

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Mémoire
présenté
à

l'Université du Québec à Chicoutimi

comme exigence partielle
de la
Maîtrise en ressources et système

par

Serge Bouchard
B.Sc.A. (génie civil)

Amélioration d'un modèle hydrologique déterministe et son application à
la prévision des ruissellements du bassin du lac St-Jean.

SEPTEMBRE 1986



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.


The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
MAÎTRISE EN RESSOURCES ET SYSTÈME

TITRE: Amélioration d'un modèle hydrologique déterministe et son application à la prévision des ruissellements du bassin du lac St-Jean.

RÉSUMÉ: La nécessité de gérer efficacement la ressource-eau du bassin du lac St-Jean a incité la compagnie Alcan à développer, entre autres, un système de prévision hydrologique journalière à court terme (1 semaine). La présente étude porte sur les améliorations qui ont été apportées au modèle hydrologique déterministe original, élément clef du système de prévision. Les travaux ont consisté à élaborer une méthode de calibration des paramètres et à modifier les sous-modèles d'écoulement souterrain et de fonte de la neige, la fonction de transfert des ruissellements et la définition de l'année hydrologique. Une analyse des résultats a démontré que le modèle amélioré reproduisait mieux les ruissellements observés du bassin du lac St-Jean.

Pour conclure, les améliorations apportées au modèle déterministe ont été intégrées au système de prévision hydrologique de même que des correctifs résultant d'une évaluation des prévisions météorologiques disponibles et de la méthode de correction existante sur les sorties des prévisions. Une comparaison a ensuite été faite entre les prévisions du système amélioré et celles provenant d'un modèle stochastique. Appuyé d'un test statistique, les prévisions du système amélioré basées sur l'emploi d'un modèle déterministe se sont révélées meilleures dans ces conditions.


Van-Thanh-Van Nguyen
Directeur de recherche

 08/86
Serge Bouchard
Étudiant

REMERCIEMENTS

Je voudrais d'abord exprimer mes sincères remerciements à mon directeur, le docteur Van-Thanh-Van Nguyen de l'Université McGill de Montréal et à mon co-directeur, le docteur Robert M. Thompson de la Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée. Leur patience et leur compréhension à mon égard et leurs conseils m'ont permis de finalement mener à bien les résultats de cette étude. Également, je remercie le docteur Jean Rouselle de l'École Polytechnique de Montréal et le docteur Van-Diem Hoang du Ministère de l'environnement du Québec qui ont assuré la correction externe de ce mémoire.

J'adresse également mes remerciements aux autorités de la Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée qui m'ont permis de réaliser ce travail en fournissant le support informatique ainsi que les données du bassin du lac St-Jean.

Enfin, je veux témoigner toute ma reconnaissance et mon amitié à mes confrères et consoeurs de travail du groupe Ressources hydrauliques de l'Alcan et particulièrement à Madame Linda Salesse pour son aide précieuse et sa célérité dans la réalisation des travaux de programmation informatique nécessaire à cette recherche.

TABLE DES MATIÈRES

	PAGE
RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES ANNEXES	x
LISTE DES ABREVIATIONS ET DES SYMBOLES	xi
1- INTRODUCTION	1
2- DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SYSTÈME HYDROÉLECTRIQUE ÉTUDIÉ	5
2.1 Le système hydroélectrique Alcan	5
2.2 Le bassin hydrographique du Lac Saint-Jean	6
2.2.1 Caractéristiques géographiques	10
2.2.2 Caractéristiques hydrométéorologiques	13
3- LE MODÈLE HYDROLOGIQUE ORIGINAL MC1.....	26
3.1 Définition	26
3.2 Choix du modèle	27
3.3 Description du modèle original.....	29
4- AMÉLIORATION DE LA PROCÉDURE DE CALIBRATION.....	39
4.1 Généralités.....	40
4.2 Calibration de MC1.....	41
4.3 Élaboration d'une méthode de calibration.....	43
4.4 Nouvelle calibration de MC1	50
5. AMÉLIORATION DU MODÈLE HYDROLOGIQUE	58
5.1 Sous-modèle d'écoulement souterrain	61

