
21     C
22     C Variable de Sortie :
23     C debit : Débit simulé (m3/s)
24     C
25     C Début du code :
26     C
27     IMPLICIT NONE
28     C
29     C Parametres de la sous-routine
30     INTEGER nivsor,membv,jjulien
31     REAL airebv,latbv,dt,debit
32     REAL theta(8),hydun(membv),meteo(2),etat(2),eauhydun(membv)
33     C
34     C Variables locales
35     INTEGER j
36     REAL decsol,etp,evapodir,transpir,fonte,infil,h1,h2,h3,q23
37     C

```

```

38 C Constantes
39     REAL PI
40     PARAMETER (PI=3.1415927)
41 C
42 C Decalage de l'eau en transit
43     DO j=0,membv-2
44         eauhydun (membv-j)=eauhydun (membv-j-1)
45     END DO
46 C
47 C Calcul de l'evapotranspiration potentielle
48     decsol=.41*SIN((j Julien -80)/365.*2*PI)
49     etp=EXP((17.3*meteo(2))/(238.+meteo(2)))
50     etp=theta(1)/PI*ACOS(-TAN(latbv*PI/180.)*TAN(decsol))*etp
51 C
52 C Calcul de l'evaporation directe et de la transpiration
53     evapodir=MIN(meteo(1),etp)
54     transpir=MIN(theta(2)*etat(1),etp-evapodir)
55 C
56 C Simulation du couvert nival
57 C fonte=MIN(theta(3)*MAX(meteo(3)-theta(4),0.),etat(1))
58 C etat(1)=etat(1)+meteo(2)-fonte
59 C
60 C Calcul de l'infiltration
61 C infil=MAX(0.,1.-etat(2)*theta(5))*(meteo(1)+fonte-evapodir)
62     IF (etat(1).GE.theta(5)) then
63         infil = 0
64     ELSE
65         infil = (meteo(1)-evapodir)*(1-(etat(1)/theta(5)))
66     ENDIF
67 C
68 C Calcul des flux
69     h1=meteo(1)-evapodir-infil
70     h2=theta(7)*etat(1)
71     h3=theta(8)*etat(2)
72     q23=theta(6)*etat(1)
73     eauhydun(1)=h1+h2+h3
74 C
75 C Mise a jour des variables d'etat
76     etat(1)=etat(1)+infil-transpir-q23-h2
77     etat(2)=etat(2)+q23-h3
78 C
79 C Calcul de la lame d'eau
80     debit=0.
81     DO j=1,membv
82         debit=debit+eauhydun(j)*hydun(j)
83     ENDDO
84 C
85 C Conversion en mcs
86     debit=airebv/3.6/dt*debit
87 C
88 C Impression de l'etat du systeme
89     IF (nivor.EQ.1) THEN
90         WRITE(*,'(12F8.3,3F8.1)') meteo(1),meteo(2),
91         2  decsol,etp,evapodir,transpir,infil,h1,h2,h3,
92         3  etat(1),etat(2)
93     ENDIF
94 C
95     RETURN
96     END

```

A.3 Codes PB globaux

Cette section présente le code Fortran permettant l'exécution de MOHYSE avec soit le jeu « Global » soit le jeu « Global C_{Etp} interpolé » utilisant les précipitations brutes en intrants.

```

1 MOHYSE_SIMULATION(TH, K, B, L, DT, NAN, N, JD, MET, E, H, QS)
2
3 C Variables d'entrées :
4 C TH : Vecteur des paramètres
5 C K : Dimension de l'hydrogramme unitaire (en pas de temps)
6 C B : Superficie du bassin versant (km2)
7 C L : Latitude du bassin versant (Degrés)
8 C DT : Durée en heure d'un pas de temps
9 C JD : Jour julien de chaque pas de temps pour la météorologie observée
10 C N : Nombre de pas de temps
11 C MET : Météorologie observée (3xN)
12 C 1) Pluie (MM)
13 C 2) Neige (MM)
14 C 3) Température (C)
15 C
16 C Variables internes :
17 C E : Reservoirs d'eau pour le bilan vertical (3)
18 C H : Eau en transit vers l'exutoire (K)
19 C U : Forme de l'hydrogramme unitaire
20 C
21 C Variable de Sortie :
22 C QS : Débit simulé (m3/s)
23 C
24 C Début du code :
25 C
26     IMPLICIT NONE
27 C
28 C PARAMETERS
29     INTEGER V, VER, K, N, JD(N)
30     REAL B, L, DT, NAN, TH(8), MET(3, N), E(3), h(k), QS(N), Tm
31 C
32 C LOCAL VARIABLES
33     INTEGER I, NOK
34     REAL SUM, U(K)
35 C
36 C REFAIRE L'HYDROGRAMME UNITAIRE
37
38     DO I=1, K
39         IF (I .LE. Tm) then
40             U(I) = (2*I)/((Tm**2)*2.1366)
41         END IF
42         IF (I .gt. Tm) then
43             U(I) = (-2*I)/(((Tm**2)*2.1366)*(2.1366-1))+
44             1 (2/(Tm*2.1366))+2)/((Tm*2.1366)*(2.1366-1))
45         END IF
46         IF (I .gt.(2.1366*Tm)) then
47             U(I) = 0
48         END IF
49     END DO
50
51 C
52 C CALL MOHYSE FOR EACH TIME STEP

```

```

53      DO I=1,N
54          CALL MOHYSE(V,K,B,L,DT,TH,U,JD(I),MET(1,I),E,H,QS(I))
55      END DO
56  C
57      END

1      SUBROUTINE mohyse(
2          1  membv , airebv , latbv , dt , theta , hydun , jjulien , meteo ,
3          2  etat , eauhydun , debit )
4
5  C Variables d'entrées :
6  C theta : Vecteur des paramètres
7  C membv : Dimension de l'hydrogramme unitaire (en pas de temps)
8  C hydun Forme de l'hydrogramme unitaire
9  C airebv : Superficie du bassin versant (km2)
10 C latbv : Latitude du bassin versant (Degrés)
11 C dt : Durée en heure d'un pas de temps
12 C jjulien : Jour julien de chaque pas de temps pour la météorologie observée
13 C meteo : Météorologie observée (3xN)
14 C 1) Pluie (MM)
15 C 2) Neige (MM)
16 C 3) Température (C)
17 C
18 C Variables internes :
19 C etat : Reservoirs d'eau pour le bilan vertical (3)
20 C eauhydun : Eau en transit vers l'exutoire (K)
21 C
22 C Variable de Sortie :
23 C debit : Débit simulé (m3/s)
24 C
25 C Début du code :
26 C
27      IMPLICIT NONE
28 C
29 C Parametres de la sous-routine
30      INTEGER nivsor , membv , jjulien
31      REAL airebv , latbv , dt , debit
32      REAL theta ( 8 ) , hydun ( membv ) , meteo ( 3 ) , etat ( 3 ) , eauhydun ( membv )
33 C
34 C Variables locales
35      INTEGER j
36      REAL decsol , etp , evapodir , transpir , fonte , infil , h1 , h2 , h3 , q23
37 C
38 C Constantes
39      REAL PI
40      PARAMETER ( PI = 3.1415927 )
41 C
42 C Decalage de l'eau en transit
43      DO j = 0 , membv - 2
44          eauhydun ( membv - j ) = eauhydun ( membv - j - 1 )
45      END DO
46 C
47 C Calcul de l'evapotranspiration potentielle
48      decsol = .41 * SIN ( ( jjulien - 80 ) / 365 . * 2 * PI )
49      etp = EXP ( ( 17.3 * meteo ( 3 ) ) / ( 238 . + meteo ( 3 ) ) )
50      etp = theta ( 1 ) / PI * ACOS ( -TAN ( latbv * PI / 180 . ) * TAN ( decsol ) ) * etp
51 C
52 C Calcul de l'evaporation directe et de la transpiration
53      evapodir = MIN ( meteo ( 1 ) , etp )
54      transpir = MIN ( theta ( 2 ) * etat ( 2 ) , etp - evapodir )
55 C

```

```

56 C Simulation du couvert nival
57     fonte=MIN(theta(3)*MAX(meteo(3)-theta(4),0.),etat(1))
58     etat(1)=etat(1)+meteo(2)-fonte
59 C
60 C Calcul de l'infiltration
61     IF (etat(2).GE.theta(5)) then
62         infil = 0
63     ELSE
64         infil = (meteo(1)+fonte-evapodir)*(1-(etat(2)/theta(5)))
65     ENDIF
66 C
67 C Calcul des flux
68     h1=meteo(1)+fonte-evapodir-infil
69     h2=theta(7)*etat(2)
70     h3=theta(8)*etat(3)
71     q23=theta(6)*etat(2)
72     eauhydun(1)=h1+h2+h3
73 C
74 C Mise a jour des variables d'etat
75     etat(2)=etat(2)+infil-transpir-q23-h2
76     etat(3)=etat(3)+q23-h3
77 C
78 C Calcul de la lame d'eau
79     debit=0.
80     DO j=1,membv
81         debit=debit+eauhydun(j)*hydun(j)
82     ENDDO
83 C
84 C Conversion en mcs
85     debit=airebv/3.6/dt*debit
86 C
87 C Impression de l'etat du systeme
88     IF (nivosr.EQ.1)THEN
89         WRITE(*,'(12F8.3,3F8.1)')meteo(1),meteo(2),meteo(3),
90         2  decsol,etp,evapodir,transpir,fonte,infil,h1,h2,h3,
91         3  etat(1),etat(2),etat(3)
92     ENDIF
93 C
94     RETURN
95     END

```

A.4 Codes AV globaux

Cette section présente le code Fortran permettant l'exécution de MOHYSE avec soit le jeu « Global » soit le jeu « Global C_{Etp} interpolé » utilisant les apports verticaux en intrants, qu'ils soient corrigés ponctuellement ou en continu.

```

1  MOHYSE_SIMULATION(TH,K,B,L,DT,NAN,N,JD,MET,E,H,QS)
2
3  C Variables d'entrées :
4  C TH : Vecteur des paramètres
5  C K : Dimension de l'hydrogramme unitaire (en pas de temps)
6  C B : Superficie du bassin versant (km2)
7  C L : Latitude du bassin versant (Degrés)

```

```

8 C DT : Durée en heure d'un pas de temps
9 C JD : Jour julien de chaque pas de temps pour la météorologie observée
10 C N : Nombre de pas de temps
11 C MET : Météorologie observée (3xN)
12 C 1) Pluie (MM)
13 C 2) Neige (MM)
14 C 3) Température (C)
15 C
16 C Variables internes :
17 C E : Reservoirs d'eau pour le bilan vertical (3)
18 C H : Eau en transit vers l'exutoire (K)
19 C U : Forme de l'hydrogramme unitaire
20 C
21 C Variable de Sortie :
22 C QS : Débit simulé (m3/s)
23 C
24 C Début du code :
25 C
26     IMPLICIT NONE
27 C
28 C PARAMETERS
29     INTEGER V,VER,K,N,JD(N)
30     REAL B,L,DT,NAN,TH(8),MET(2,N),E(2),h(k),QS(N),Tm,somme
31 C
32 C LOCAL VARIABLES
33     INTEGER I,NOK
34     REAL SUM,U(K)
35 C
36 C COMPUTE THE SHAPE OF THE UNIT HYDROGRAPH
37     somme=0
38     DO I=1,K
39         IF (I.LE.Tm)then
40             U(I) = (2*I)/((Tm**2)*1)
41         END IF
42         IF (I.gt.Tm)then
43             U(I) = (-2*I)/(((Tm**2)*1)*(1-1))+
44             1 (2/(Tm*1))+2)/((Tm*1)*(1-1))
45         END IF
46         IF (I.gt.(1*Tm)) then
47             U(I) = 0
48         END IF
49         somme=somme+U(I)
50     END DO
51     DO I=1,K
52         U(I)=U(I)/somme
53     END DO
54 C
55 C CALL MOHYSE FOR EACH TIME STEP
56     DO I=1,N
57         CALL MOHYSE(V,K,B,L,DT,TH,U,JD(I),MET(1,I),E,H,QS(I))
58     END DO
59 C
60     END

1     SUBROUTINE mohyse(
2     1 membv,airebv, latbv, dt, theta, hydun, jjulien, meteo,
3     2 etat, eauhydun, debit)
4
5 C Variables d'entrées :
6 C theta : Vecteur des paramètres
7 C membv : Dimension de l'hydrogramme unitaire (en pas de temps)

```

```

8  C hydun Forme de l'hydrogramme unitaire
9  C airebv : Superficie du bassin versant (km2)
10 C latbv : Latitude du bassin versant (Degrés)
11 C dt : Durée en heure d'un pas de temps
12 C j julien : Jour julien de chaque pas de temps pour la météorologie observée
13 C meteo : Météorologie observée (3xN)
14 C 1) Pluie (MM)
15 C 2) Neige (MM)
16 C 3) Température (C)
17 C
18 C Variables internes :
19 C etat : Reservoirs d'eau pour le bilan vertical (3)
20 C eauhydun : Eau en transit vers l'exutoire (K)
21 C
22 C Variable de Sortie :
23 C debit : Débit simulé (m3/s)
24 C
25 C Début du code :
26 C
27     IMPLICIT NONE
28 C
29 C Parametres de la sous-routine
30     INTEGER nivor ,membv ,j julien
31     REAL airebv , latbv , dt , debit
32     REAL theta ( 8 ) , hydun (membv ) , meteo ( 2 ) , etat ( 2 ) , eauhydun (membv )
33 C
34 C Variables locales
35     INTEGER j
36     REAL decsol , etp , evapodir , transpir , fonte , infil , h1 , h2 , h3 , q23
37 C
38 C Constantes
39     REAL PI
40     PARAMETER( PI=3.1415927)
41 C
42 C Decalage de l'eau en transit
43     DO j=0,membv-2
44         eauhydun (membv-j)=eauhydun (membv-j-1)
45     END DO
46 C
47 C Calcul de l'evapotranspiration potentielle
48     decsol=.41*SIN((j julien-80)/365.*2*PI)
49     etp=EXP((17.3*meteo(2))/(238.+meteo(2)))
50     etp=theta(1)/PI*ACOS(-TAN(latbv*PI/180.)*TAN(decsol))*etp
51 C
52 C Calcul de l'evaporation directe et de la transpiration
53     evapodir=MIN(meteo(1),etp)
54     transpir=MIN(theta(2)*etat(1),etp-evapodir)
55 C
56 C Simulation du couvert nival
57 C fonte=MIN(theta(3)*MAX(meteo(3)-theta(4),0.),etat(1))
58 C etat(1)=etat(1)+meteo(2)-fonte
59 C
60 C Calcul de l'infiltration
61 C infil=MAX(0.,1.-etat(2)*theta(5))*(meteo(1)+fonte-evapodir)
62     IF (etat(1).GE.theta(5)) then
63         infil = 0
64     ELSE
65         infil = (meteo(1)-evapodir)*(1-(etat(1)/theta(5)))
66     ENDIF
67 C
68 C Calcul des flux

```

```
69      h1=meteo(1)-evapodir-infil
70      h2=theta(7)*etat(1)
71      h3=theta(8)*etat(2)
72      q23=theta(6)*etat(1)
73      eauhydun(1)=h1+h2+h3
74      C
75      C Mise a jour des variables d'etat
76          etat(1)=etat(1)+infil-transpir-q23-h2
77          etat(2)=etat(2)+q23-h3
78      C
79      C Calcul de la lame d'eau
80          debit=0.
81          DO j=1,membv
82              debit=debit+eauhydun(j)*hydun(j)
83          ENDDO
84      C
85      C Conversion en mcs
86          debit=airebv/3.6/dt*debit
87      C
88      C Impression de l'etat du systeme
89          IF(nivsor.EQ.1)THEN
90              WRITE(*,'(12F8.3,3F8.1)')meteo(1),meteo(2),
91              2  decsol ,etp ,evapodir ,transpir ,infil ,h1,h2,h3,
92              3  etat(1),etat(2)
93          ENDIF
94      C
95          RETURN
96          END
```

Annexe B

Résultats exhaustifs

Cette annexe permet de présenter les résultats détaillés sur chacun des bassins versants de notre échantillon. Les bassins y sont classés selon l'identifiant de la station de débit. Il est à remarquer que les deux premiers chiffres désignent la région hydrographique.

Le tableau B.1 présente les principales caractéristiques de l'échantillon de bassins retenus. À savoir, le nom de la rivière principale, le code de la station de débits jaugés, la superficie du bassin versant en km^2 et les coordonnées géographiques du centroïde du bassin versant.

Le tableau B.2 présente les temps de montée trouvés de façon théorique avec en cinquième colonne le nombre de PDTs suite à l'ajout d'un demi PDT, soit 1h30.

Finalement, les tableaux B.3 à B.7 exposent les NS obtenus selon les différentes approches de calage.

Tableau B.1 – Caractéristiques des bassins sélectionnés

Nom de la rivière	Code Station	Superficie [km ²]	Centroïde
Bonaventure	010802	1910	(-65,49 ; 48,54)
Nouvelle	011204	1139	(-66,53 ; 48,35)
Matapedia	011509	2756	(-67,35 ; 48,40)
York	020404	659	(-65,24 ; 48,90)
Dartmouth	020602	645	(-64,91 ; 49,04)
Sainte-Anne	021407	774	(-66,19 ; 48,96)
Matane	021601	1650	(-67,16 ; 48,70)
Rimouski	022003	1610	(-68,47 ; 48,17)
Morin	022501	254	(-69,49 ; 47,55)
Ouelle	022704	795	(-69,92 ; 47,19)
Etchemin	023303	1160	(-70,68 ; 46,53)
Beaurivage	023401	709	(-71,29 ; 46,47)
Famine	023422	691	(-70,45 ; 46,26)
Lac Mégantic	023427	749	(-70,91 ; 45,45)
Bécancour	024014	2171	(-71,56 ; 46,19)
Nicolet	030103	1540	(-71,87 ; 45,99)
Eaton	030234	642	(-71,47 ; 45,35)
Au Saumon	030282	738	(-71,21 ; 45,43)
Noire	030304	1490	(-72,55 ; 45,55)
David	030316	316	(-72,73 ; 45,88)
L'Acadie	030421	345	(-73,43 ; 45,20)
Chateauguay	030905	2490	(-73,89 ; 45,12)
Du Nord	040110	1170	(-74,21 ; 46,01)
Kiamika	040608	660	(-74,99 ; 46,77)
Mitchinamécus	040609	867	(-74,89 ; 47,49)
Gatineau	040830	6840	(-75,22 ; 47,73)
Dumoine	041902	3760	(-77,80 ; 46,83)
Kinojevis	043012	2590	(-78,56 ; 48,39)
Matawin	050119	1390	(-74,14 ; 46,63)
Vermillon	050144	2640	(-73,56 ; 47,34)
Batiscan	050304	4480	(-72,25 ; 47,25)
Sainte-Anne	050408	1550	(-71,75 ; 47,17)
Portneuf	050702	331	(-71,79 ; 46,84)
Saint-Charles	050904	371	(-71,36 ; 46,97)
Montmorency	051001	1100	(-71,09 ; 47,25)
Maskinongé	052605	826	(-73,50 ; 46,46)
Petit Saguenay	060102	441	(-70,17 ; 48,13)
Aux Ecorces	061020	1110	(-71,59 ; 47,87)
Pikauba	061022	495	(-71,21 ; 47,78)
Cyriac	061024	355	(-71,21 ; 48,04)
La Belle Rivière	061307	322	(-71,74 ; 48,24)
Des Commissaires	061601	534	(-72,29 ; 48,13)
Petite Peribonca	061801	1090	(-71,90 ; 49,11)
Ashuapmushuan	061901	15300	(-73,49 ; 49,50)
Mistassini	062102	9870	(-72,74 ; 49,85)
Sainte-Marguerite	062803	1100	(-70,14 ; 48,55)

Tableau B.2 – Temps de montée définis par la formule de Watt et Chow (1985)

Nom	ID Station	Superficie [km ²]	t_L [hh:mm]	montée [PDT]
Bonaventure	010802	1910	24:37	9
Nouvelle	011204	1139	14:45	5
Matapedia	011509	2756	38:31	13
York	020404	659	17:20	6
Dartmouth	020602	645	14:06	5
Sainte-Anne	021407	774	11:03	4
Matane	021601	1650	22:52	8
Rimouski	022003	1610	27:57	10
Morin	022501	254	7:06	3
Ouelle	022704	795	12:24	5
Etchemin	023303	1160	26:43	9
Beaurivage	023401	709	20:43	7
Famine	023422	691	12:36	5
Lac Mégantic	023427	749	39:05	14
Bécancour	024014	2171	49:54	17
Nicolet	030103	1540	28:08	10
Eaton	030234	642	11:23	4
Au Saumon	030282	738	15:16	6
Noire	030304	1490	33:04	12
David	030316	316	15:23	6
L'Acadie	030421	345	32:25	11