	PAGE
5.2 Sous-modèle de fonte de la neige	67
5.2.1 Équation de fonte de la neige sans précipitation ..	69
5.2.2 Equation de fonte de la neige avec précipitation ..	74
5.2.3 Synthèse et analyse du nouveau sous-modèle de fonte	78
5.3 Fonction de transfert des ruissellements	79
5.4 La définition de l'année hydrologique	85
5.5 Le nouveau modèle MC2	87
5.6 La calibration de MC2	90
6- COMPARAISON DES RÉSULTATS	94
6.1 Résultats généraux	94
6.2 Résultats en période de crue	108
7- SYSTÈME DE PRÉVISION BASÉ SUR L'UTILISATION D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE DETERMINISTE	114
7.1 Description du système de prévision	115
7.2 Evaluation de la qualité des prévisions météorologiques...	119
7.2.1 Prévision de la précipitation	120
7.2.2 Prévision de la température	128
7.3 Evaluation de la méthode de correction sur les résultats des prévisions	130
8- COMPARAISON DES PREVISIONS HYDROLOGIQUES D'UN MODELE DETERMI- NISTE ET D'UN MODELE STOCHASTIQUE	134
8.1 Description du modèle stochastique	135
8.2 Résultats de la comparaison	138
9- CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	146
9.1 Conclusion	146
9.2 Recommandations pour les travaux futurs	148
RÉFÉRENCES	150
ANNEXES	157

LISTE DES FIGURES

	PAGE
2.1 Vue en perspective du système hydroélectrique Alcan au Saguenay-Lac-Saint-Jean	7
2.2 Localisation des réservoirs et centrales du système hydroélectrique Alcan au Saguenay-Lac-Saint-Jean	8
2.3 Délimitation, hypsométrie et courbe hypsométrique du bassin hydrographique du lac Saint-Jean	12
2.4 Variation et moyenne journalière des apports non contrôlés du bassin du lac Saint-Jean	18
2.5 Réseau des stations météorologiques avec données quotidiennes	21
2.6 Réseau des stations nivométriques	23
3.1a Le cycle hydrologique	30
3.1b Structure du modèle hydrologique MC1	30
5.1a Schéma du sous-modèle d'écoulement souterrain de MC1	63
5.1b Schéma du sous-modèle d'écoulement souterrain proposé	63
5.2 Comparaison de T et ECH pour une période de température chaude au printemps.....	71
5.3 Effet du réducteur de sensibilité sur le facteur degré-jour	73
5.4 Schéma simplifié du nouveau sous-modèle de fonte	80
5.5 Comparaison d'un hydrogramme unitaire historique et de l'hydrogramme unitaire synthétique de MC1	82
6.1 Résultats des simulations pour la période de calibration avec MC1.....	97
6.2 Résultats des simulations pour la période de calibration avec MC2	98
6.3 Résultats des simulations avec MC1 et MC2: année de validation 1980	99

LISTE DES FIGURES (suite)

	PAGE
6.4 Résultats des simulations avec MC1 et MC2: année de validation 1981	100
6.5 Résultats des simulations avec MC1 et MC2: année de validation 1982	101
6.6 Diagrammes de dispersion de MC1 et MC2 pour les années de validation 1980 à 1982	105
6.7 Hydrogrammes et diagrammes de dispersion des deux modèles pour la période de crue (validation)	109
8.1 Prévisions des ruissellements avec TFN et PREVIS (MC2) pour 1980	142
8.2 Prévisions des ruissellements avec TFN et PREVIS (MC2) pour 1981	143
8.3 Prévisions des ruissellements avec TFN et PREVIS (MC2) pour 1982	144

LISTE DES TABLEAUX

	PAGE
I Caractéristiques des réservoirs	9
II Caractéristiques des centrales	9
III Caractéristiques des bassins versants	9
IV Principaux tributaires du bassin du lac Saint-Jean	15
V Variabilité saisonnière des apports non contrôlés du bassin du lac Saint-Jean (1943-83)	16
VI Données météorologiques mensuelles et annuelles moyennes estimées pour le bassin du lac Saint-Jean	19
VII Paramètres du modèle hydrologique MC1	37
VIII Identification des besoins pour la calibration d'un modèle hydrologique prévisionnel	47
IX Années historiques sélectionnées pour la nouvelle calibration de MC1	52
X Valeurs des paramètres lors de la calibration de MC1	55
XI Résultats des calibrations avec MC1	56
XII Comparaison des équations paramétriques des modèles MC1 et MC2	88
XIII Paramètres du modèle hydrologique MC2	89
XIV Valeurs des paramètres lors de la calibration de MC2	93
XV Critères graphiques et numériques de vérification utilisés .	95
XVI Comparaison des résultats à partir des valeurs des paramètres statistiques	102
XVII Résultats numériques des deux modèles pour la période de crue	111
XVIII Prévisions météorologiques pour les sept prochains jours ...	117
XIX Précision de la prévision de l'événement de précipitation ..	122