Chateauguay	030905	2490	43:55	15
Du Nord	040110	1170	16:52	6
Kiamika	040608	660	16:29	6
Mitchinamécus	040609	867	44:01	15
Gatineau	040830	6840	60:11	21
Dumoine	041902	3760	64:09	22
Kinojevis	043012	2590	83:57	28
Matawin	050119	1390	27:18	10
Vermillon	050144	2640	52:40	18
Batiscan	050304	4480	54:07	19
Sainte-Anne	050408	1550	14:27	5
Portneuf	050702	331	9:56	4
Saint-Charles	050904	371	8:23	3
Montmorency	051001	1100	18:16	7
Maskinongé	052605	826	16:16	6
Petit Saguenay	060102	441	10:15	4
Aux Ecorces	061020	1110	23:13	8
Pikauba	061022	495	17:31	6
Cyriac	061024	355	10:55	4
La Belle Rivière	061307	322	12:03	5
Des Commissaires	061601	534	14:51	5
Petite Peribonca	061801	1090	32:22	11
Ashuapmushuan	061901	15300	110:12	37
Mistassini	062102	9870	85:46	29
Sainte-Marguerite	062803	1100	19:53	7

Tableau B.3 – Résultats (NS) « locaux » exhaustifs

Nom	ID Station	Nov. 2000 – Nov. 2004			Nov. 2004 – Nov. 2008		
		PB	AVP	AVC	PB	AVP	AVC
Bonaventure	010802	0,64	0,61	0,66	0,50	0,41	0,40
Nouvelle	011204	0,85	0,55	0,62	0,63	0,58	0,58
Matapedia	011509	0,43	0,33	0,34	0,78	0,77	0,79
York	020404	0,71	0,79	0,80	0,64	0,64	0,63
Dartmouth	020602	0,50	0,54	0,55	0,59	0,52	0,51
Sainte-Anne	021407	0,55	0,44	0,44	0,26	-0,03	0,03
Matane	021601	0,52	0,22	0,25	0,57	0,56	0,51
Rimouski	022003	0,74	0,75	0,76	-0,16	-0,03	0,07
Morin	022501	0,69	0,78	0,76	0,59	0,70	0,64
Ouelle	022704	0,70	0,65	0,69	0,48	0,52	0,48
Etchemin	023303	0,65	0,64	0,62	0,66	0,69	0,74
Beaurivage	023401	0,69	0,70	0,72	0,64	0,73	0,75
Famine	023422	0,69	0,61	0,62	0,66	0,68	0,68
Lac Mégantic	023427	0,56	0,66	0,65	0,45	0,58	0,54
Bécancour	024014	0,71	0,68	0,72	0,44	0,53	0,54
Nicolet	030103	0,51	0,63	0,63	0,59	0,67	0,74
Eaton	030234	0,49	0,47	0,49	0,57	0,65	0,63
Au Saumon	030282	0,61	0,66	0,66	0,59	0,75	0,72
Noire	030304	0,57	0,47	0,47	0,40	0,20	0,51
David	030316	0,56	0,44	0,43	0,23	0,25	0,30
L'Acadie	030421	0,60	0,62	0,61	0,29	0,62	0,57
Chateauguay	030905	0,74	0,65	0,63	0,61	0,53	0,56
Du Nord	040110	0,87	0,79	0,84	0,57	0,51	0,56
Kiamika	040608	0,75	0,77	0,79	0,62	0,54	0,62
Mitchinamécus	040609	0,74	0,58	0,58	0,52	0,55	0,62
Gatineau	040830	0,83	0,65	0,64	0,53	0,72	0,75
Dumoine	041902	0,85	0,81	0,85	0,57	0,41	0,56
Kinojevis	043012	0,86	0,82	0,84	0,76	0,67	0,71
Matawin	050119	0,85	0,65	0,80	0,71	0,27	0,26
Vermillon	050144	0,82	0,55	0,65	0,32	0,29	0,42
Batiscan	050304	0,72	0,76	0,81	0,84	0,75	0,70
Sainte-Anne	050408	0,80	0,75	0,80	0,73	0,60	0,66
Portneuf	050702	0,71	0,73	0,78	0,38	0,38	0,40
Saint-Charles	050904	0,73	0,52	0,67	0,57	0,36	0,50
Montmorency	051001	0,78	0,58	0,58	0,61	0,50	0,54
Maskinongé	052605	0,83	0,65	0,76	0,73	0,60	0,69
Petit Saguenay	060102	0,69	0,75	0,75	0,56	0,63	0,64
Aux Ecorces	061020	0,66	0,74	0,75	0,35	0,64	0,64
Pikauba	061022	0,82	0,66	0,66	0,66	0,59	0,61
Cyriac	061024	0,76	0,78	0,78	0,67	0,62	0,80
La Belle Rivière	061307	0,76	0,82	0,83	0,67	0,79	0,79
Des Commissaires	061601	0,66	0,66	0,65	0,72	0,75	0,70
Petite Péribonca	061801	0,78	0,80	0,81	0,38	0,44	0,47
Ashuapmushuan	061901	0,79	0,78	0,77	0,56	0,58	0,62
Mistassini	062102	0,77	0,79	0,78	0,57	0,58	0,62
Sainte-Marguerite	062803	0,62	0,32	0,35	0,64	0,61	0,62

Tableau B.4 – Résultats (NS) « globaux » exhaustifs

Nom	ID Station	Nov. 2000 – Nov. 2004	Nov. 2004 – Nov. 2008
Bonaventure	010802	0,47	0,29
Nouvelle	011204	0,50	0,47
Matapedia	011509	0,14	0,55
York	020404	0,67	0,57
Dartmouth	020602	0,31	0,38
Sainte-Anne	021407	0,12	-0,08
Matane	021601	0,08	0,35
Rimouski	022003	0,52	0,11
Morin	022501	0,53	0,48
Ouelle	022704	0,46	0,53
Etchemin	023303	0,32	0,56
Beaurivage	023401	0,49	0,54
Famine	023422	0,40	0,48
Lac Mégantic	023427	0,51	0,48
Bécancour	024014	0,55	0,47
Nicolet	030103	0,39	0,38
Eaton	030234	0,29	0,49
Au Saumon	030282	0,35	0,43
Noire	030304	0,36	0,32
David	030316	0,33	0,20
L'Acadie	030421	0,30	0,36
Chateauguay	030905	0,38	0,34
Du Nord	040110	0,76	0,53
Kiamika	040608	0,65	0,49
Mitchinamécus	040609	0,48	0,56
Gatineau	040830	0,54	0,68
Dumoine	041902	0,38	-0,02
Kinojevis	043012	0,70	0,53
Matawin	050119	0,59	0,52
Vermillon	050144	0,53	0,22
Batiscan	050304	0,65	0,58
Sainte-Anne	050408	0,51	0,51
Portneuf	050702	0,63	0,36
Saint-Charles	050904	0,59	0,45
Montmorency	051001	0,36	0,45
Maskinongé	052605	0,61	0,61
Petit Saguenay	060102	0,64	0,50
Aux Ecorces	061020	0,51	0,70
Pikauba	061022	0,48	0,58
Cyriac	061024	0,68	0,71
La Belle Rivière	061307	0,63	0,55
Des Commissaires	061601	0,58	0,60
Petite Péribonca	061801	0,47	0,31
Ashuapmushuan	061901	0,25	0,54
Mistassini	062102	0,22	0,51
Sainte-Marguerite	062803	0,15	0,59

Tableau B.5 – Résultats (NS) « global P local » exhaustifs obtenus en calage (Nov. 2000 – Nov. 2004)

Nom	ID Station	C_{Etp}	C_{Tr}	V_{Max}	C_{VA}	C_V	C_A
Bonaventure	010802	0,59	0,50	0,48	0,32	0,33	0,33
Nouvelle	011204	0,58	0,54	0,53	0,51	0,48	0,48
Matapedia	011509	0,28	0,20	0,16	0,63	0,59	0,56
York	020404	0,73	0,68	0,67	0,58	0,58	0,59
Dartmouth	020602	0,52	0,36	0,32	0,39	0,38	0,39
Sainte-Anne	021407	0,43	0,26	0,13	0,03	-0,03	-0,06
Matane	021601	0,18	0,12	0,13	0,39	0,36	0,37
Rimouski	022003	0,65	0,55	0,54	0,17	0,18	0,14
Morin	022501	0,64	0,56	0,56	0,49	0,50	0,52
Ouelle	022704	0,63	0,52	0,48	0,55	0,54	0,56
Etchemin	023303	0,51	0,41	0,42	0,58	0,62	0,60
Beaurivage	023401	0,58	0,52	0,59	0,55	0,60	0,57
Famine	023422	0,51	0,47	0,50	0,51	0,61	0,54
Lac Mégantic	023427	0,54	0,52	0,60	0,50	0,49	0,49
Bécancour	024014	0,64	0,59	0,61	0,50	0,47	0,47
Nicolet	030103	0,50	0,43	0,47	0,40	0,51	0,41
Eaton	030234	0,36	0,31	0,40	0,50	0,57	0,51
Au Saumon	030282	0,49	0,39	0,48	0,45	0,57	0,47
Noire	030304	0,41	0,38	0,40	0,33	0,37	0,33
David	030316	0,38	0,35	0,36	0,21	0,26	0,23
L'Acadie	030421	0,36	0,32	0,38	0,37	0,37	0,36
Chateauguay	030905	0,45	0,40	0,44	0,36	0,34	0,34
Du Nord	040110	0,79	0,78	0,77	0,54	0,54	0,56
Kiamika	040608	0,73	0,68	0,66	0,51	0,50	0,51
Mitchinamécus	040609	0,52	0,54	0,48	0,59	0,56	0,56
Gatineau	040830	0,59	0,60	0,56	0,70	0,69	0,69
Dumoine	041902	0,46	0,50	0,52	0,29	0,44	0,33
Kinojevis	043012	0,74	0,75	0,72	0,61	0,55	0,57
Matawin	050119	0,62	0,62	0,64	0,54	0,61	0,54
Vermillon	050144	0,59	0,56	0,58	0,28	0,39	0,38
Batiscan	050304	0,72	0,74	0,66	0,62	0,60	0,59
Sainte-Anne	050408	0,72	0,66	0,59	0,53	0,59	0,55
Portneuf	050702	0,66	0,70	0,67	0,38	0,38	0,40
Saint-Charles	050904	0,59	0,60	0,60	0,45	0,45	0,45
Montmorency	051001	0,44	0,44	0,47	0,47	0,50	0,49
Maskinongé	052605	0,69	0,63	0,64	0,63	0,63	0,67
Petit Saguenay	060102	0,71	0,67	0,65	0,57	0,52	0,51
Aux Ecorces	061020	0,71	0,65	0,52	0,75	0,71	0,70
Pikauba	061022	0,51	0,55	0,50	0,60	0,59	0,61
Cyriac	061024	0,74	0,72	0,69	0,76	0,73	0,74
La Belle Rivière	061307	0,70	0,66	0,66	0,64	0,57	0,56
Des Commissaires	061601	0,61	0,60	0,59	0,61	0,63	0,64
Petite Péribonca	061801	0,75	0,70	0,48	0,45	0,35	0,32
Ashuapmushuan	061901	0,70	0,65	0,26	0,65	0,56	0,55
Mistassini	062102	0,75	0,58	0,24	0,58	0,52	0,54
Sainte-Marguerite	062803	0,25	0,23	0,17	0,60	0,63	0,61

Tableau B.6 – Résultats (NS) « global P local » exhaustifs obtenus en vérification (Nov. 2004 – Nov. 2008)

Nom	ID Station	C_{Etp}	C_{Tr}	V_{Max}	C_{VA}	C_V	C_A
Bonaventure	010802	0,41	0,33	0,30	0,32	0,33	0,33
Nouvelle	011204	0,57	0,50	0,48	0,51	0,48	0,48
Matapedia	011509	0,71	0,60	0,57	0,63	0,59	0,56
York	020404	0,62	0,58	0,57	0,58	0,58	0,59
Dartmouth	020602	0,52	0,38	0,39	0,39	0,38	0,39
Sainte-Anne	021407	0,05	-0,10	-0,13	0,03	-0,03	-0,06
Matane	021601	0,55	0,38	0,32	0,39	0,36	0,37
Rimouski	022003	0,02	0,13	0,13	0,17	0,18	0,14
Morin	022501	0,55	0,49	0,50	0,49	0,50	0,52
Ouelle	022704	0,48	0,42	0,53	0,55	0,54	0,56
Etchemin	023303	0,68	0,59	0,60	0,58	0,62	0,60
Beaurivage	023401	0,62	0,56	0,61	0,55	0,60	0,57
Famine	023422	0,60	0,52	0,57	0,51	0,61	0,54
Lac Mégantic	023427	0,57	0,50	0,48	0,50	0,49	0,49
Bécancour	024014	0,54	0,51	0,45	0,50	0,47	0,47
Nicolet	030103	0,53	0,43	0,53	0,40	0,51	0,41
Eaton	030234	0,53	0,50	0,61	0,50	0,57	0,51
Au Saumon	030282	0,58	0,48	0,55	0,45	0,57	0,47
Noire	030304	0,36	0,33	0,43	0,33	0,37	0,33
David	030316	0,26	0,21	0,23	0,21	0,26	0,23
L'Acadie	030421	0,38	0,37	0,38	0,37	0,37	0,36
Chateauguay	030905	0,39	0,35	0,31	0,36	0,34	0,34
Du Nord	040110	0,57	0,56	0,56	0,54	0,54	0,56
Kiamika	040608	0,58	0,53	0,49	0,51	0,50	0,51
Mitchinamécus	040609	0,60	0,59	0,56	0,59	0,56	0,56
Gatineau	040830	0,73	0,74	0,70	0,70	0,69	0,69
Dumoine	041902	0,07	0,06	0,21	0,29	0,44	0,33
Kinojevis	043012	0,59	0,63	0,56	0,61	0,55	0,57
Matawin	050119	0,40	0,46	0,59	0,54	0,61	0,54
Vermillon	050144	0,36	0,26	0,31	0,28	0,39	0,38
Batiscan	050304	0,64	0,67	0,59	0,62	0,60	0,59
Sainte-Anne	050408	0,64	0,60	0,54	0,53	0,59	0,55
Portneuf	050702	0,37	0,38	0,38	0,38	0,38	0,40
Saint-Charles	050904	0,45	0,44	0,49	0,45	0,45	0,45
Montmorency	051001	0,53	0,48	0,48	0,47	0,50	0,49