LISTE DES TABLEAUX (suite)

XX	Précision de la prévision de l'événement de précipitation après modification sur les valeurs de probabilité à long terme	125
XXI	Précision des prévisions de quantité de précipitation en pourcentage	127
XXII	Précision des prévisions de la température en pourcentage...	129
XXIII	Résultats numériques pour le modèle MC2 sans et avec corrections basées sur les apports non contrôlés observés ..	132
XXIV	Valeurs des paramètres du modèle hydrologique stochastique TFN	137
XXV	Comparaison entre TFN, PREVIS (MC1) et PREVIS (MC2) pour la période de validation (1980-82)	139

LISTE DES ANNEXES

	<u>PAGE</u>
Annexe 1: Ordinogramme détaillé du modèle hydrologique MC1	157
Annexe 2: Description des critères numériques utilisés dans la comparaison des résultats	163
Annexe 3: Ordinogramme détaillé du modèle hydrologique MC2	166
Annexe 4: Prévisions hydrologiques par périodes de 1/4 de mois pour PREVIS (MC2) et TFN pour la période du 01/01/80 au 31/12/82	169

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

ANCOBS	= Apport non contrôlé observé
ANCSIM	= Apport non contrôlé simulé
a_t	= Bruit blanc ("white noise") de N_t
CCR	= Coefficient de corrélation entre les apports non contrôlés observés et simulés
CF	= Critère d'évaluation finale (voir annexe 2)
CNA	= Critère de Nash (voir annexe 2)
CPCRU	= Critère de pointe (voir annexe 2)
CV	= Critère de volume (voir annexe 2)
CVCRU	= Critère d'évaluation du volume durant la crue
DELTAT	= Temps de montée de l'hydrogramme unitaire synthétique
E	= Evapotranspiration
ECH	= Energie de chaleur
E(X)	= Résidus ou erreur du modèle X, soit ANCOBS-ANCSIM
E(Y)	= Résidus ou erreur du modèle Y, soit ANCOBS-ANCSIM
F	= Fonction critère (erreur moyenne élevée au carré)
GW	= Eau souterraine contenue dans la nappe phréatique
H_0	= Hypothèse nulle
H_1	= Hypothèse alternative
HUH	= Hydrogramme unitaire historique
HUS	= Hydrogramme unitaire synthétique
Km^2	= Kilomètres carrés
LAC	= Eau résiduelle souterraine
m^3/s	= Mètres cubes par seconde
MC1	= Modèle conceptuel 1
MC2	= Modèle conceptuel 2 (amélioré)
MW	= Mégawatts
m^3	= Mètres cubes
mm	= Millimètres
N	= Grandeur de l'échantillon
N_t	= Composante stochastique de bruit de TFN
p	= Niveau de confiance
P	= Précipitation
PERC	= Eau de percolation
PL	= Précipitation liquide (pluie)
PREVIS	= Système de prévisions hydrologiques à court terme

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES (SUITE)

QMAX	= Apport non contrôlé de pointe de l'hydrogramme unitaire synthétique
RGW	= Ruissellement de base
RLAC	= Ruissellement souterrain global
RP	= Ruissellement superficiel
RPS	= Ruissellement en régime saturé
RSM	= Ruissellement de l'eau de fonte
RSTOR	= Ruissellement de l'écoulement intermédiaire
S	= Erreur type d'estimation
SAC	= Accumulation de neige au sol
SIH	= Système d'information hydrométéorologique
SM	= Eau de fonte de la neige
SMCH	= Eau de fonte due à la chaleur
SMP	= Eau de fonte de la neige due à la pluie
SSARR	= "Streamflow Synthesis And Reservoir Regulation"
STOR	= Ecoulement intermédiaire
SUMECH	= Energie de chaleur cumulée
SUML	= Pluie cumulée
T	= Température
T _B	= Température de base (seuil de congélation)
TFN	= "Transfer Function-Noise" ou modèle stochastique basé sur l'emploi d'une fonction de transfert avec bruit
TM	= Température moyenne journalière
TMN	= Température minimale
TMX	= Température maximale
TSNM	= Température de base pour la fonte de la neige
t	= Temps
T(+)	= Somme des différences positives dans le test de Wilcoxon
UBC	= "University of British Columbia"
UNTHYD	= Sous-programme qui calcule l'hydrogramme unitaire synthétique
$\omega_{i,j}$	= Paramètres du modèle TFN
Wp	= Seuil d'acceptation du test de Wilcoxon
X ₁ @ X ₁₉	= Voir tableaux VII et XIII (p. 37 et 89)
XIN	= Entrée d'eau résiduelle souterraine
x _{t,i}	= Série de variables désaisonnalisées
y _t	= Prévion des apports non contrôlés du modèle TFN
$\delta_{i,j}$	= Paramètres du modèle TFN
ϕ_i	= Paramètres autorégressif de N
θ_i	= Paramètres de la moyenne mobile de N
v _i	= Fonction de transfert