Maskinongé	052605	0,64	0,62	0,63	0,63	0,62	0,67
Petit Saguenay	060102	0,60	0,55	0,52	0,57	0,52	0,51
Aux Ecorces	061020	0,63	0,71	0,71	0,75	0,71	0,70
Pikauba	061022	0,56	0,58	0,60	0,60	0,59	0,61
Cyriac	061024	0,75	0,75	0,73	0,76	0,73	0,74
La Belle Rivière	061307	0,67	0,60	0,57	0,64	0,57	0,56
Des Commissaires	061601	0,67	0,63	0,61	0,61	0,63	0,64
Petite Péribonca	061801	0,47	0,52	0,32	0,45	0,35	0,32
Ashuapmushuan	061901	0,50	0,72	0,53	0,65	0,56	0,55
Mistassini	062102	0,59	0,68	0,49	0,58	0,52	0,53
Sainte-Marguerite	062803	0,65	0,64	0,61	0,60	0,63	0,61

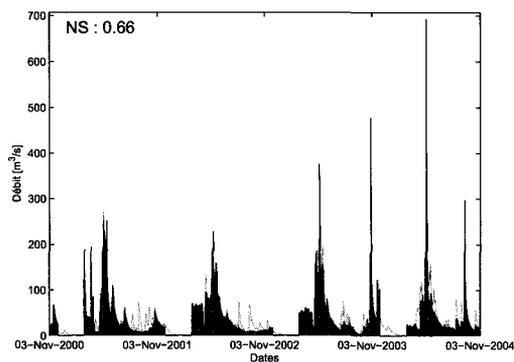
Tableau B.7 – Résultats (NS) « global C_{Etp} interpolé » exhaustifs

Nom	ID Station	Nov. 2000 – Nov. 2004	Nov. 2004 – Nov. 2008
Bonaventure	010802	0,57	0,38
Nouvelle	011204	0,57	0,55
Matapedia	011509	0,25	0,68
York	020404	0,72	0,62
Dartmouth	020602	0,41	0,47
Sainte-Anne	021407	0,26	0,02
Matane	021601	0,16	0,52
Rimouski	022003	0,65	0,04
Morin	022501	0,62	0,54
Ouelle	022704	0,60	0,55
Etchemin	023303	0,48	0,69
Beaurivage	023401	0,57	0,61
Famine	023422	0,48	0,56
Lac Mégantic	023427	0,53	0,58
Bécancour	024014	0,63	0,55
Nicolet	030103	0,49	0,51
Eaton	030234	0,34	0,53
Au Saumon	030282	0,43	0,52
Noire	030304	0,38	0,37
David	030316	0,37	0,26
L'Acadie	030421	0,35	0,39
Chateauguay	030905	0,44	0,40
Du Nord	040110	0,67	0,51
Kiamika	040608	0,63	0,47
Mitchinamécus	040609	0,45	0,42
Gatineau	040830	0,40	0,32
Dumoine	041902	-0,42	-2,01
Kinojevis	043012	0,53	0,48
Matawin	050119	0,31	-0,74
Vermillon	050144	-0,75	-2,43
Batiscan	050304	0,62	0,53
Sainte-Anne	050408	0,70	0,63
Portneuf	050702	0,60	0,32
Saint-Charles	050904	0,45	0,25
Montmorency	051001	0,42	0,53
Maskinongé	052605	0,67	0,58
Petit Saguenay	060102	0,69	0,60
Aux Ecorces	061020	0,67	0,49
Pikauba	061022	0,35	0,26
Cyriac	061024	0,62	0,61
La Belle Rivière	061307	0,49	0,62
Des Commissaires	061601	0,46	0,54
Petite Péribonca	061801	0,74	0,45
Ashuapmushuan	061901	0,64	0,61
Mistassini	062102	0,75	0,61
Sainte-Marguerite	062803	0,21	0,60

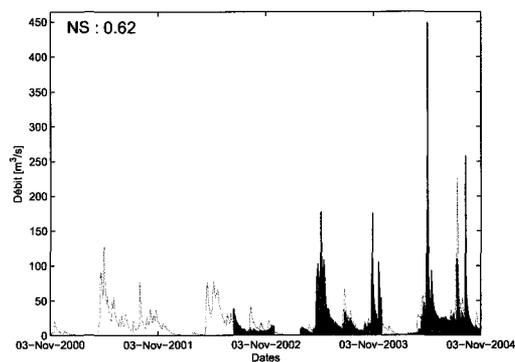
Annexe C

Simulations hydrologiques

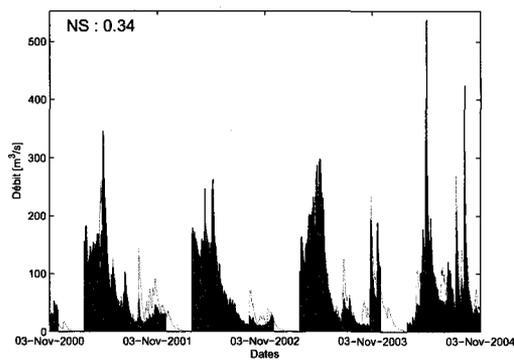
Cette section présente les hydrogramme simulés et observés pour les 46 bassins de notre échantillon issus des calages locaux. La figure C.1 présente la période de calage tandis que la figure C.2 présente la période de validation.



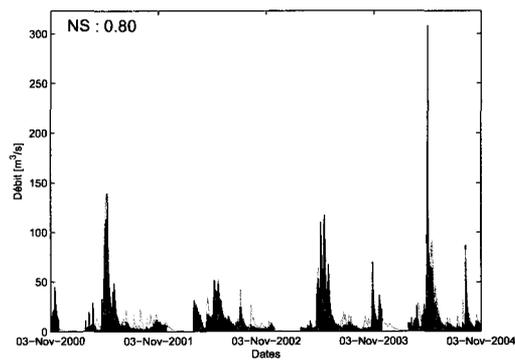
C.1.1 010802 – Bonaventure



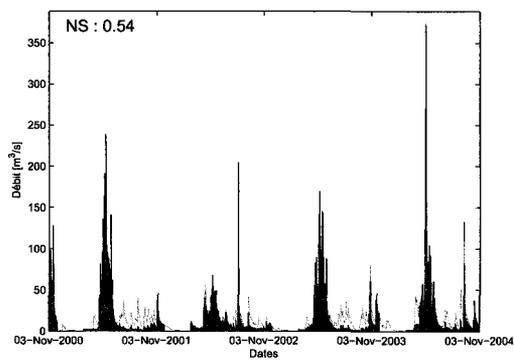
C.1.2 011204 – Nouvelle



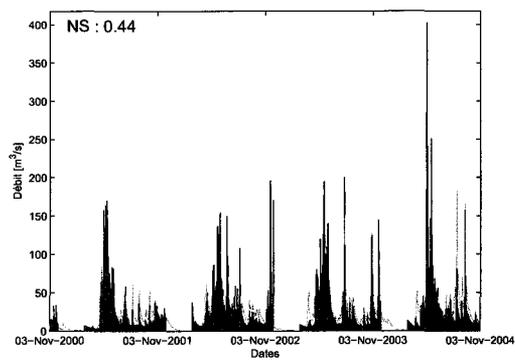
C.1.3 011509 – Matapedia



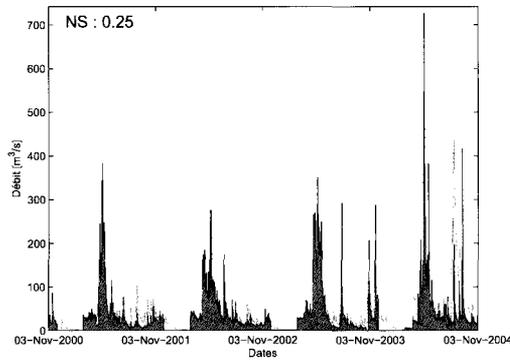
C.1.4 020404 – York



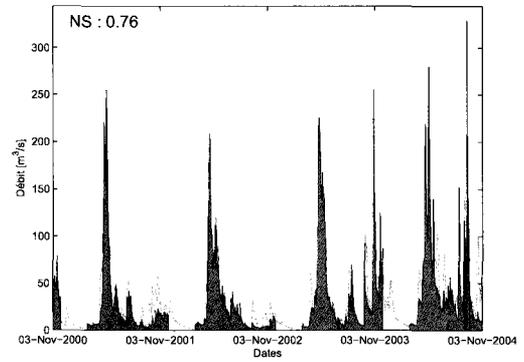
C.1.5 020602 – Dartmouth



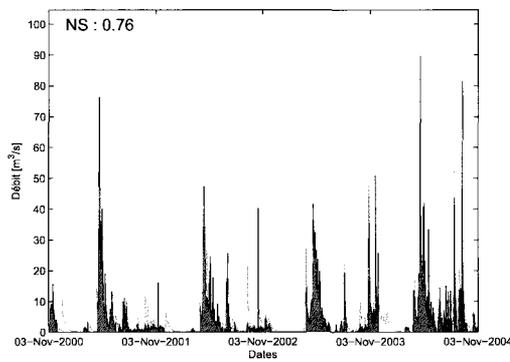
C.1.6 021407 – Sainte-Anne



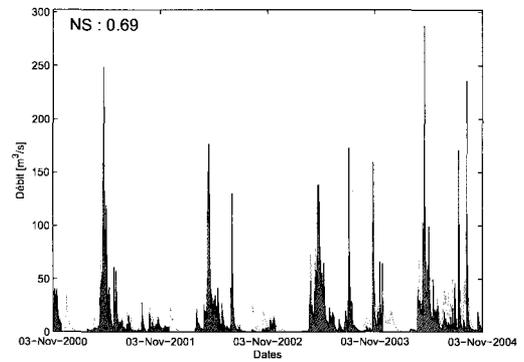
C.1.7 021601 – Matane



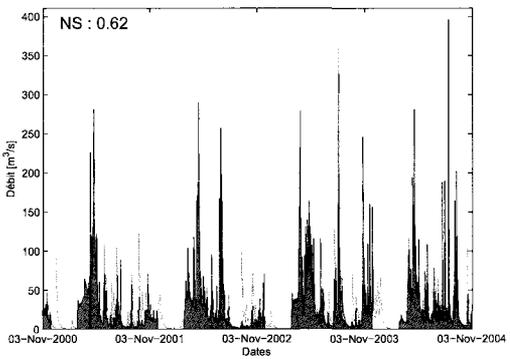
C.1.8 022003 – Rimouski



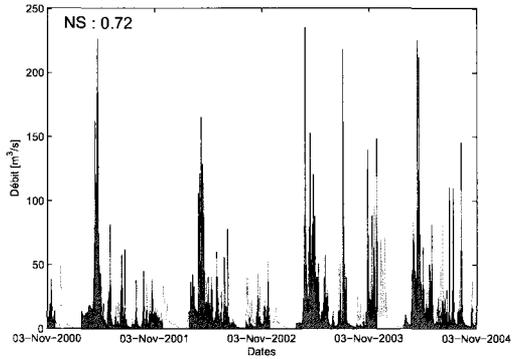
C.1.9 022501 – Morin



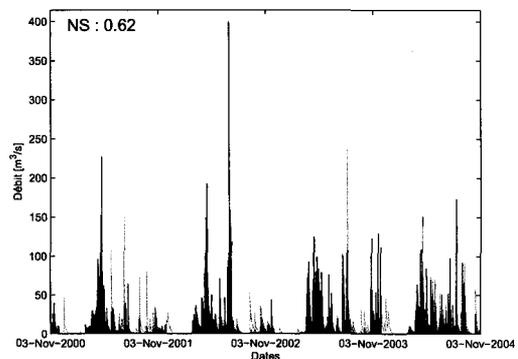
C.1.10 022704 – Ouelle



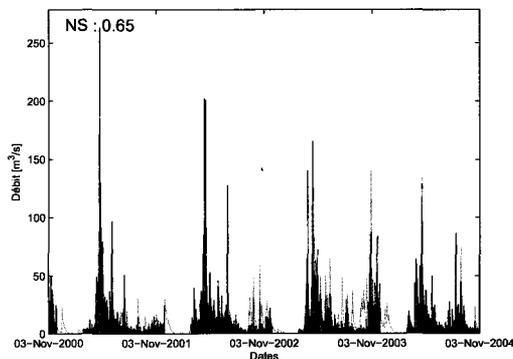
C.1.11 023303 – Etchemin



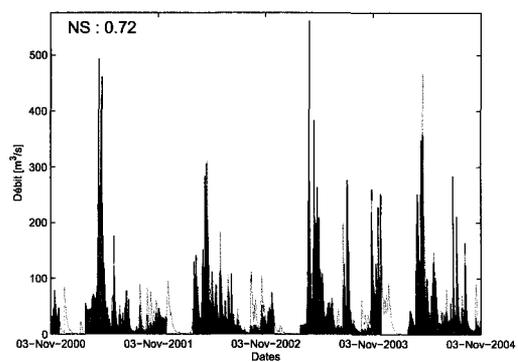
C.1.12 023401 – Beaurivage



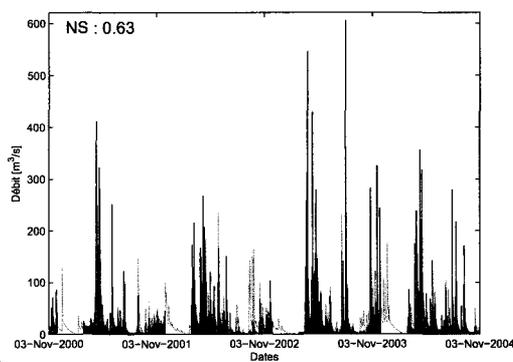
C.1.13 023422 – Famine



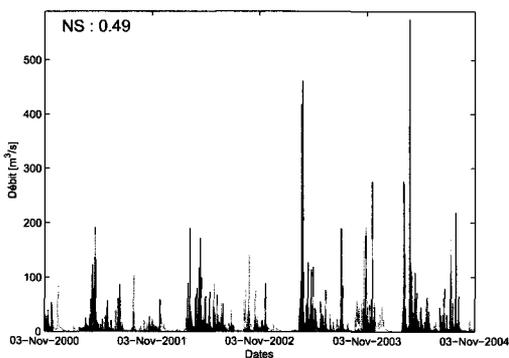
C.1.14 023427 – Lac Mégantic



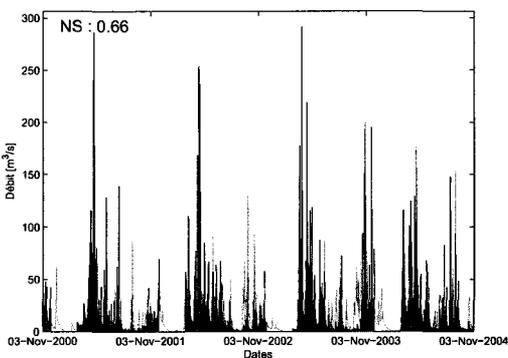
C.1.15 024014 – Bécancour



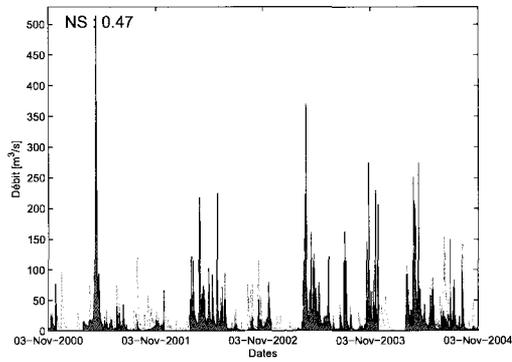
C.1.16 030103 – Nicolet



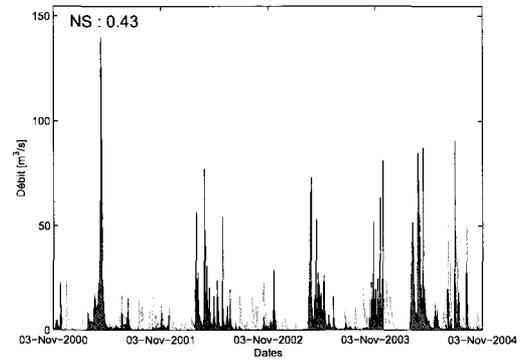
C.1.17 030234 – Eaton



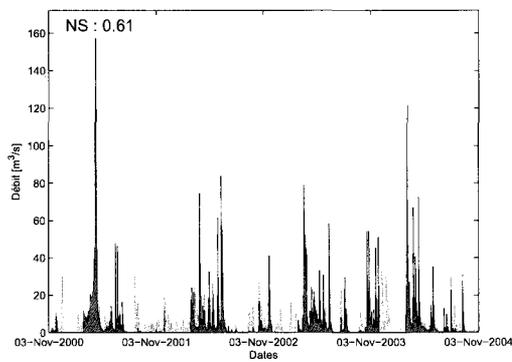
C.1.18 030282 – Au Saumon



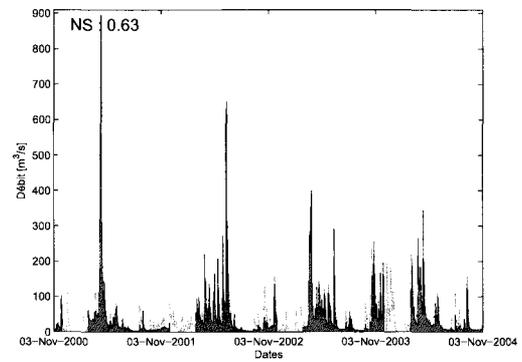
C.1.19 030304 – Noire



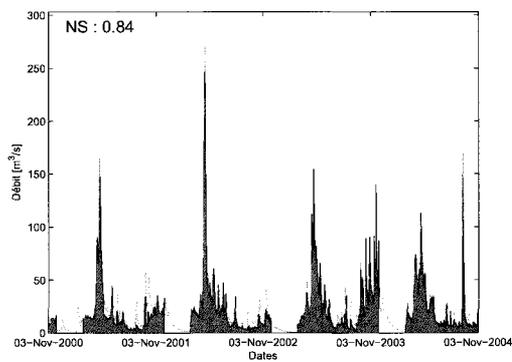
C.1.20 030316 – David



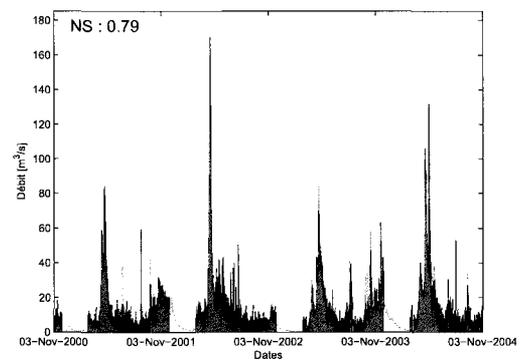
C.1.21 030421 – L'Acadie



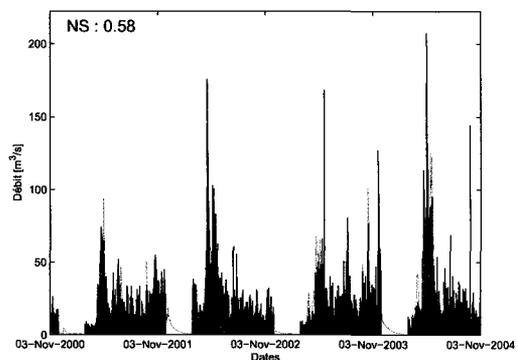
C.1.22 030905 – Chateauguay



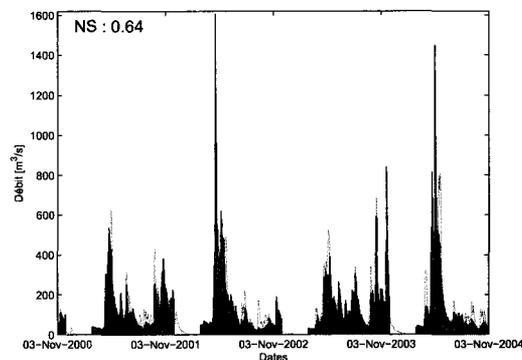
C.1.23 040110 – Du Nord



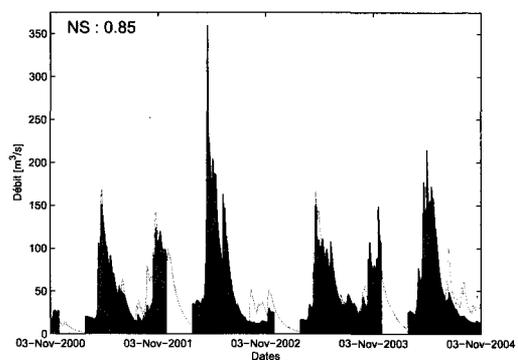
C.1.24 040608 – Kiamika



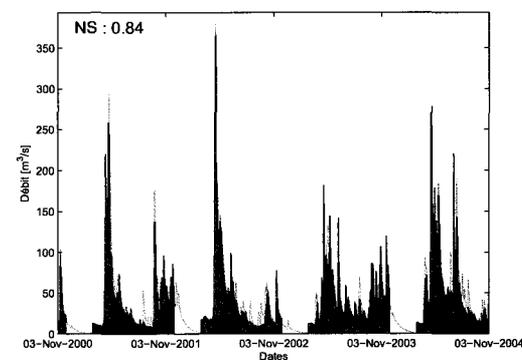
C.1.25 040609 – Mitchinamécus



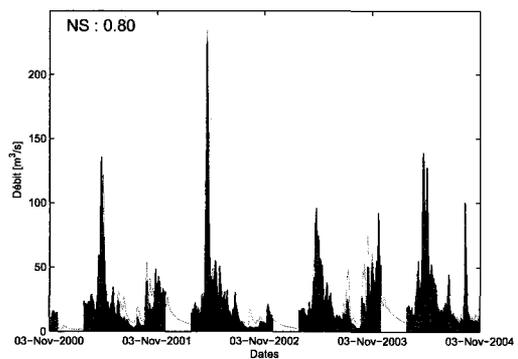
C.1.26 040830 – Gatineau



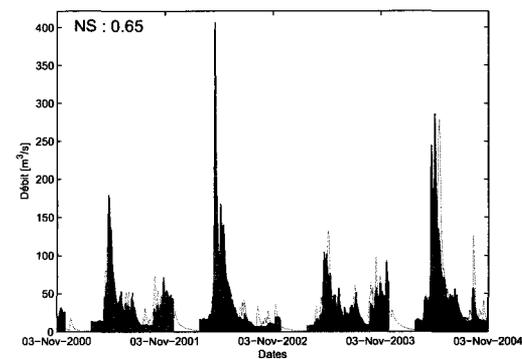
C.1.27 041902 – Dumoine



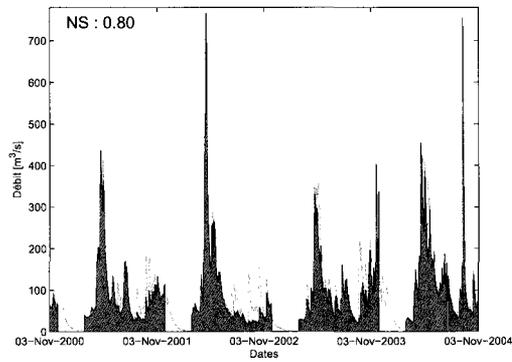
C.1.28 043012 – Kinojevis



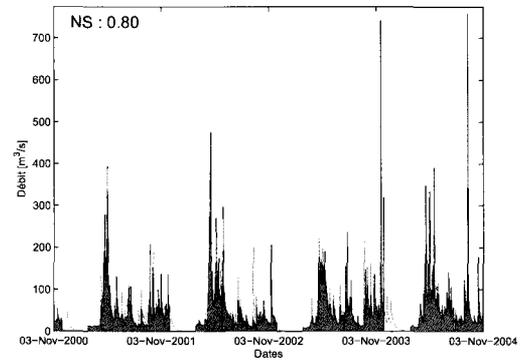
C.1.29 050119 – Matawin