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Pour gérer efficacement une ressource, le décideur d'aujourd'hui doit être en mesure de compter sur des informations pertinentes et systématiques. Plus particulièrement dans le cas de l'opération d'un système hydroélectrique à plusieurs réservoirs, la planification de la gestion de la ressource-eau nécessite, entre autres, des prévisions adéquates des apports d'eau aux différents réservoirs. Certaines techniques développées durant les dernières décennies, telles l'analyse des systèmes et les calculs par ordinateurs, ont permis de mettre en place de nouveaux outils très utiles dans ce domaine.

Notamment, un système de prévision hydrologique à court terme a été implanté à la Société d'électrolyse et de chimie Alcan ltée en 1979 (Thompson et al., 1981; Bouchard et Salesse, 1982). Il constituait une étape d'un projet de recherche d'envergure réalisé en vue d'accroître la capacité de production des installations hydroélectriques d'Alcan dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean au Québec (SECAL, 1982). Ce système de prévision hydrologique, qui consiste à évaluer les conditions d'apports non contrôlés (ruissellements) journaliers pour une période d'une semaine, s'est révélé depuis son implantation un outil d'information

essentiel pour la gestion à court terme du bassin hydrographique du lac Saint-Jean.

C'est au niveau de l'optimisation de la production d'énergie hydroélectrique et de l'évaluation du risque d'inondation que l'information sur les prévisions hydrologiques exerce un rôle prépondérant. Une mauvaise information peut influencer la prise de décision et entraîner des conséquences négatives au point de vue social, économique ou environnemental. On conçoit dès lors aisément qu'il est important de fournir une bonne prévision au gestionnaire. C'est l'objectif global de ce mémoire que d'améliorer la qualité des prévisions hydrologiques. C'est en s'attardant principalement à l'amélioration de l'élément clef du système de prévision existant, soit un modèle hydrologique conceptuel de type déterministe, que cet objectif a été atteint.

Ce genre de modèle conceptuel permet de simuler le cycle hydrologique à l'aide d'équations mathématiques. Il y a, cependant, certains problèmes inhérents à son utilisation au niveau de la calibration des paramètres, de la fiabilité de reproduction des ruissellements réels aux périodes hydrologiques critiques (crues et averses extrêmes) et dans l'application à la prévision. Ce sont ces éléments qui ont été traités plus particulièrement dans cette étude.

Le chapitre 2 présente d'abord les caractéristiques du système hydroélectrique et du bassin hydrographique (géographie et hydrométéorologie) du lac St-Jean.

Le chapitre 3 traite brièvement du modèle hydrologique choisi lors de l'implantation du système de prévision hydrologique à court terme de l'Alcan. Une description dudit modèle est effectuée.

Le chapitre 4 est consacré au développement d'une méthode de calibration améliorée. La nouvelle méthode de calibration est appliquée au modèle hydrologique original et une discussion des résultats est présentée. Suite aux résultats obtenus, d'importantes améliorations sont apportées au modèle original afin d'obtenir une meilleure adéquation avec les apports non contrôlés réels et afin de mieux répondre aux besoins des gestionnaires. Les améliorations sont présentées au chapitre 5 et les résultats obtenus au chapitre 6.

Au chapitre 7, on décrit le système de prévision hydrologique à court terme de l'Alcan et les résultats de l'évaluation de deux éléments importants de ce système soit les prévisions météorologiques et la méthode de correction sur les résultats des prévisions sont présentées.

Enfin, le chapitre 8 est consacré à la comparaison des prévisions hydrologiques provenant du modèle déterministe amélioré avec celle d'un modèle stochastique et le chapitre 9 élabore les conclusions et recommandations.

CHAPITRE 2

DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SYSTÈME HYDROÉLECTRIQUE ÉTUDIÉ

L'utilisation de techniques mathématiques modernes appliquées à la gestion d'un système hydroélectrique à réservoirs multiples comme celui d'Alcan représente un problème complexe. Il devient alors important de situer les éléments en présence pour faciliter la compréhension de ce mémoire. Ce chapitre présente donc un bref aperçu des caractéristiques du système hydroélectrique Alcan et du bassin hydrographique du lac Saint-Jean. Mentionnons qu'à travers ce chapitre, les caractéristiques pouvant influencer le comportement d'un modèle hydrologique utilisé en mode de prévision feront l'objet d'une attention particulière.

2.1 LE SYSTÈME HYDROÉLECTRIQUE ALCAN

Le système hydroélectrique Alcan est localisé à l'intérieur de l'immense bassin versant de la rivière Saguenay sur le versant nord du fleuve Saint-Laurent au Québec. Il comporte trois réservoirs d'importance permettant un emmagasinement d'eau utilisable de 12 673 hectomètres cubes et six centrales ayant une capacité totale de 2 687 mégawatts. La

figure 2.1 montre une vue en perspective de l'ensemble des installations.

Le bassin de drainage alimentant ces ouvrages couvre une superficie de 73 100 kilomètres carrés et fournit des apports non contrôlés annuels moyens de l'ordre de 1 465 mètres cubes par seconde. Une distance d'environ 550 kilomètres sépare le point le plus au sud du bassin de celui le plus au nord. Les apports non contrôlés disponibles permettent une production optimale de 1980 mégawatts (SECAL, 1982).

A titre d'information complémentaire, la figure 2.2 montre une carte de localisation des réservoirs et centrales et on fournit aux tableaux I et II les diverses spécifications techniques du système.

2.2 LE BASSIN HYDROGRAPHIQUE DU LAC SAINT-JEAN

La superficie totale du bassin (73 100 km²) se subdivise en trois sous-bassins principaux (lac Manouane, Passes Dangereuses et lac St-Jean) ayant comme exutoire un ouvrage hydraulique ou une centrale hydroélectrique. Les caractéristiques de ces sous-bassins sont fournies au tableau III.

Dans le cadre de cette étude, seul le bassin du lac Saint-Jean sera considéré. Il couvre à lui seul 57 100 kilomètres carrés soit 78% du bassin total du système hydroélectrique Alcan.