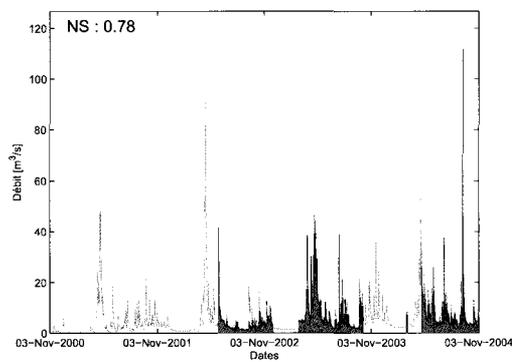
C.1.30 050144 – Vermillon



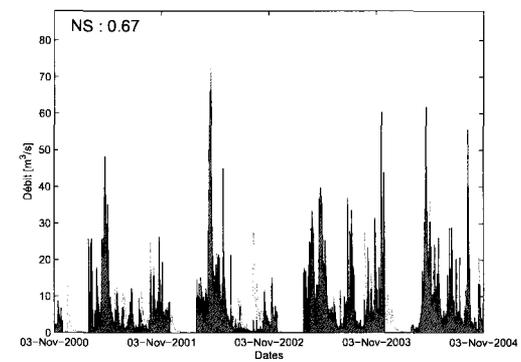
C.1.31 050304 – Batiscan



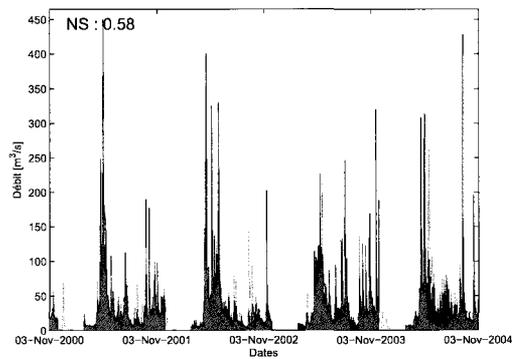
C.1.32 050408 – Sainte-Anne



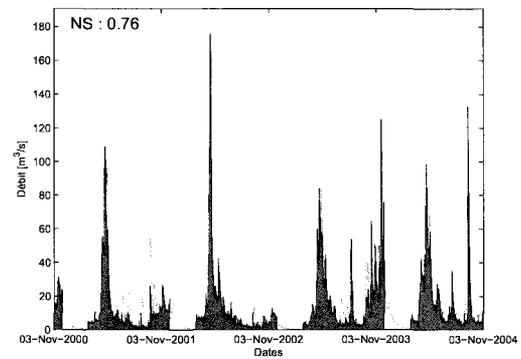
C.1.33 050702 – Portneuf



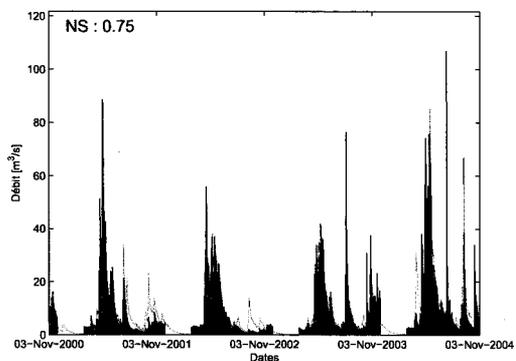
C.1.34 050904 – Saint-Charles



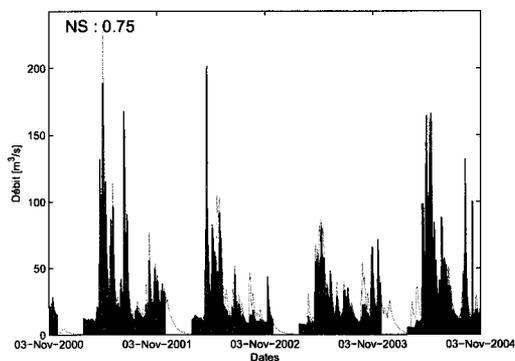
C.1.35 051001 – Montmorency



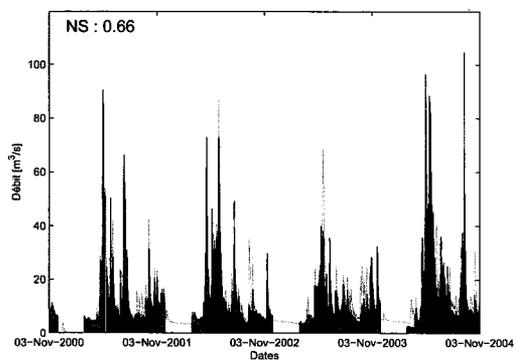
C.1.36 052605 – Maskinongé



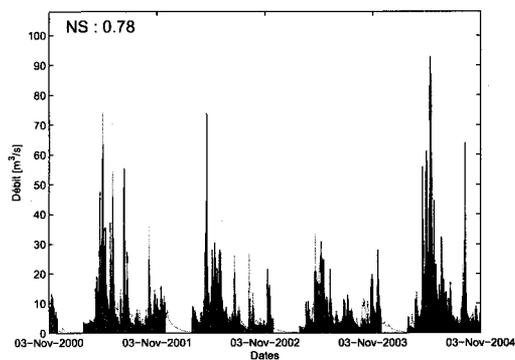
C.1.37 060102 – Petit Saguenay



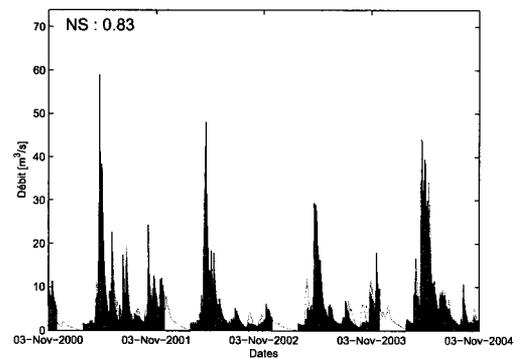
C.1.38 061020 – Aux Écorces



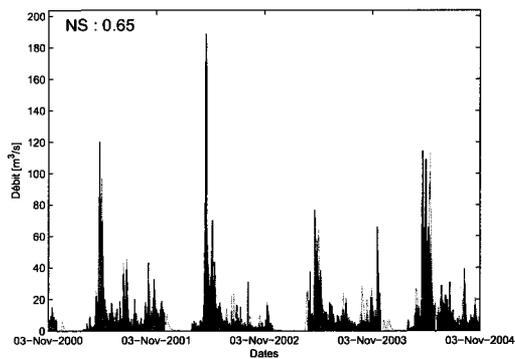
C.1.39 061022 – Pikauba



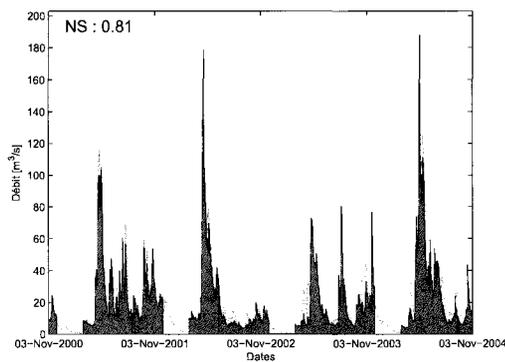
C.1.40 061024 – Cyriac



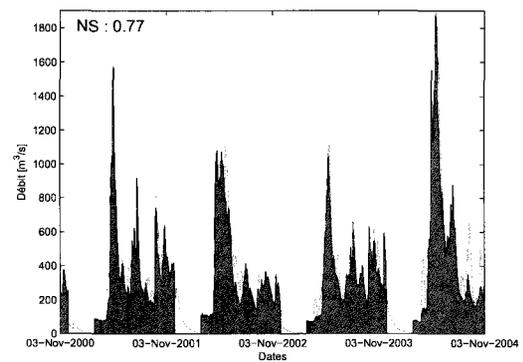
C.1.41 061307 – La Belle Rivière



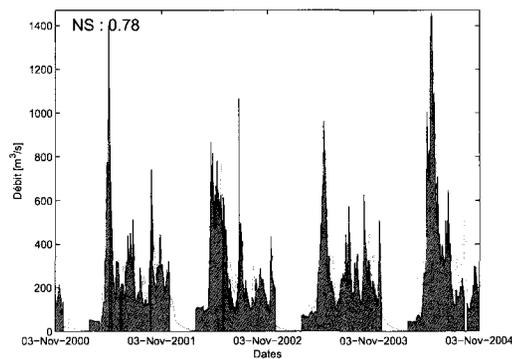
C.1.42 061601 – Des Commissaires



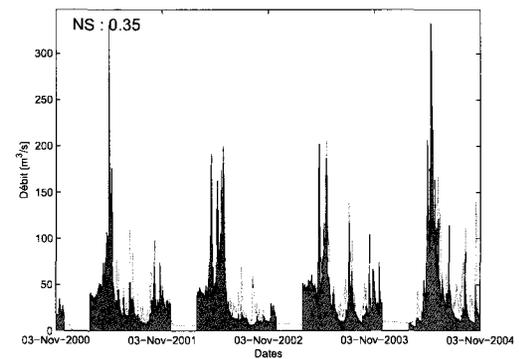
C.1.43 061801 – Petite Peribonca



C.1.44 061901 – Ashuapmushuan

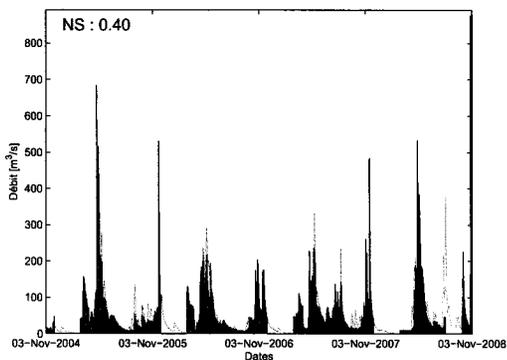


C.1.45 062102 – Mistassini

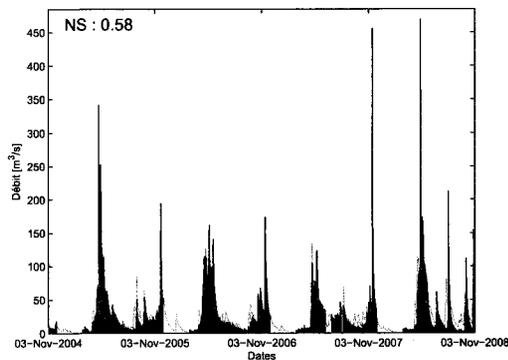


C.1.46 062803 – Sainte-Marguerite Nord-Est

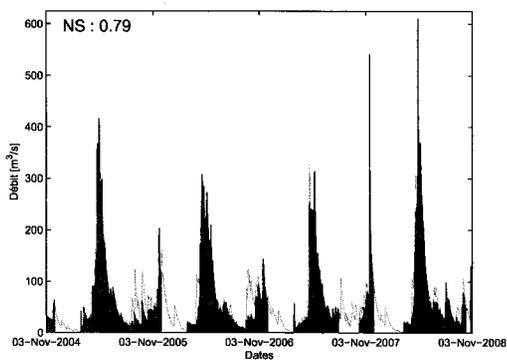
FIGURE C.1 – Hydrogrammes simulés et observés pour la période de calage sur chacun des bassins



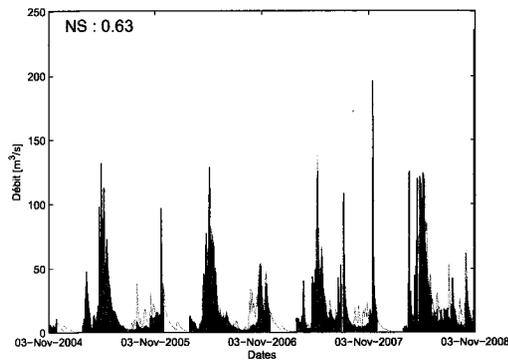
C.2.1 010802 – Bonaventure



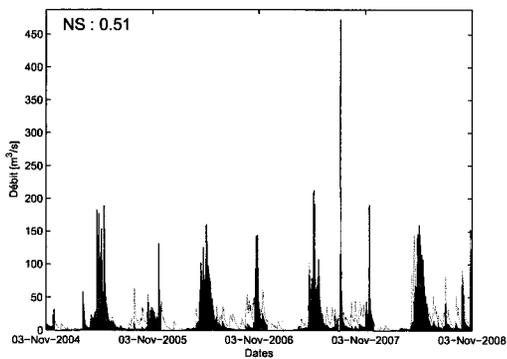
C.2.2 011204 – Nouvelle



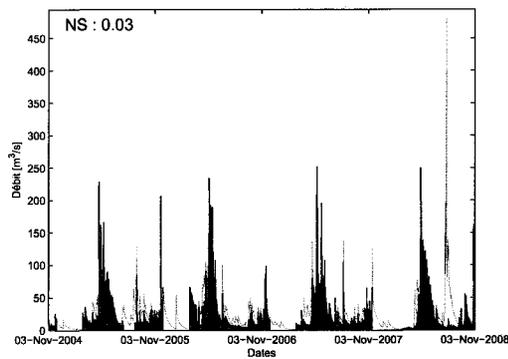
C.2.3 011509 – Matapedia



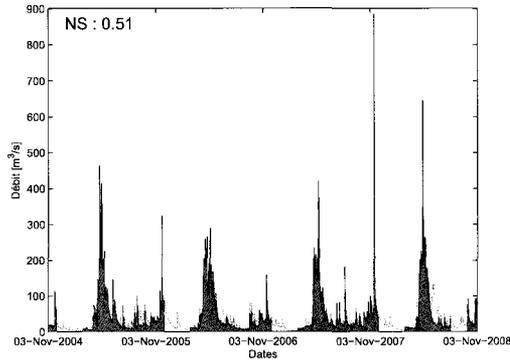
C.2.4 020404 – York



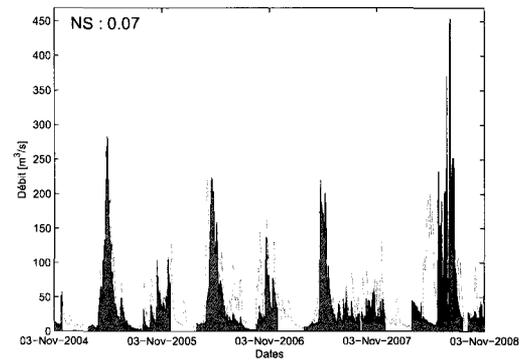
C.2.5 020602 – Dartmouth



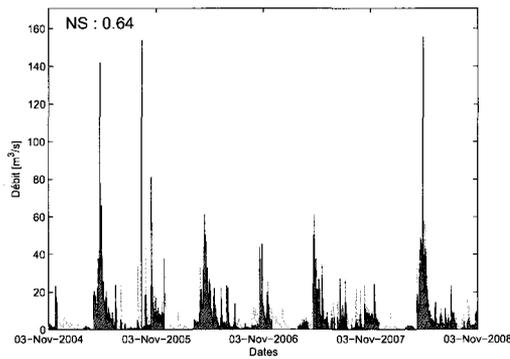
C.2.6 021407 – Sainte-Anne



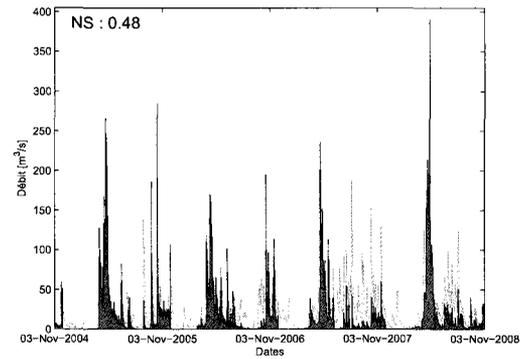
C.2.7 021601 – Matane



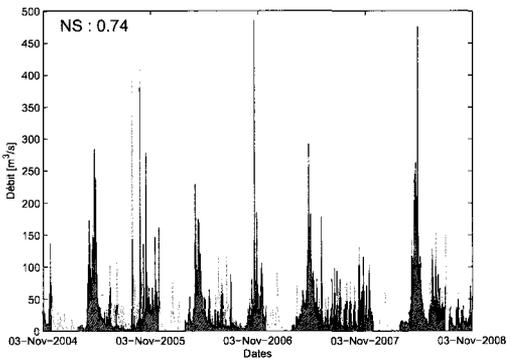
C.2.8 022003 – Rimouski



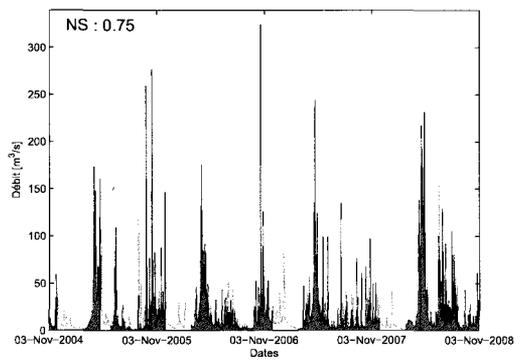
C.2.9 022501 – Morin



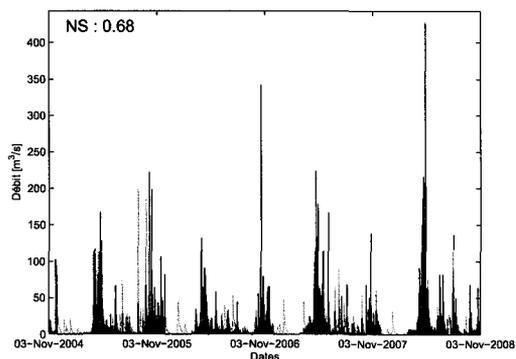
C.2.10 022704 – Ouelle



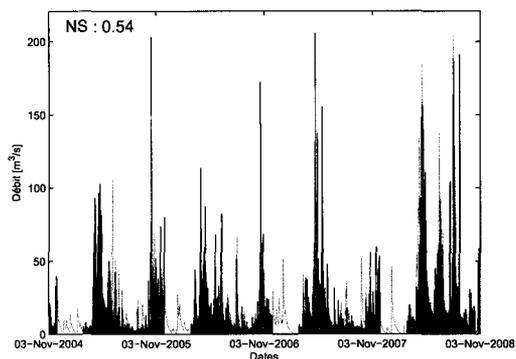
C.2.11 023303 – Etchemin



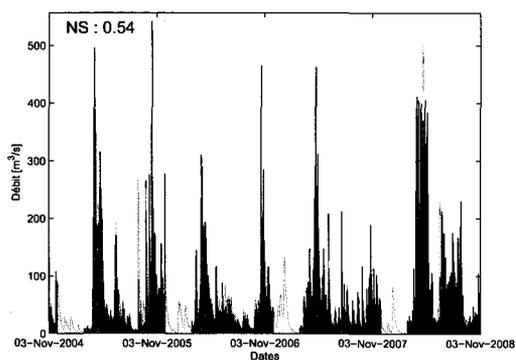
C.2.12 023401 – Beaurivage



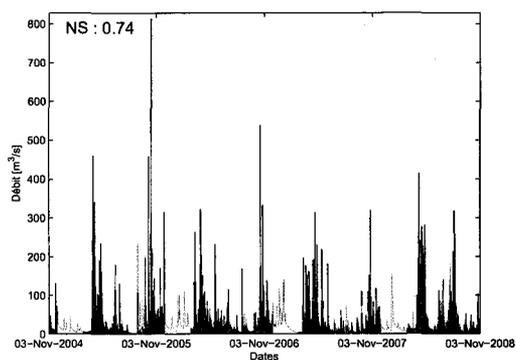
C.2.13 023422 – Famine



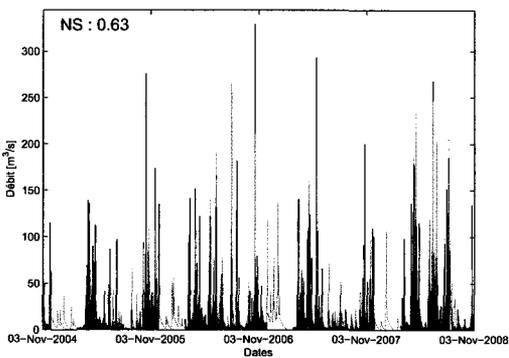
C.2.14 023427 – Lac Mégantic



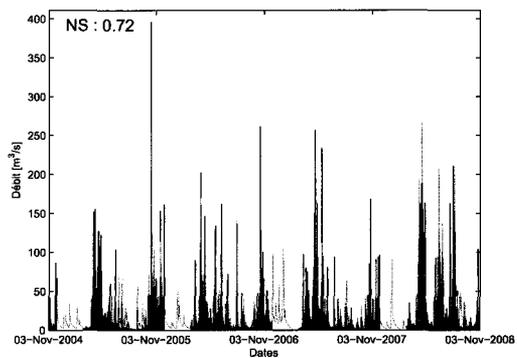
C.2.15 024014 – Bécancour



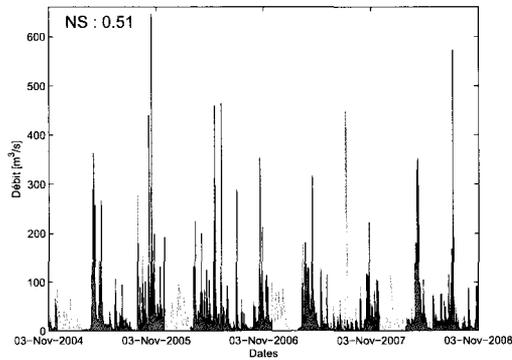
C.2.16 030103 – Nicolet



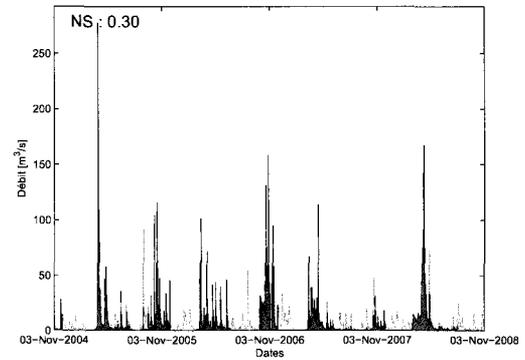
C.2.17 030234 – Eaton



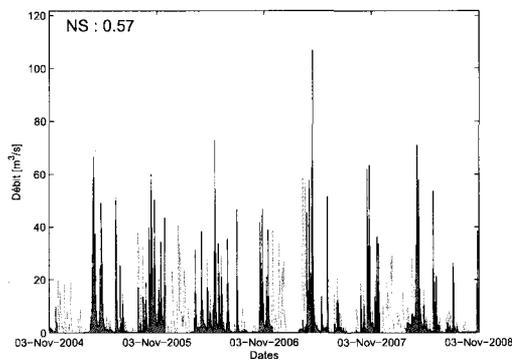
C.2.18 030282 – Au Saumon



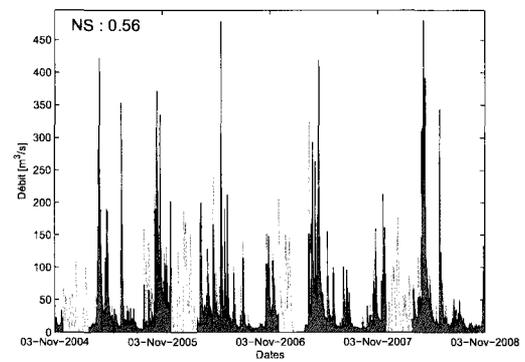
C.2.19 030304 – Noire



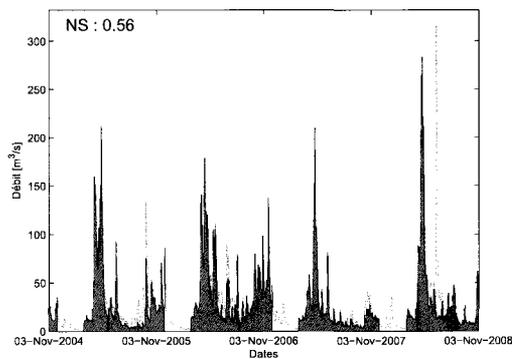
C.2.20 030316 – David



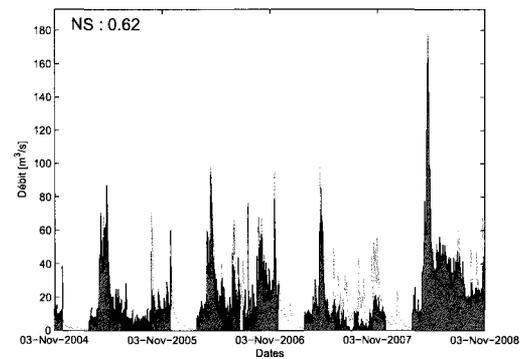
C.2.21 030421 – L'Acadie



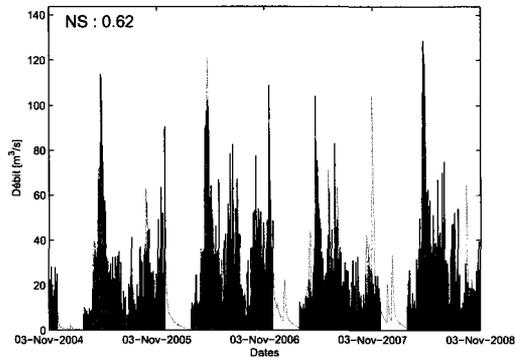
C.2.22 030905 – Chateaugay



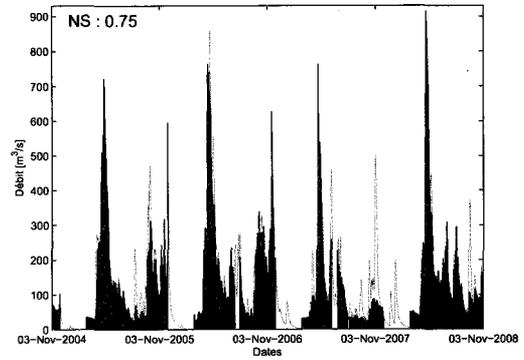
C.2.23 040110 – Du Nord



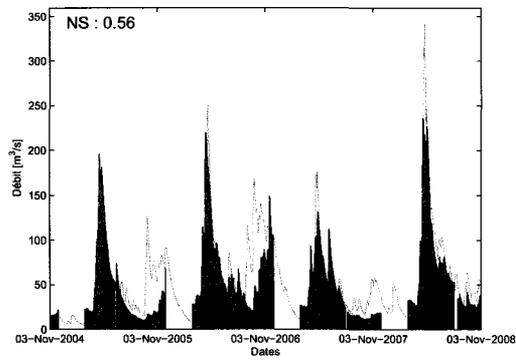
C.2.24 040608 – Kiamika



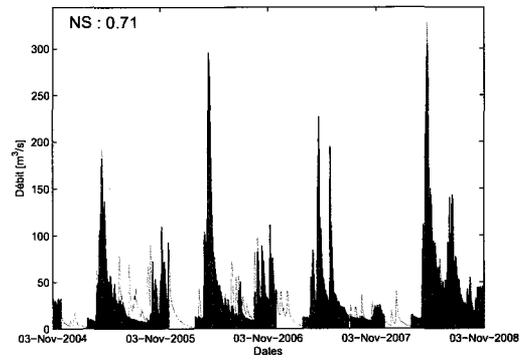
C.2.25 040609 – Mitchinamécus



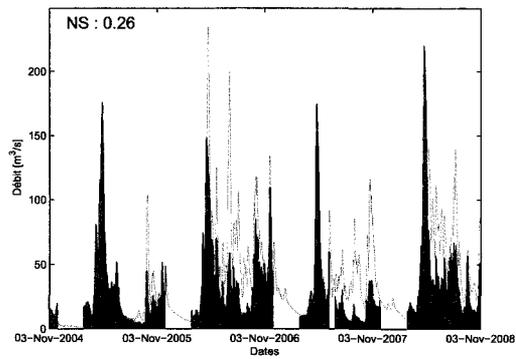
C.2.26 040830 – Gatineau



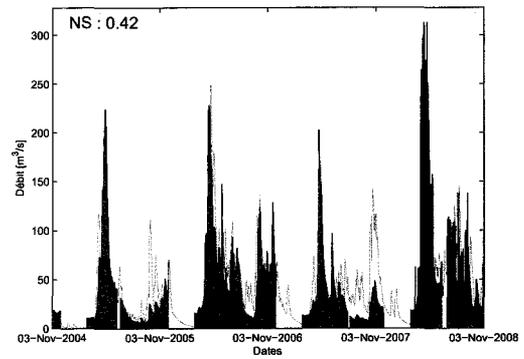
C.2.27 041902 – Dumoine



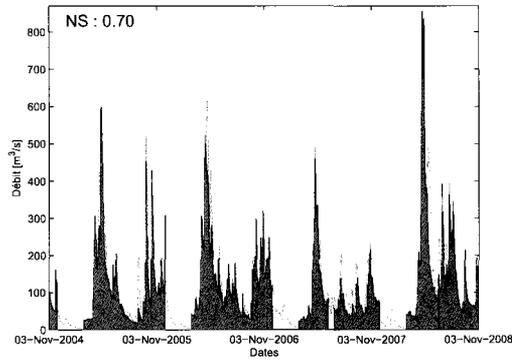
C.2.28 043012 – Kinojevis



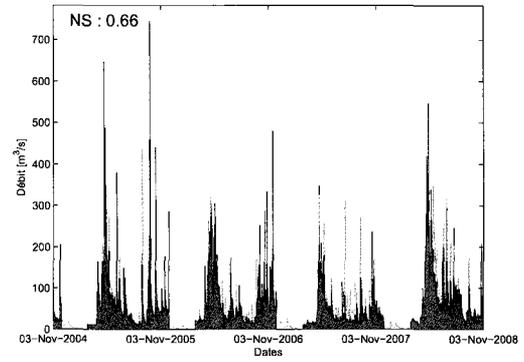
C.2.29 050119 – Matawin



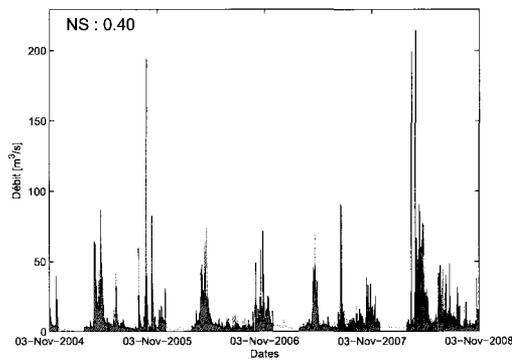
C.2.30 050144 – Vermillon



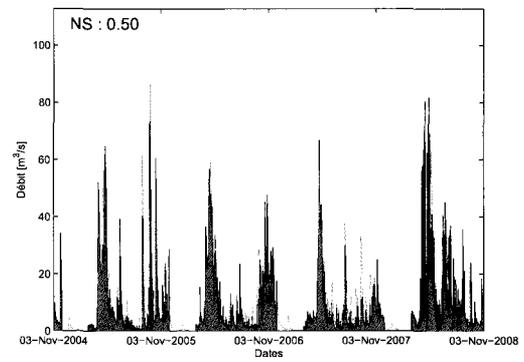
C.2.31 050304 – Batiscan



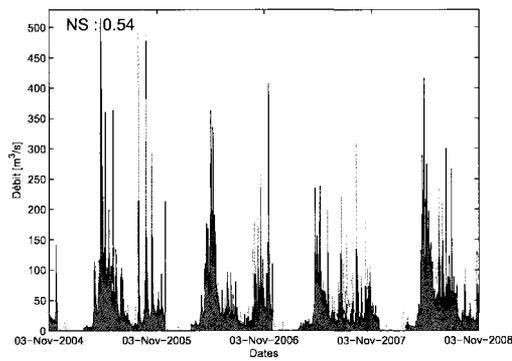
C.2.32 050408 – Sainte-Anne



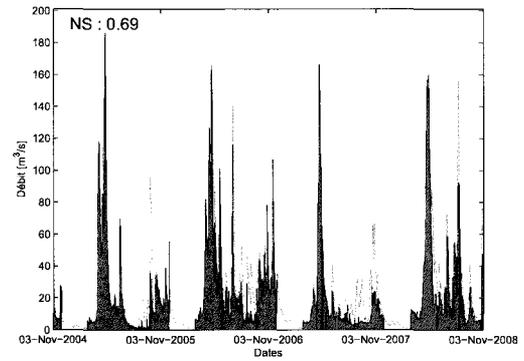
C.2.33 050702 – Portneuf



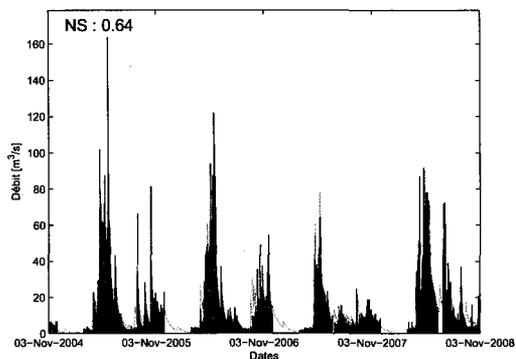
C.2.34 050904 – Saint-Charles



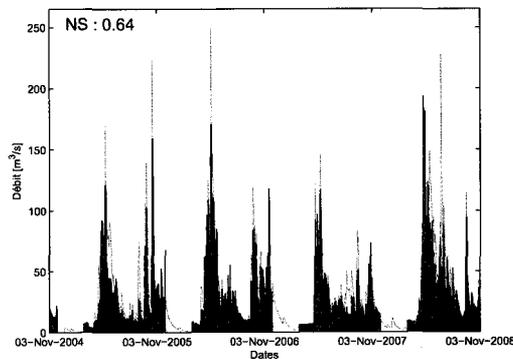
C.2.35 051001 – Montmorency



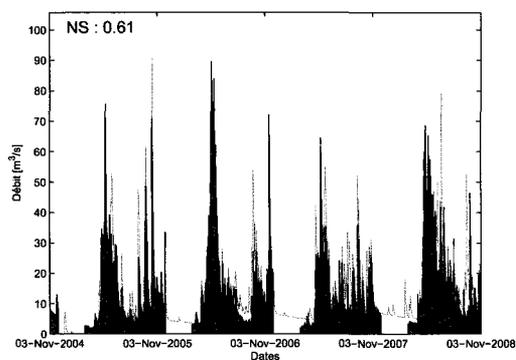
C.2.36 052605 – Maskinongé



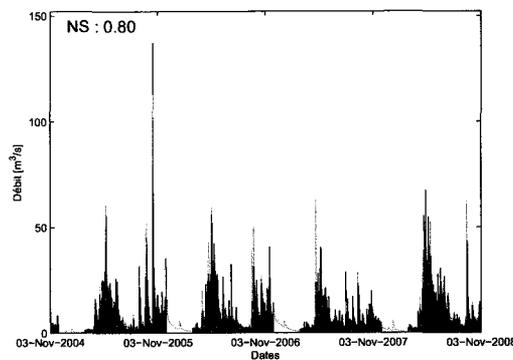
C.2.37 060102 – Petit Saguenay



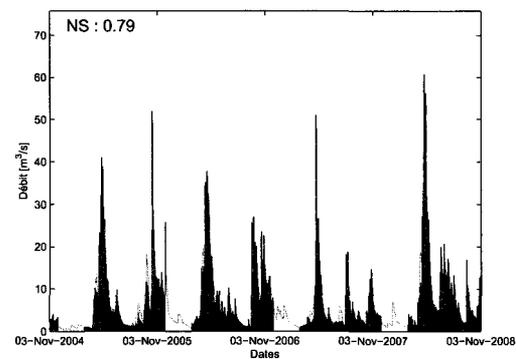
C.2.38 061020 – Aux Écorces



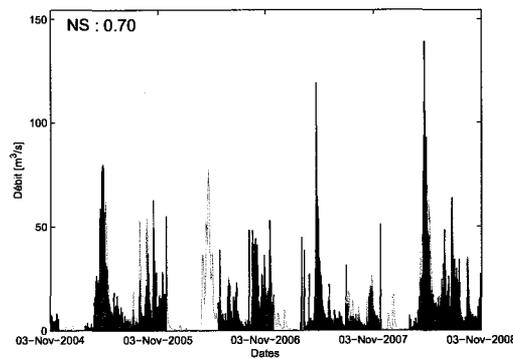
C.2.39 061022 – Pikauba



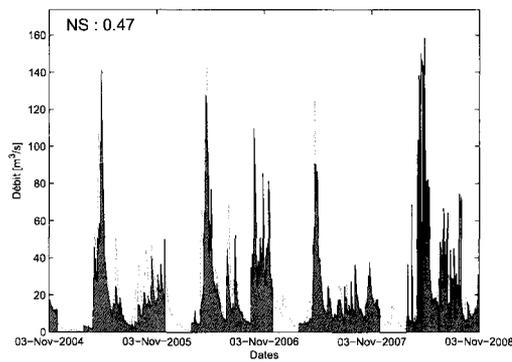
C.2.40 061024 – Cyriac



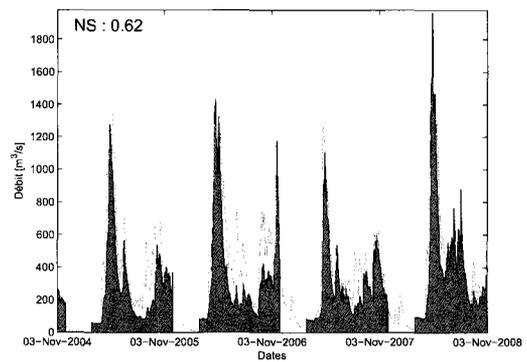
C.2.41 061307 – La Belle Rivière



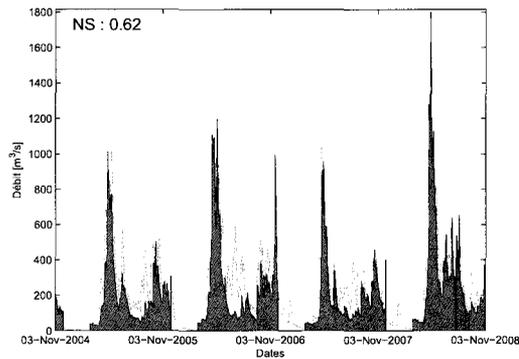
C.2.42 061601 – Des Commissaires



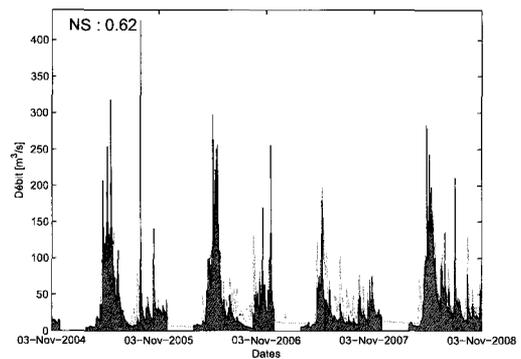