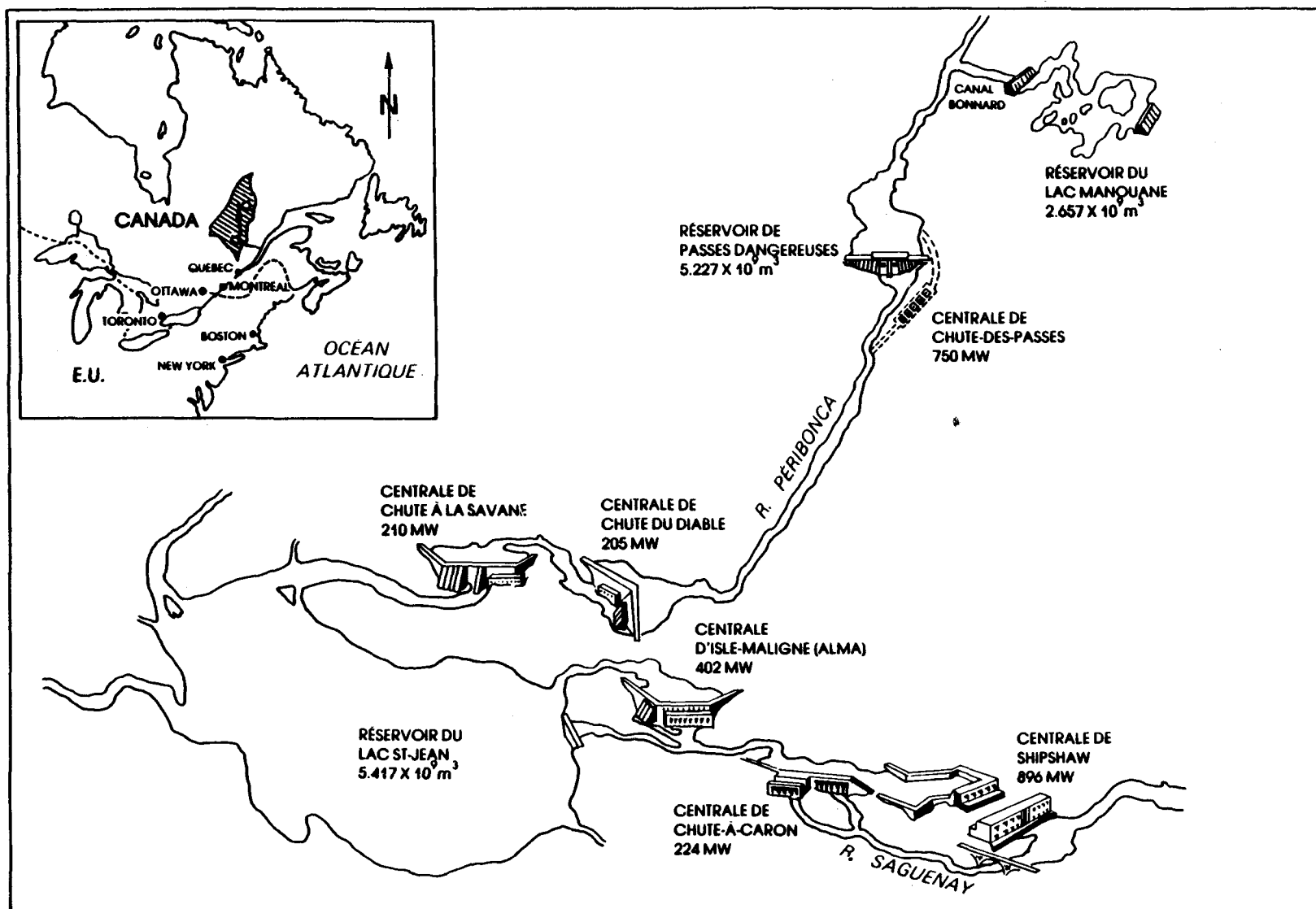


FIGURE 2.1: Vue en perspective du système hydroélectrique Alcan au Saguenay-Lac-St-Jean