C.2.43 061801 – Petite Peribonca



C.2.44 061901 – Ashuapmushuan



C.2.45 062102 – Mistassini



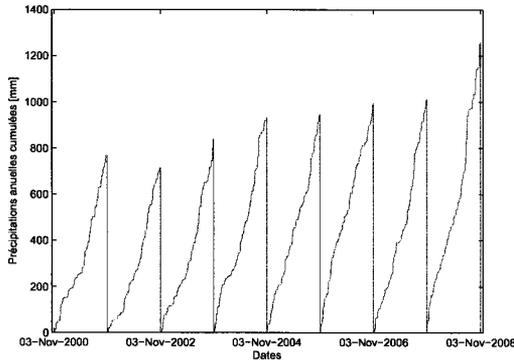
C.2.46 062803 – Sainte-Marguerite Nord-Est

FIGURE C.2 – Hydrogrammes simulés et observés pour la période de validation sur chacun des bassins

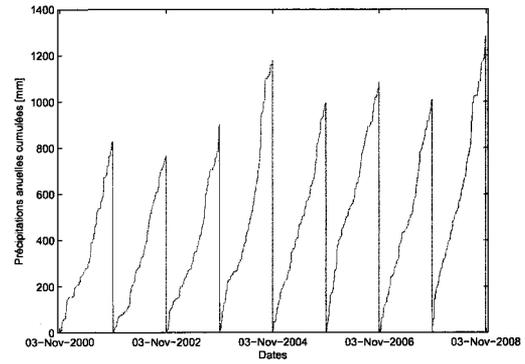
Annexe D

Validation météorologique

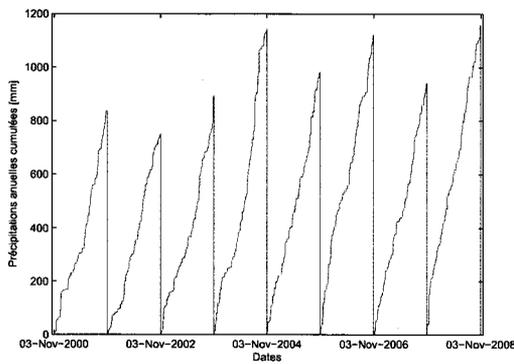
Cette section présente les figures ayant permis la validation météorologique. La figure D.1 expose la validation des précipitations. Ces graphiques ont été obtenus en cumulant les précipitations annuelles, de novembre à novembre pour les huit années étudiées sur les 46 bassins de notre échantillon. La figure D.2 permet, quant à elle, la vérification des températures. Ces graphiques ont été obtenus en traçant la moyenne journalière des températures observées pour les huit années étudiées sur les 46 bassins de notre échantillon.



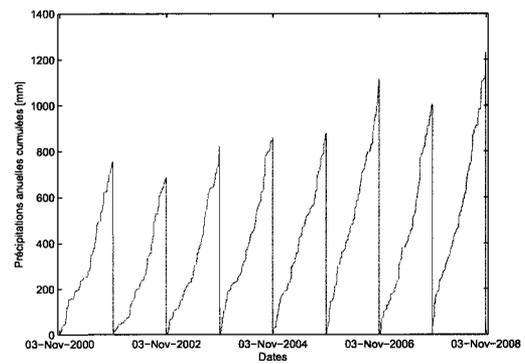
D.1.1 010802 – Bonaventure



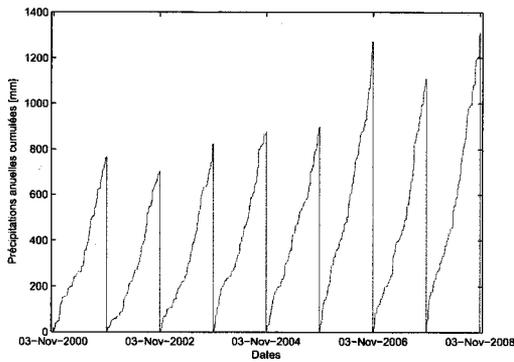
D.1.2 011204 – Nouvelle



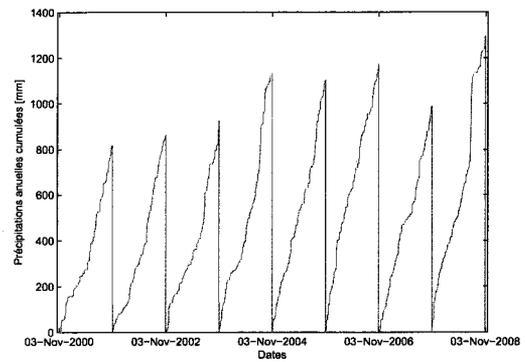
D.1.3 011509 – Matapedia



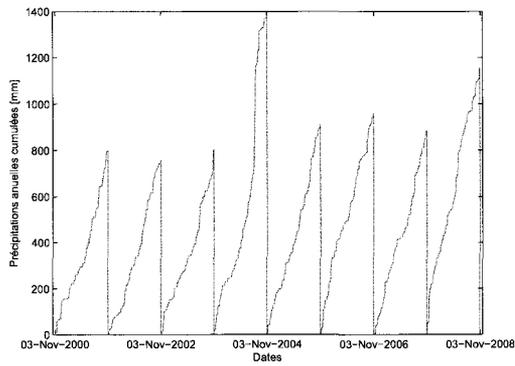
D.1.4 020404 – York



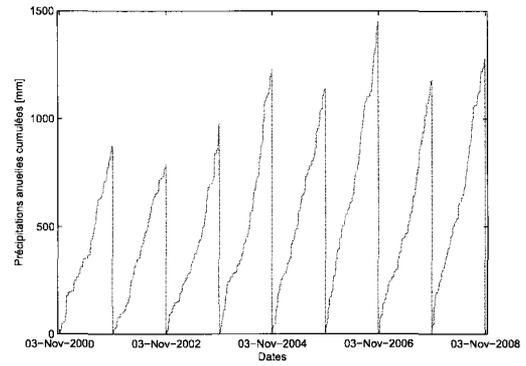
D.1.5 020602 – Dartmouth



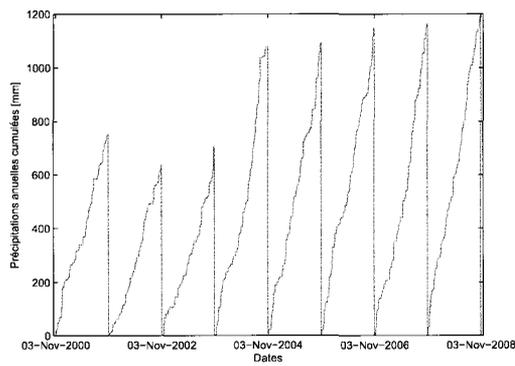
D.1.6 021407 – Sainte-Anne



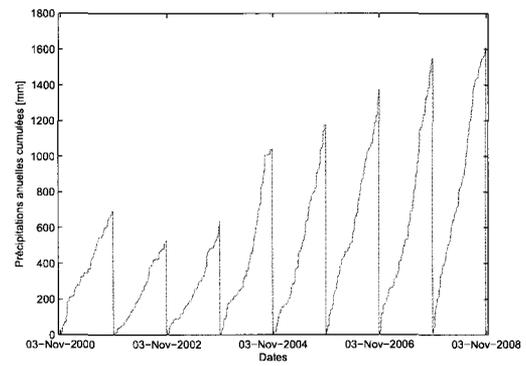
D.1.7 021601 – Matane



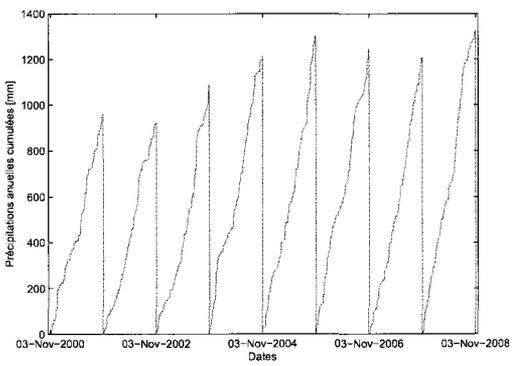
D.1.8 022003 – Rimouski



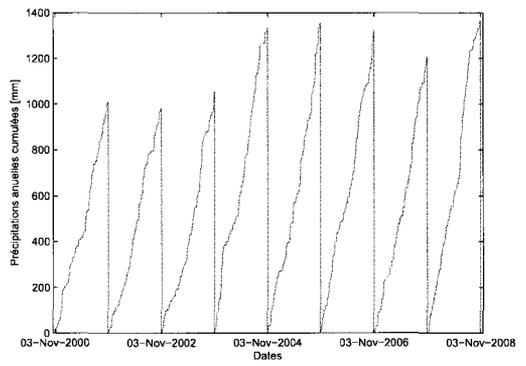
D.1.9 022501 – Morin



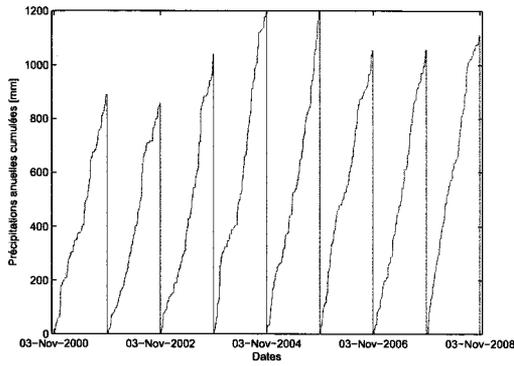
D.1.10 022704 – Ouelle



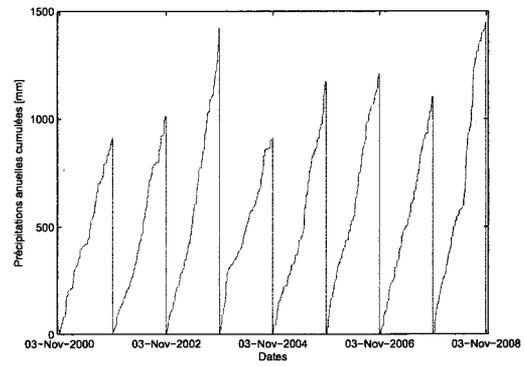
D.1.11 023303 – Etchemin



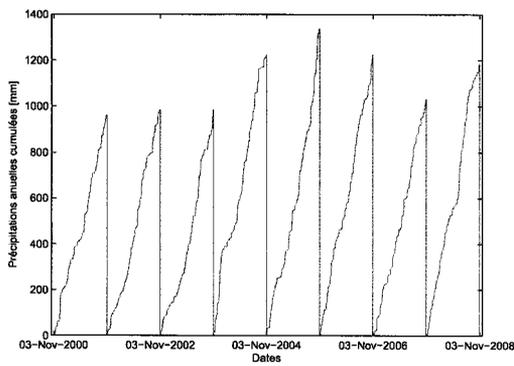
D.1.12 023401 – Beaurivage



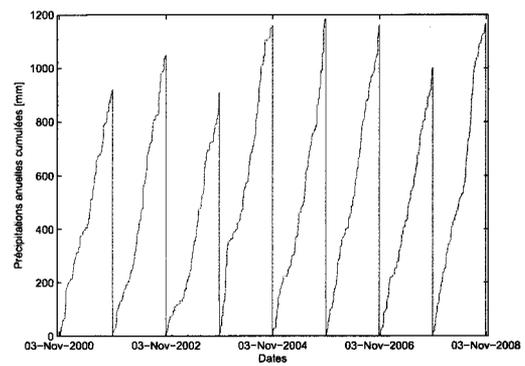
D.1.13 023422 – Famine



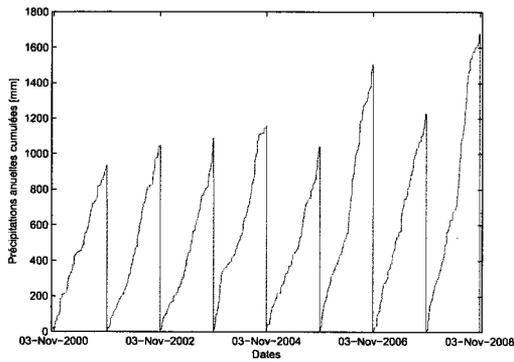
D.1.14 023427 – Lac Mégantic



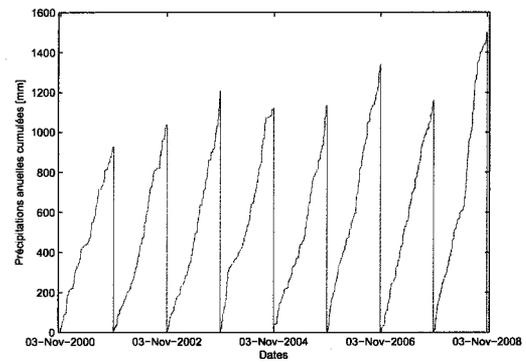
D.1.15 024014 – Bécancour



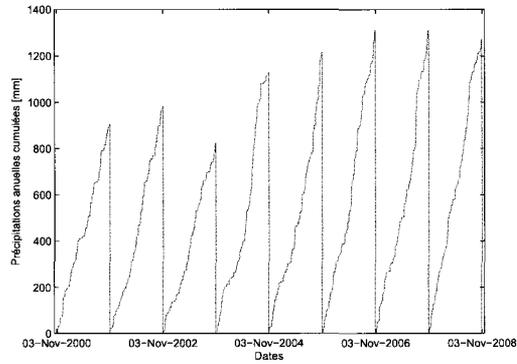
D.1.16 030103 – Nicolet



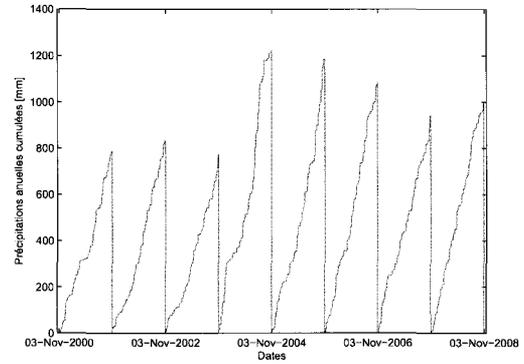
D.1.17 030234 – Eaton



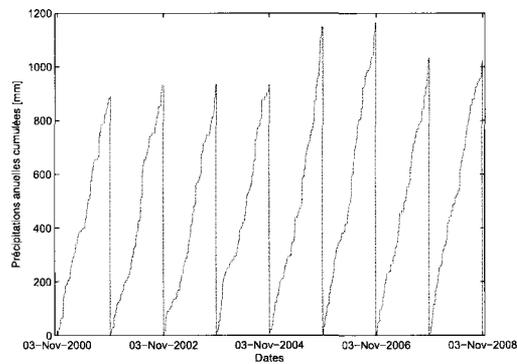
D.1.18 030282 – Au Saumon



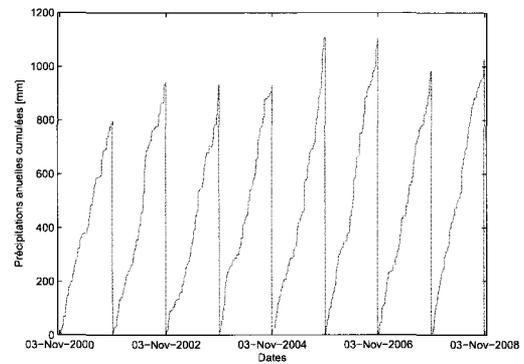
D.1.19 030304 – Noire



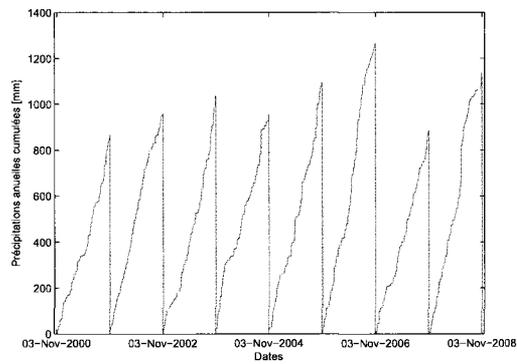
D.1.20 030316 – David



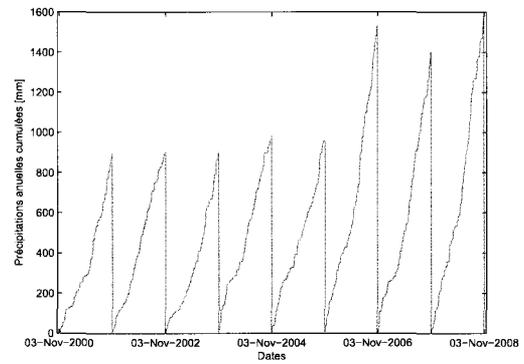
D.1.21 030421 – L'Acadie



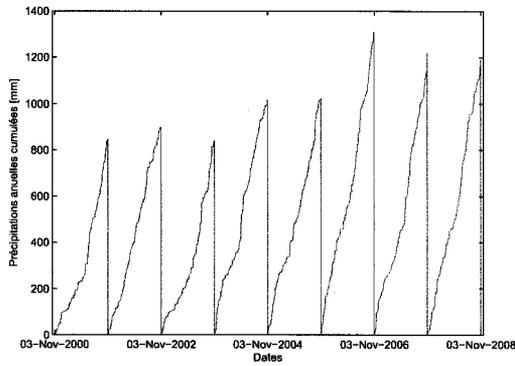
D.1.22 030905 – Chateaugay



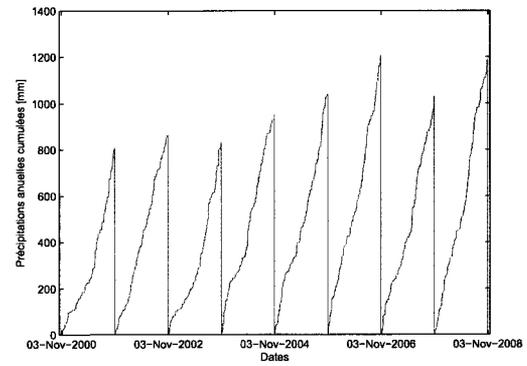
D.1.23 040110 – Du Nord



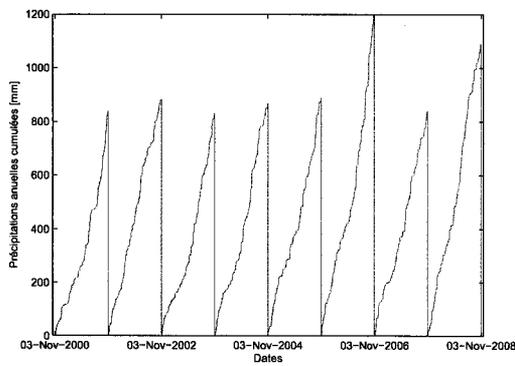
D.1.24 040608 – Kiamika



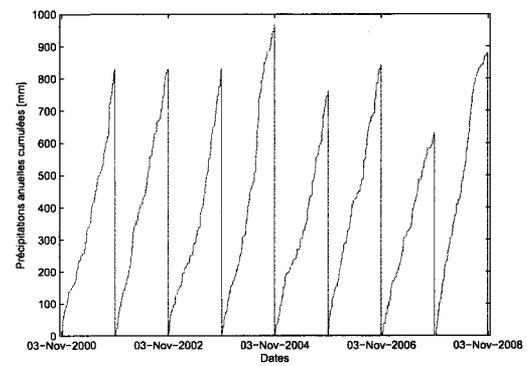
D.1.25 040609 – Mitchinamécus



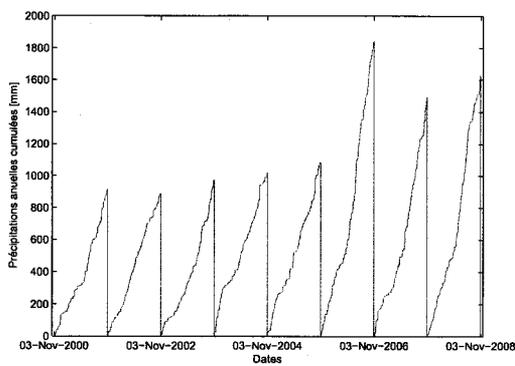
D.1.26 040830 – Gatineau



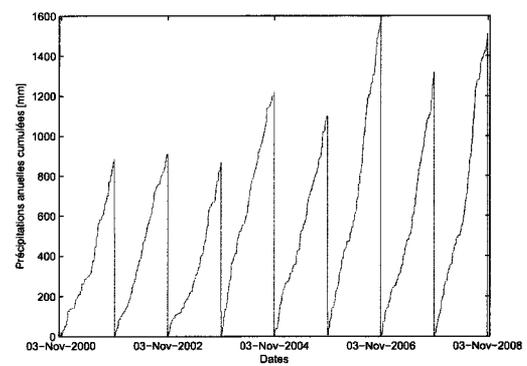
D.1.27 041902 – Dumoine



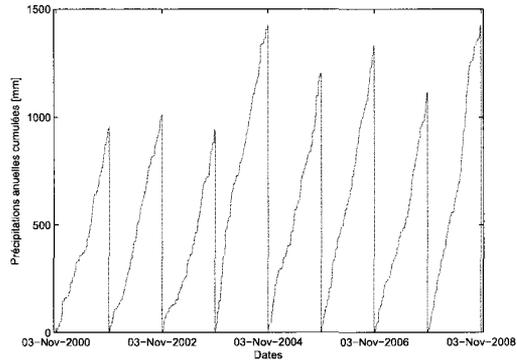
D.1.28 043012 – Kinojevis



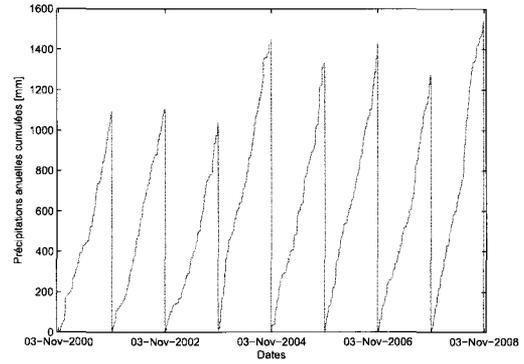
D.1.29 050119 – Matawin



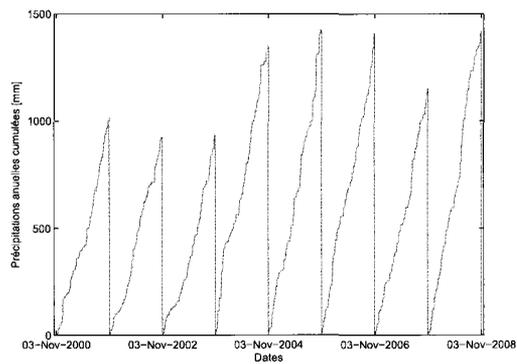
D.1.30 050144 – Vermillon



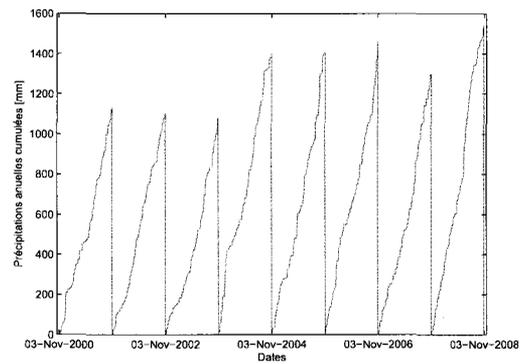
D.1.31 050304 – Batiscan



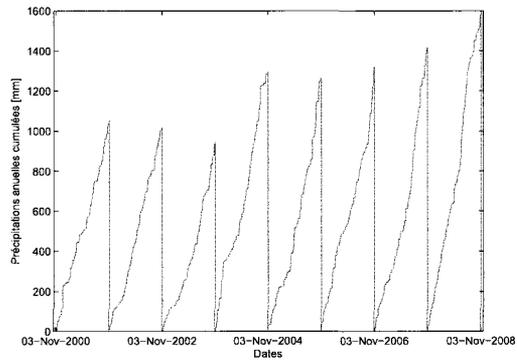
D.1.32 050408 – Sainte-Anne



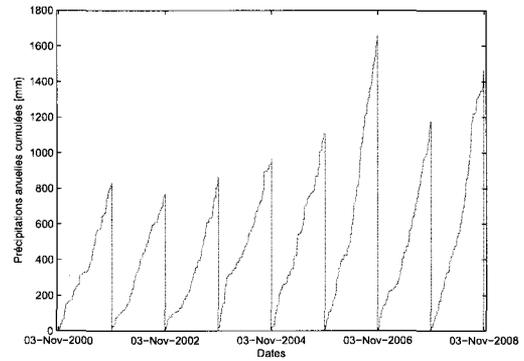
D.1.33 050702 – Portneuf



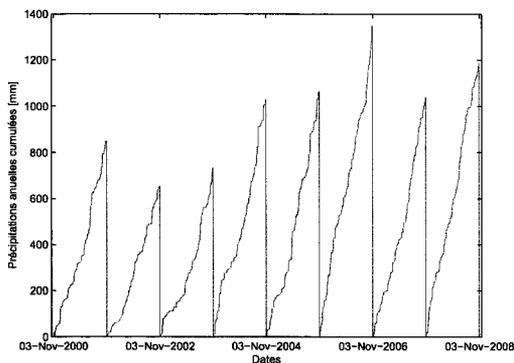
D.1.34 050904 – Saint-Charles



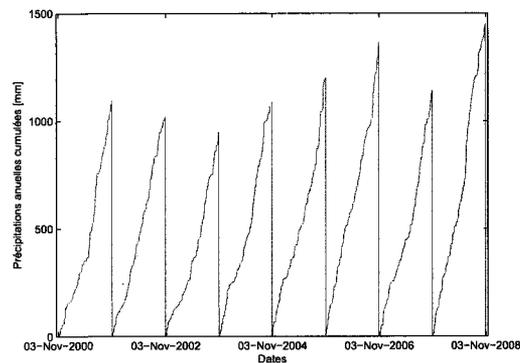
D.1.35 051001 – Montmorency



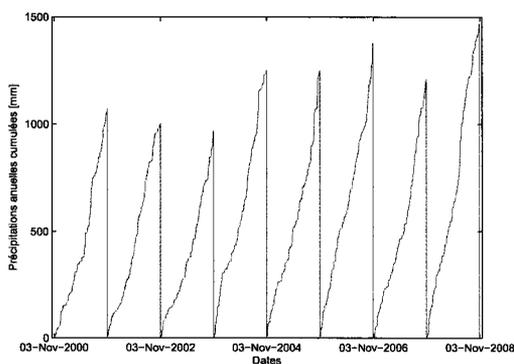
D.1.36 052605 – Maskinongé



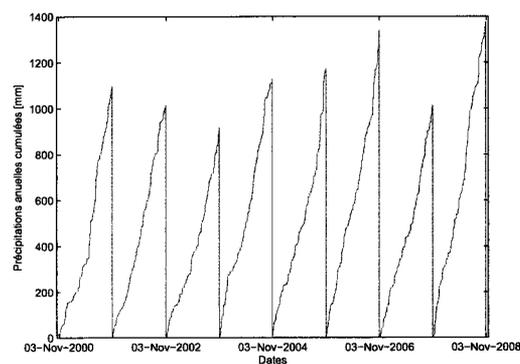
D.1.37 060102 – Petit Saguenay



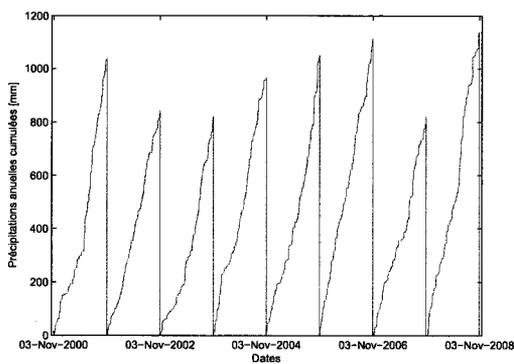
D.1.38 061020 – Aux Écorces



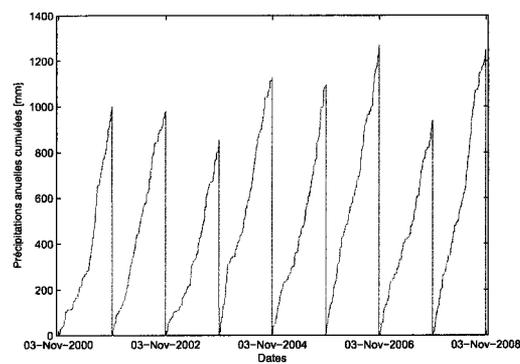
D.1.39 061022 – Pikauba



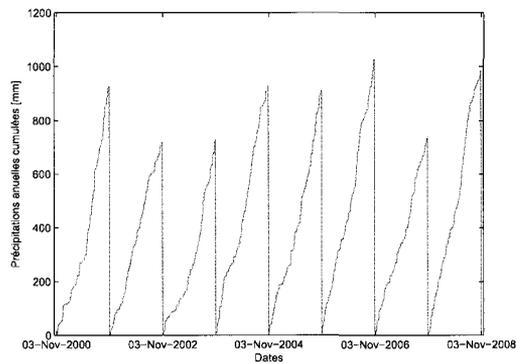
D.1.40 061024 – Cyriac



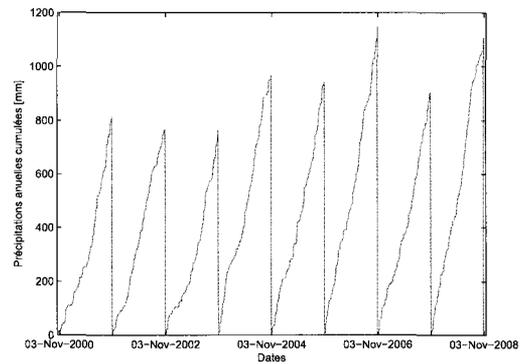
D.1.41 061307 – La Belle Rivière



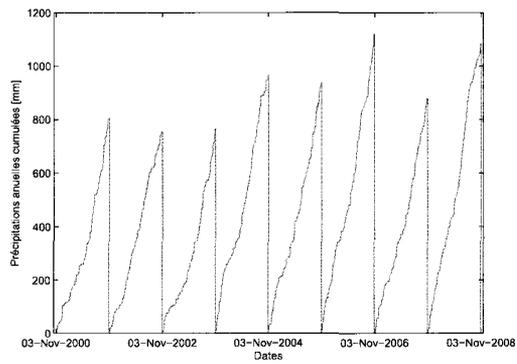
D.1.42 061601 – Des Commissaires



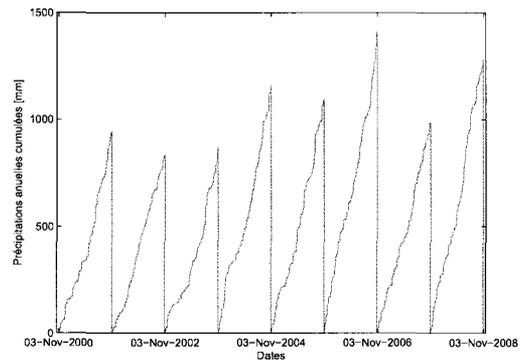
D.1.43 061801 – Petite Peribonca



D.1.44 061901 – Ashuapmushuan

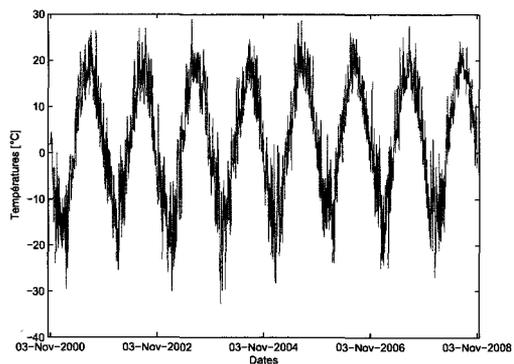


D.1.45 062102 – Mistassini

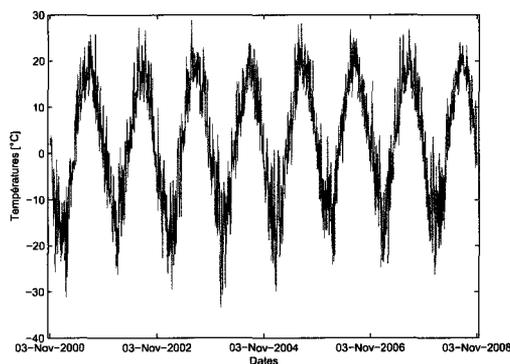


D.1.46 062803 – Sainte-Marguerite Nord-Est

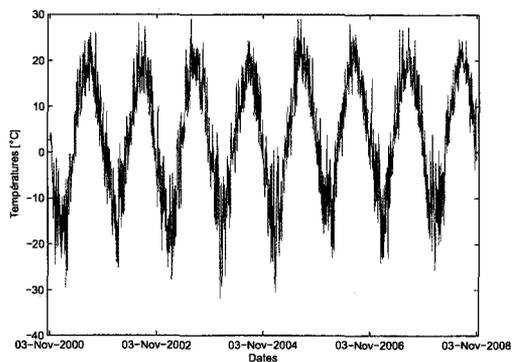
FIGURE D.1 – Figures présentant la validation des précipitations



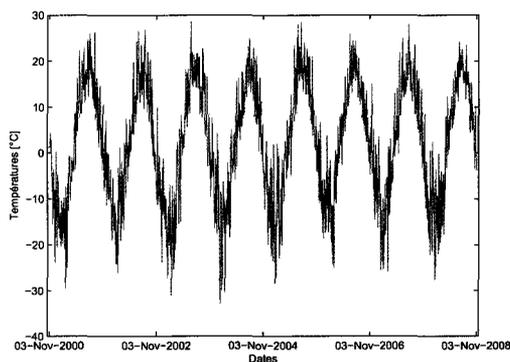
D.2.1 010802 – Bonaventure



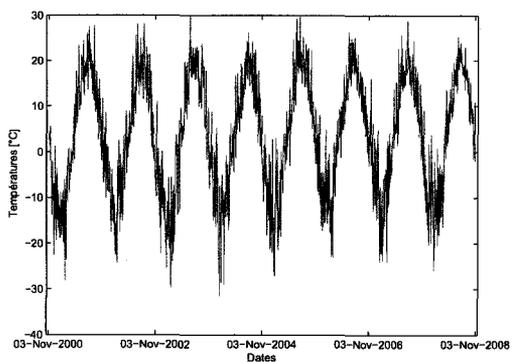
D.2.2 011204 – Nouvelle



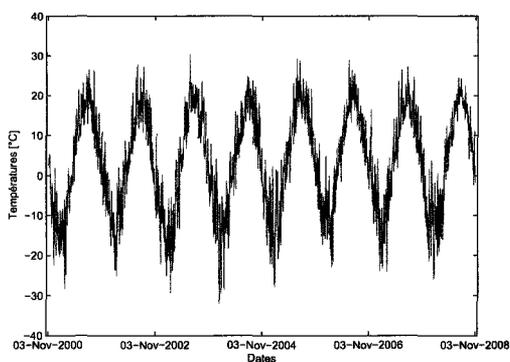
D.2.3 011509 – Matapedia



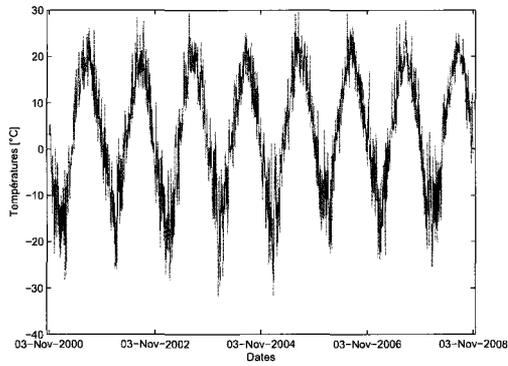
D.2.4 020404 – York



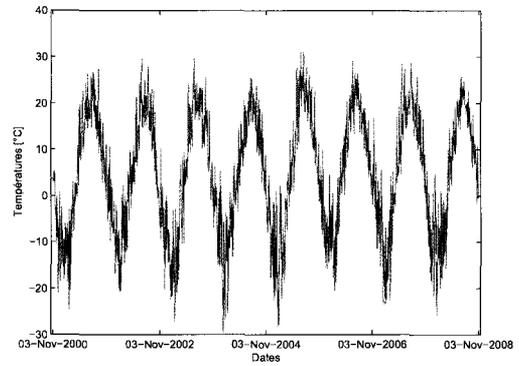
D.2.5 020602 – Dartmouth



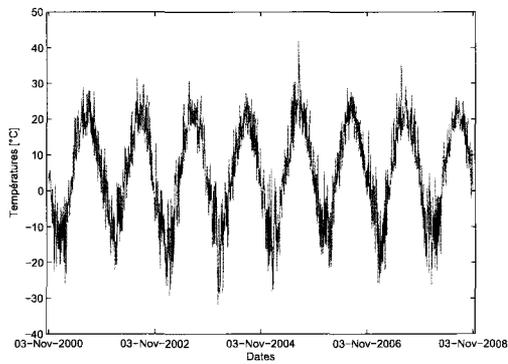
D.2.6 021407 – Sainte-Anne



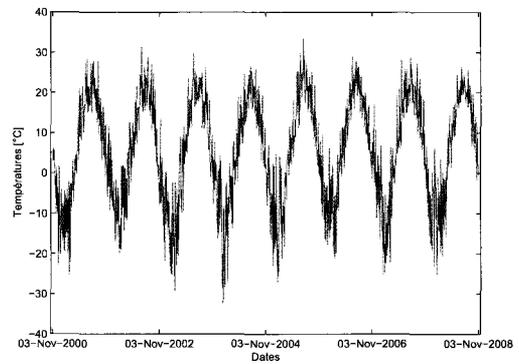
D.2.7 021601 – Matane



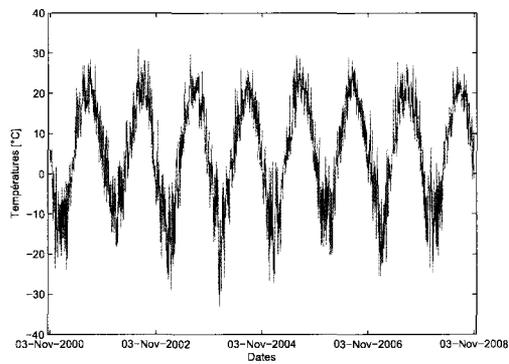
D.2.8 022003 – Rimouski



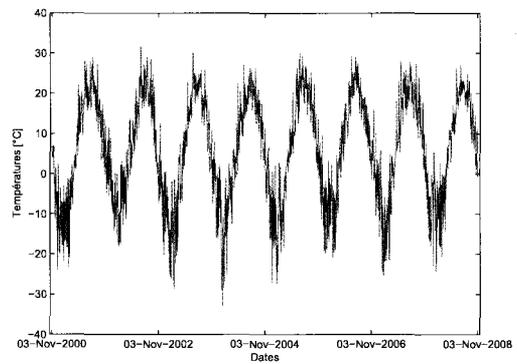
D.2.9 022501 – Morin



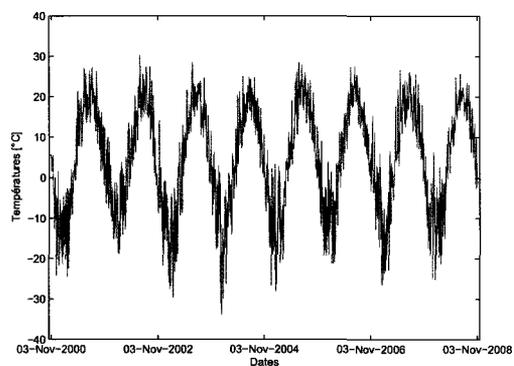
D.2.10 022704 – Ouelle



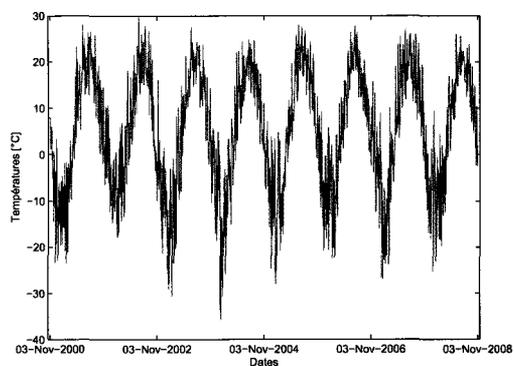
D.2.11 023303 – Etchemin



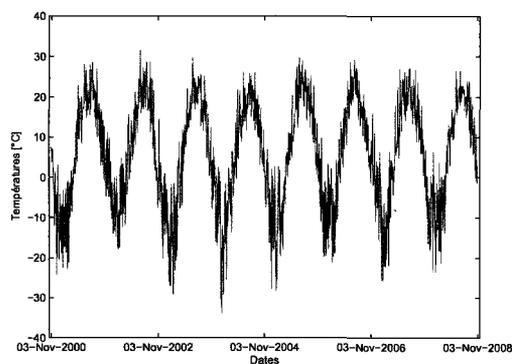
D.2.12 023401 – Beaurivage



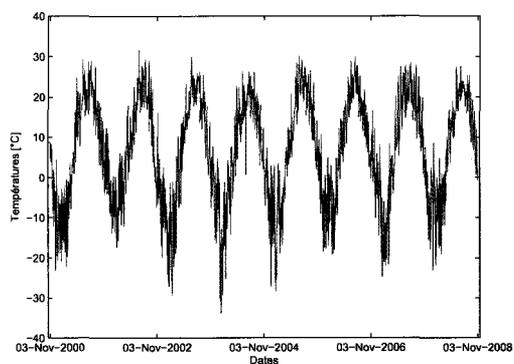
D.2.13 023422 – Famine



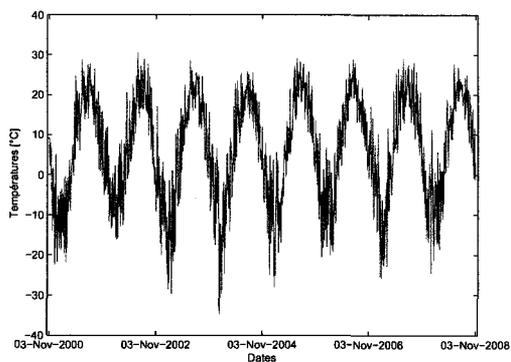
D.2.14 023427 – Lac Mégantic



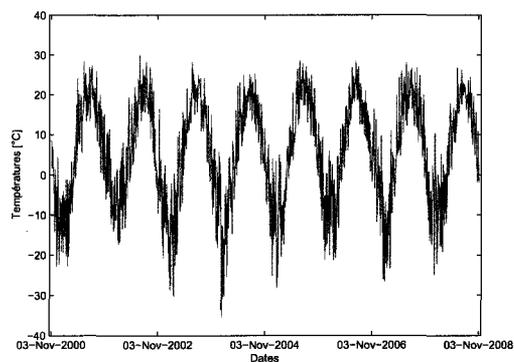
D.2.15 024014 – Bécancour



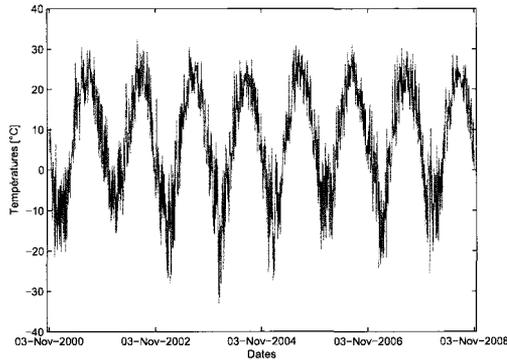
D.2.16 030103 – Nicolet



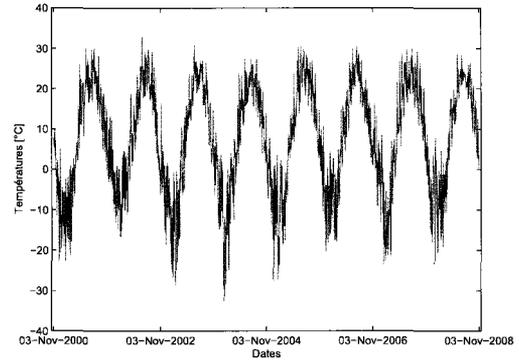
D.2.17 030234 – Eaton



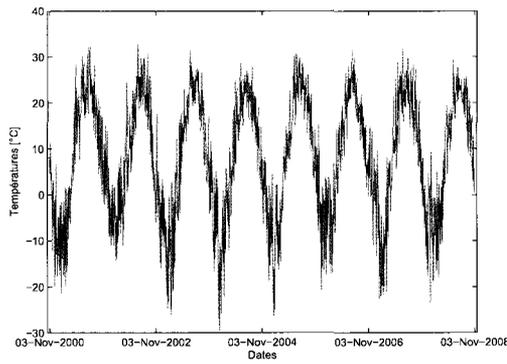
D.2.18 030282 – Au Saumon



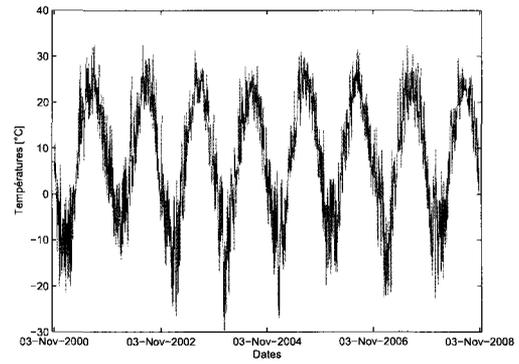
D.2.19 030304 - Noire



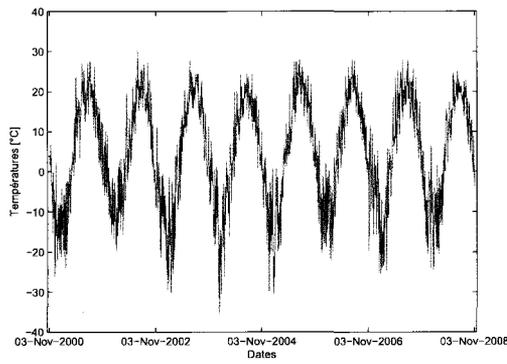
D.2.20 030316 - David



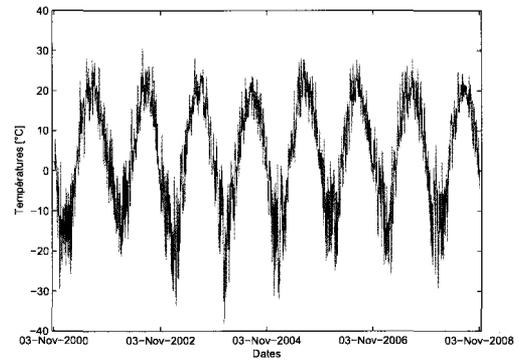
D.2.21 030421 - L'Acadie



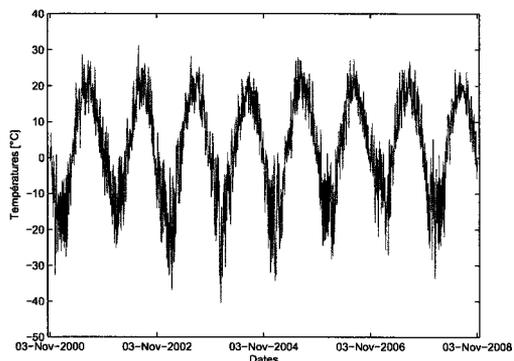
D.2.22 030905 - Chateauguay



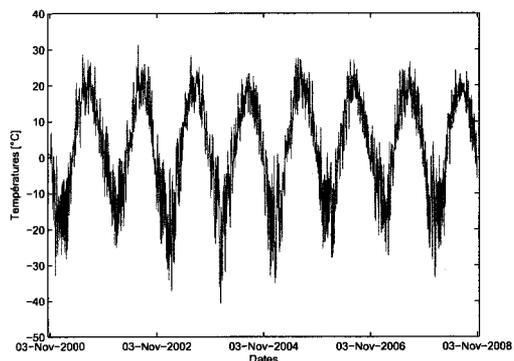
D.2.23 040110 - Du Nord



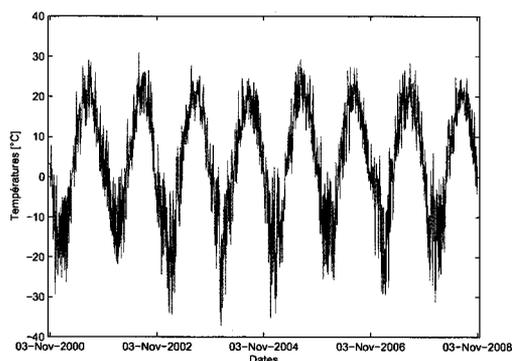
D.2.24 040608 - Kiamika



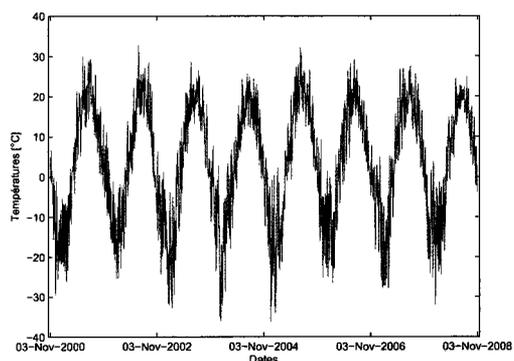
D.2.25 040609 – Mitchinamécus



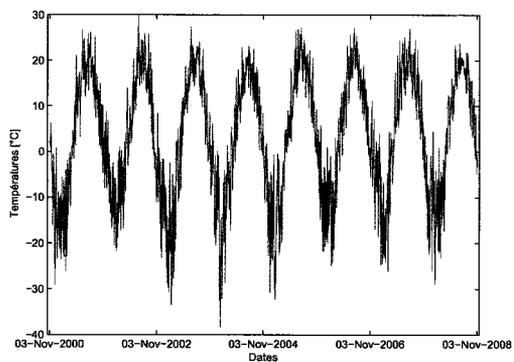
D.2.26 040830 – Gatineau



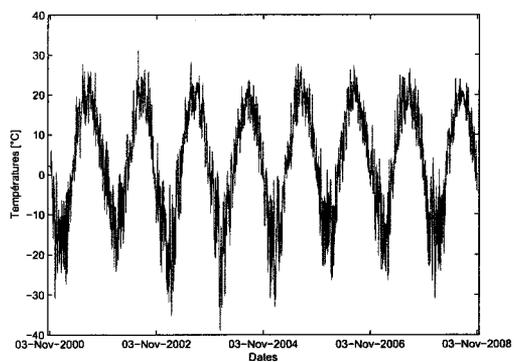
D.2.27 041902 – Dumoine



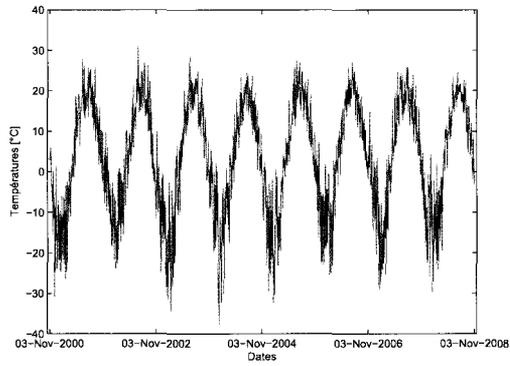
D.2.28 043012 – Kinojevis



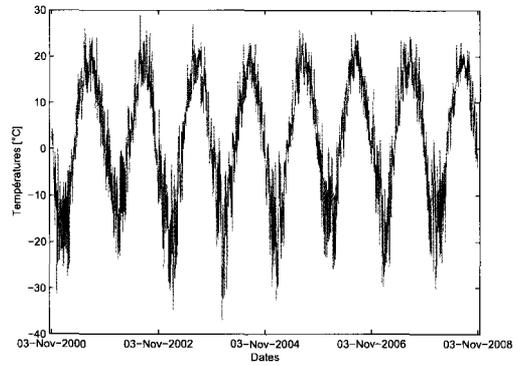
D.2.29 050119 – Matawin



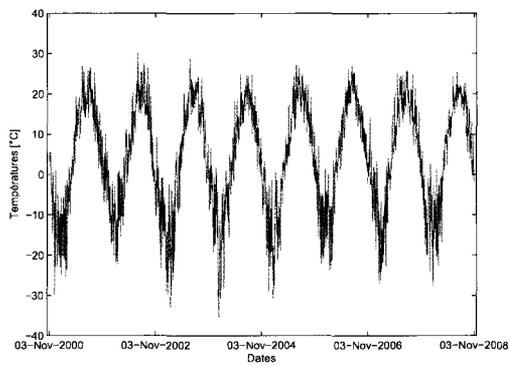
D.2.30 050144 – Vermillon



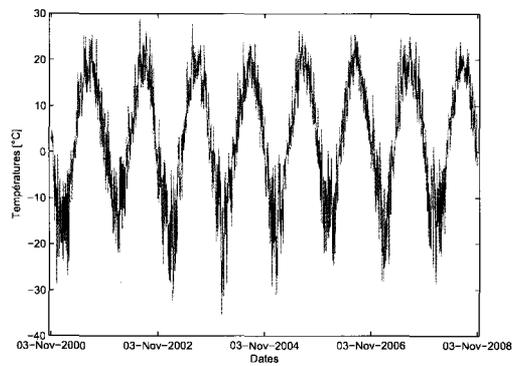
D.2.31 050304 - Batiscan



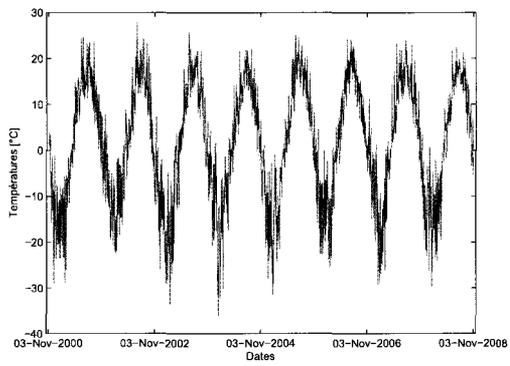
D.2.32 050408 - Sainte-Anne



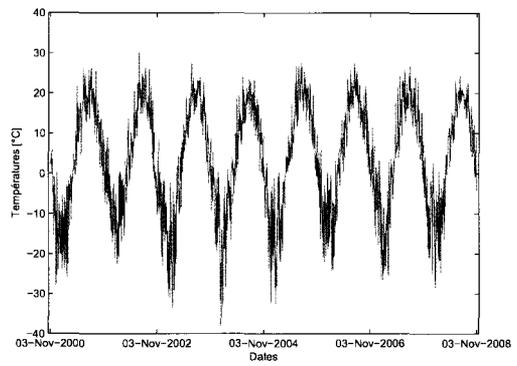
D.2.33 050702 - Portneuf



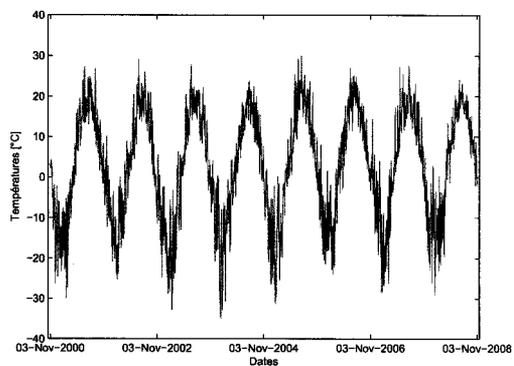
D.2.34 050904 - Saint-Charles



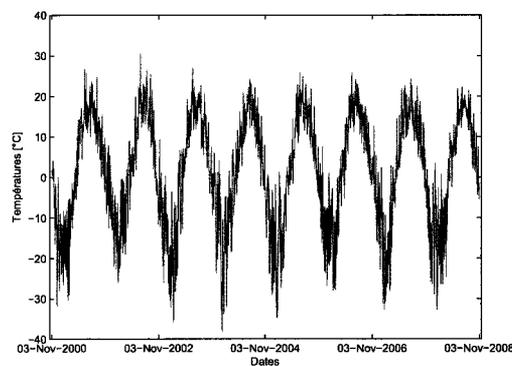
D.2.35 051001 - Montmorency



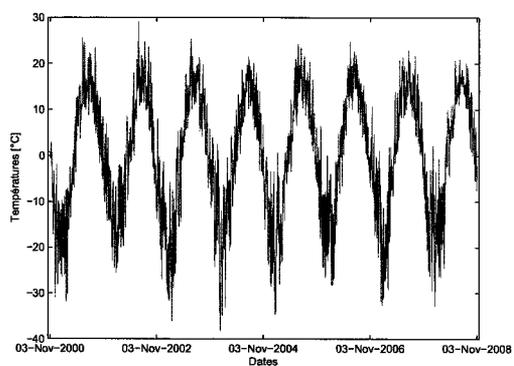
D.2.36 052605 - Maskinongé



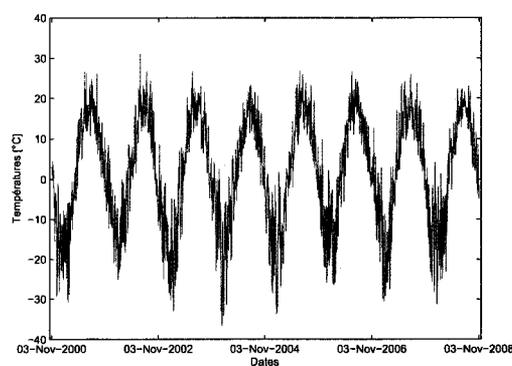
D.2.37 060102 – Petit Saguenay



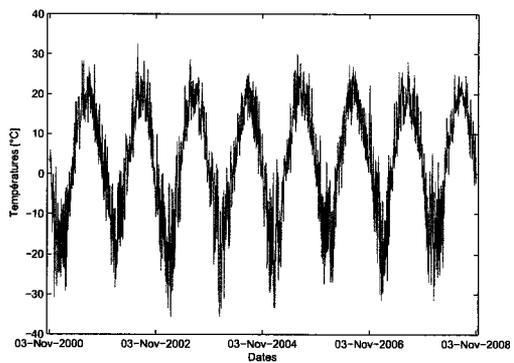
D.2.38 061020 – Aux Écorces



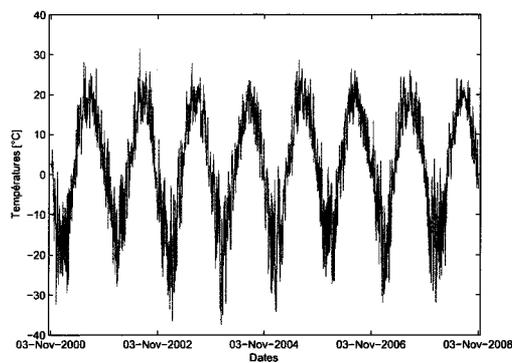
D.2.39 061022 – Pikauba



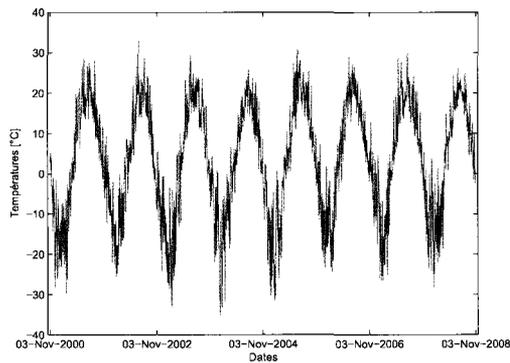
D.2.40 061024 – Cyriac



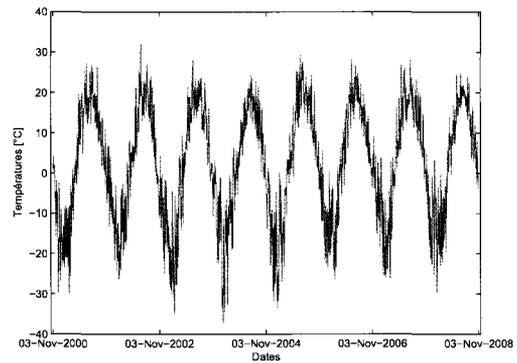
D.2.41 061307 – La Belle Rivière



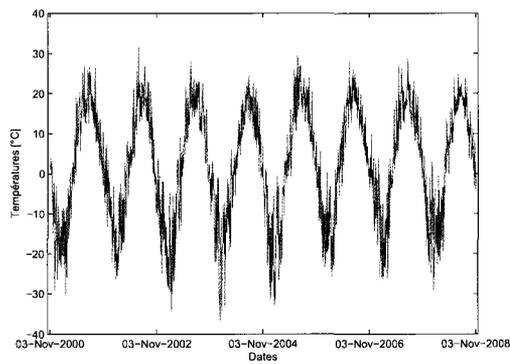
D.2.42 061601 – Des Commissaires



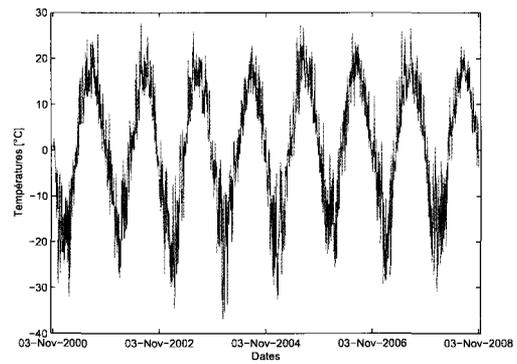
D.2.43 061801 – Petite Peribonca



D.2.44 061901 – Ashuapmushuan

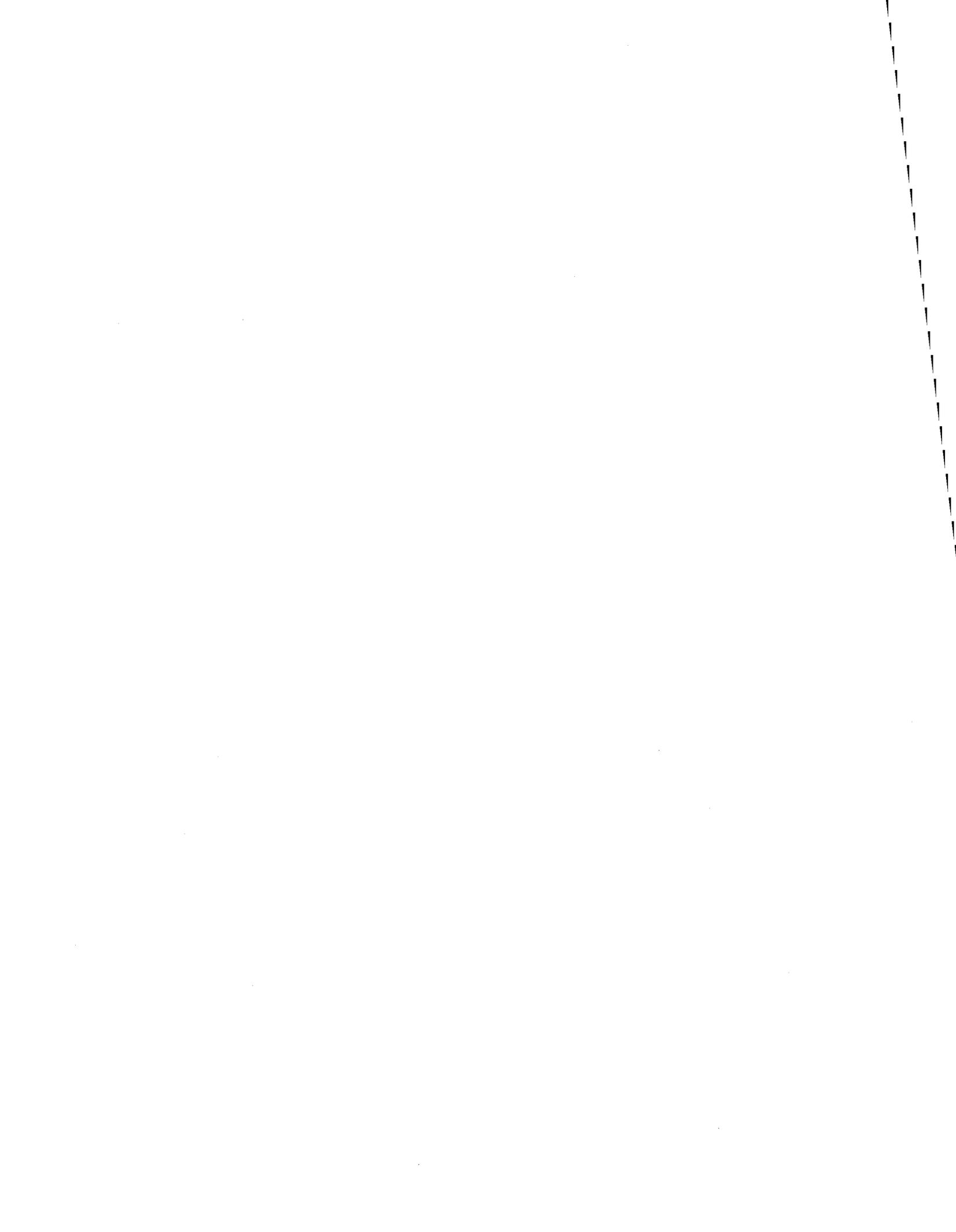


D.2.45 062102 – Mistassini



D.2.46 062803 – Sainte-Marguerite Nord-Est

FIGURE D.2 – Figures présentant la validation des températures



Annexe E

Cartes C_{Etp}

Les quatres cartes suivantes permettent d'identifier de façon visuelle le coefficient C_{Etp} issu de l'interpolation. Pour obtenir la grille présentant les valeurs numériques le lecteur est invité à communiquer directement avec l'auteur.

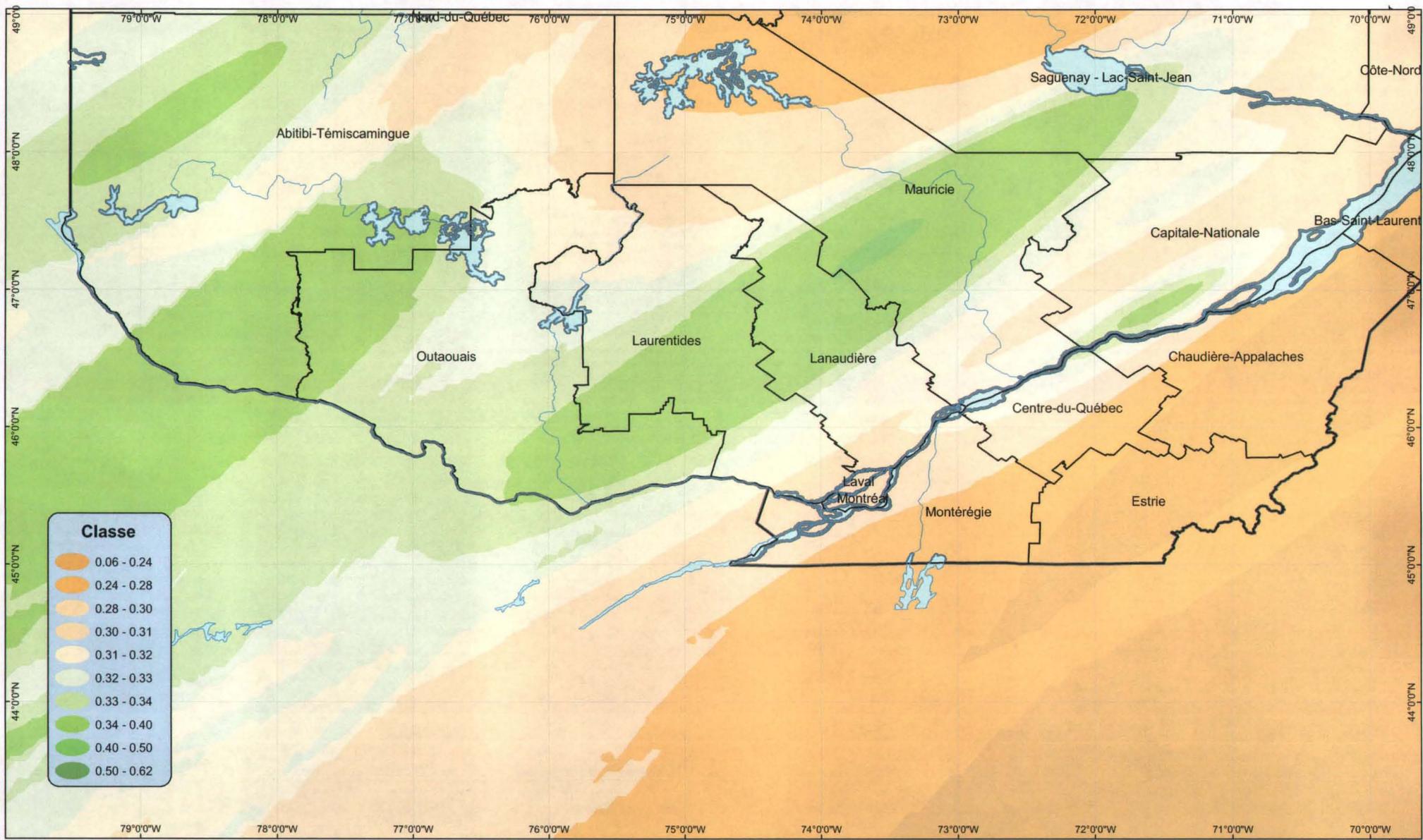


FIGURE E.1 – Carte permettant d’identifier le coefficient C_{Etp} à l’intérieur de la fenêtre définie par les coordonnées suivantes : $[80^{\circ} \text{O} - 49^{\circ} \text{N}]$ à $[70^{\circ} \text{O} - 55^{\circ} \text{N}]$

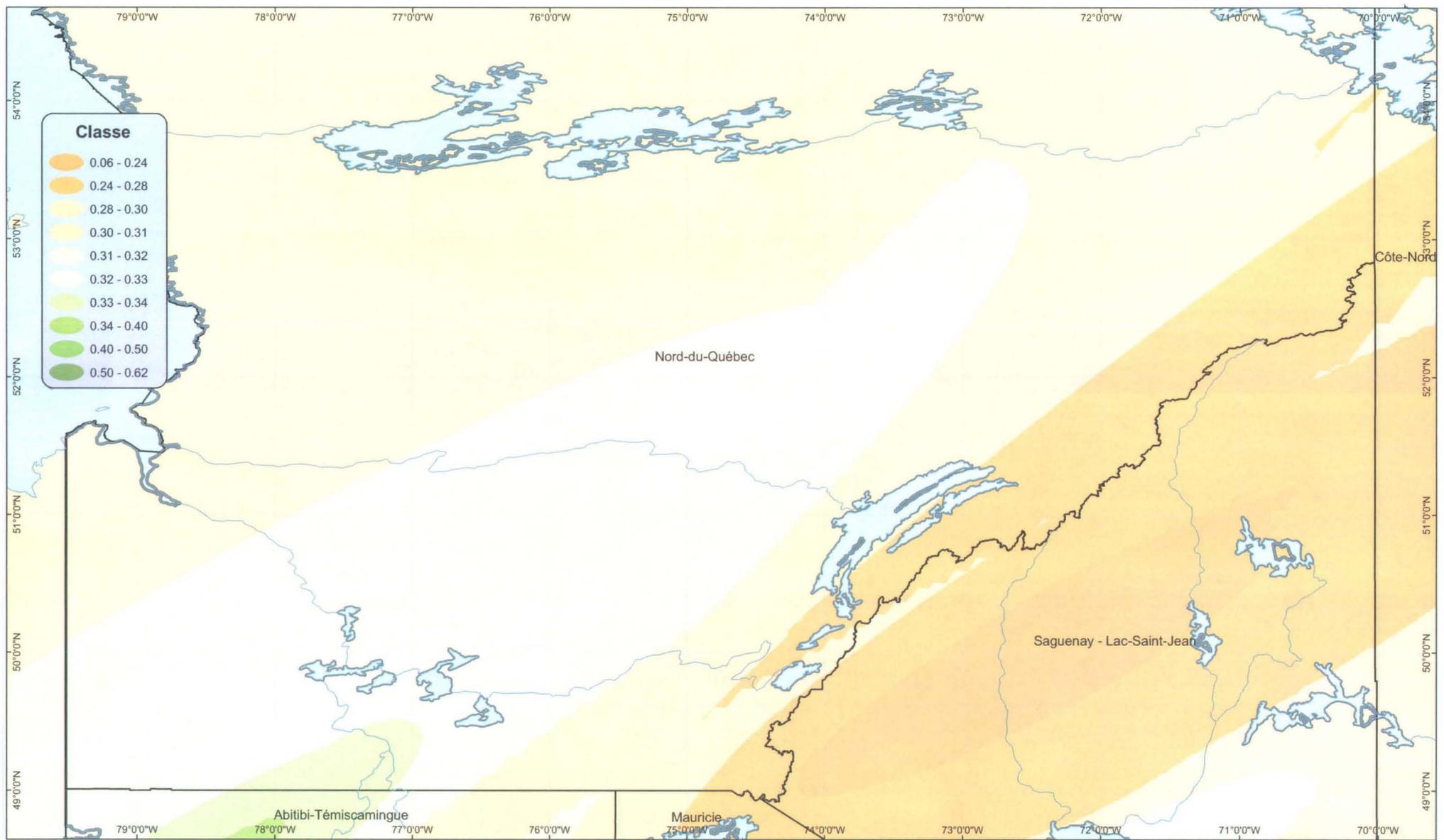


FIGURE E.2 – Carte permettant d’identifier le coefficient C_{Etp} à l’intérieur de la fenêtre définie par les coordonnées suivantes : [70° O – 49° N] à [60° O – 55° N]

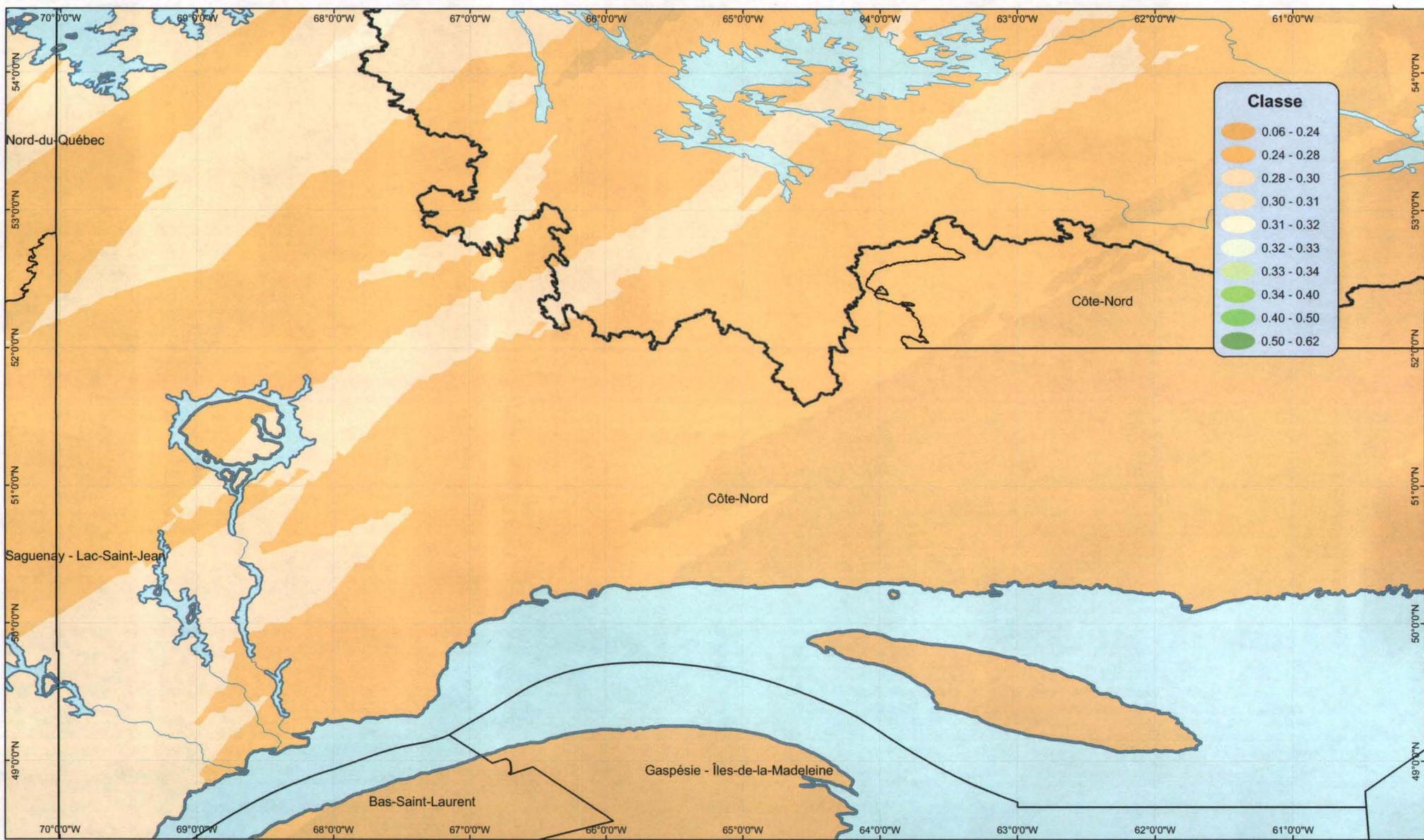


FIGURE E.3 – Carte permettant d’identifier le coefficient C_{Etp} à l’intérieur de la fenêtre définie par les coordonnées suivantes : [80° O – 43° N] à [70° O – 49° N]

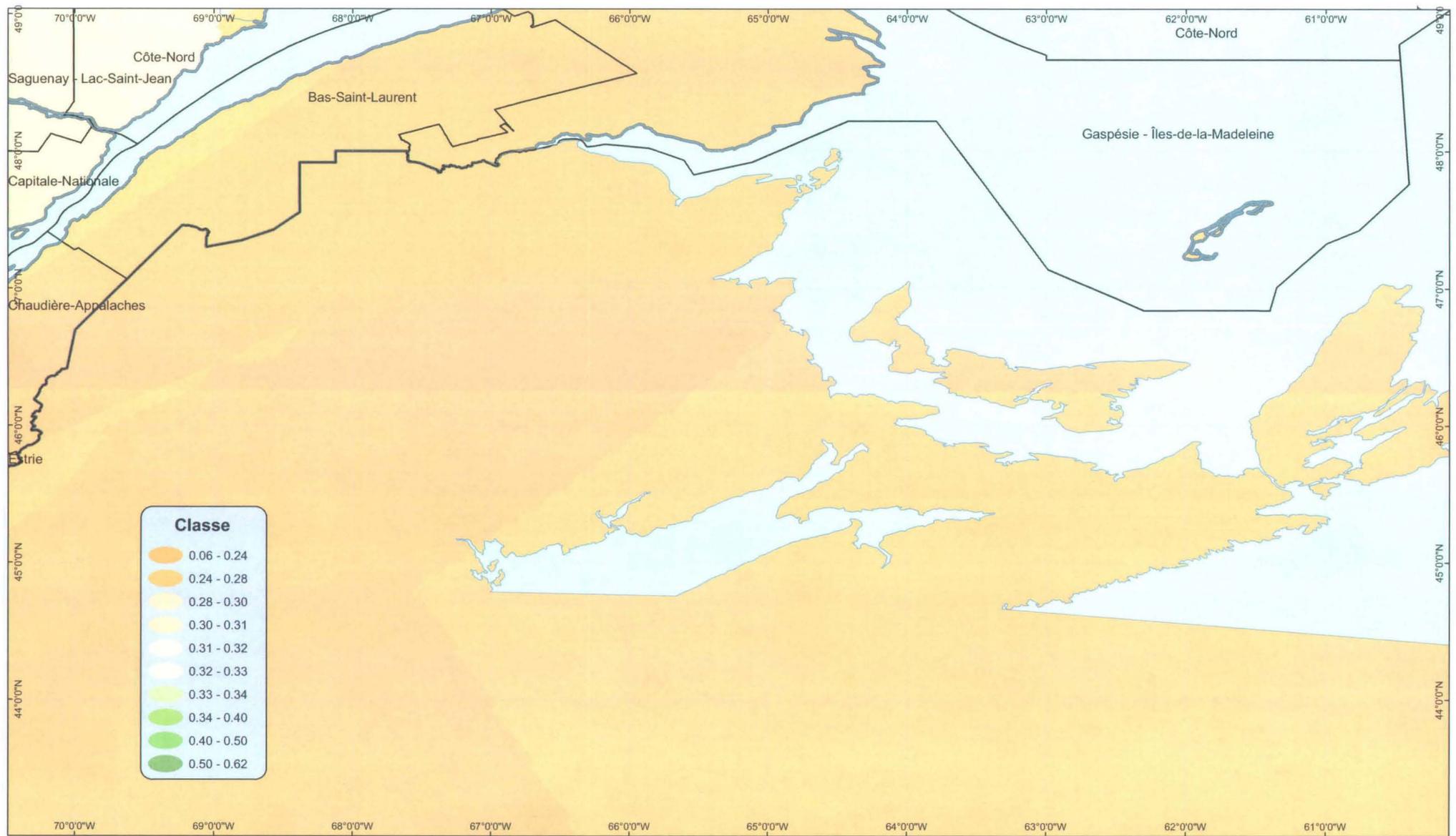


FIGURE E.4 – Carte permettant d’identifier le coefficient C_{Etp} à l’intérieur de la fenêtre définie par les coordonnées suivantes : [70° O – 43° N] à [60° O – 49° N]