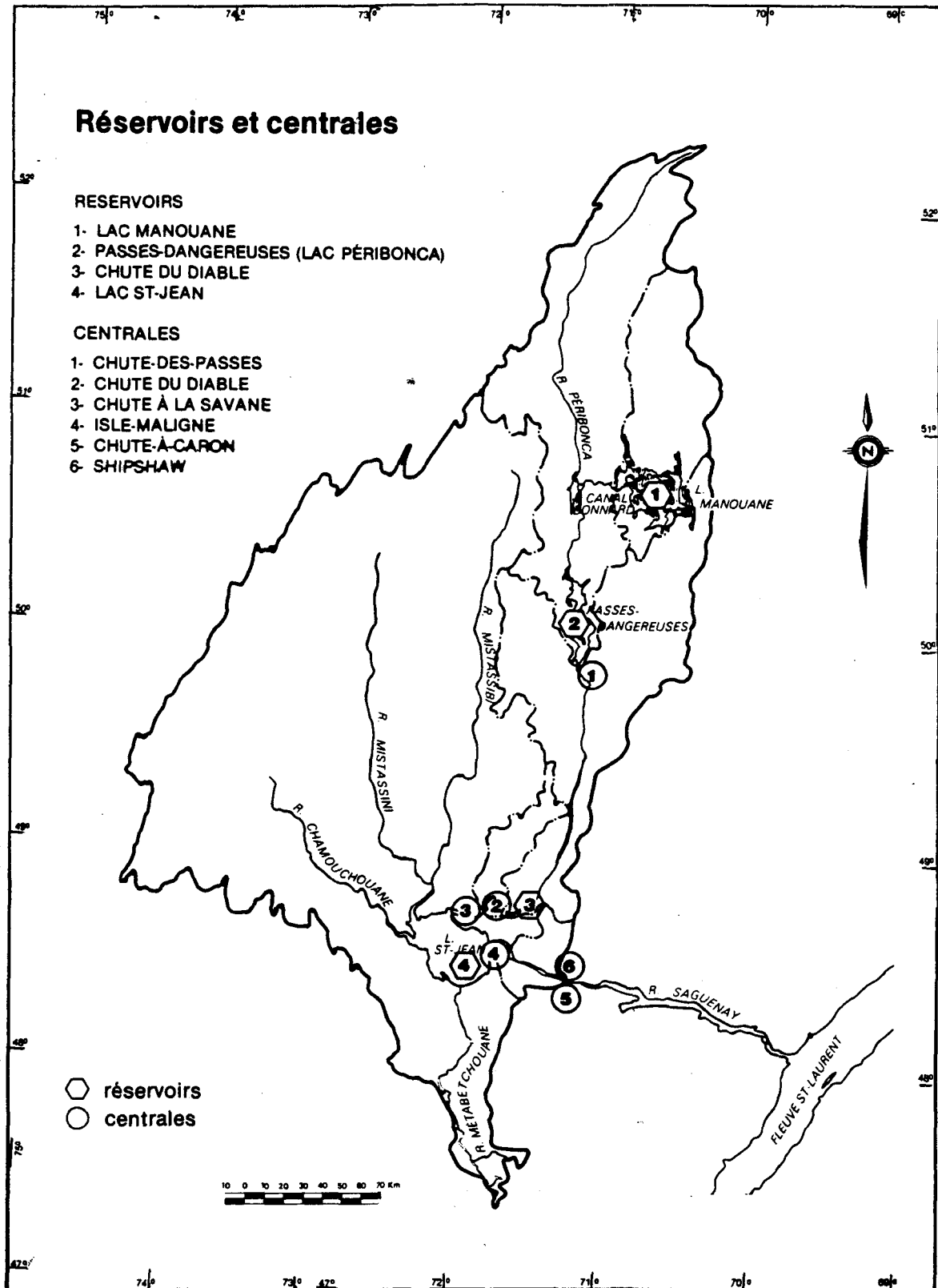


FIGURE 2.2: Localisation des réservoirs et centrales du système hydroélectrique Alcan au Saguenay-Lac-St-Jean

TABLEAU I: CARACTÉRISTIQUES DES RÉSERVOIRS

Réservoirs	Emmagasinement utile (10^9 m^3)
Lac Manouane	2 657
Passes-Dangereuses	5 158
Lac Saint-Jean	4 858
Total	12 673

TABLEAU II: CARACTÉRISTIQUES DES CENTRALES

Centrale	Année complétée	Hauteur de chute (mètres)	Puissance installée (MW)	Nombre d'unités
Chutes-des-Passes	1960	195	750	5
Chute du Diable	1951	33	205	5
Chute à la Savane	1953	33	210	5
Isle-Maligne	1926	33	402	12
Shipshaw	1943	64	896	12
Chute-à-Caron	1932	49	224	4
Total			2 687	43

TABLEAU III: CARACTÉRISTIQUES DES BASSINS VERSANTS

Bassin versant	Superficie (km^2)	Apport non contrôlé annuel* (m^3/s)	Apport non contrôlé en période de crue* (10^9 m^3)
Lac Manouane	5 000	115	1 290
Passes Dangereuses	11 000	250	3 000
Lac Saint-Jean	57 100	1 100	15 345
Total	73 100	1 465	19 635

* Statistiques: 1943 @ 1983 (période de crue définie du 1er avril au 15 juin)

De plus, les caractéristiques hydrologiques et hydrauliques du lac Saint-Jean sont particulières. Entre autres, au printemps, le taux d'apports non contrôlés devient fréquemment supérieur à la capacité d'évacuation. Il faut donc effectuer une gestion vigilante pour prévenir tout risque d'inondation. Enfin, le contexte socio-économique moderne confère au lac Saint-Jean une variété d'utilisation. L'exploitation du lac Saint-Jean à des fins récréatives et hydroélectriques constituent les utilisations dominantes et exigent une gestion ordonnée de la ressource-eau. Dans ce contexte, un système de prévision hydrologique constitue un important outil d'information pour la gestion à court terme du bassin du lac Saint-Jean.

Afin de compléter l'information sur le contexte d'application du présent mémoire, une description des principales caractéristiques géographiques et hydrométéorologiques du bassin étudié est présentée aux pages suivantes. Rappelons qu'il s'agit uniquement du bassin versant du lac Saint-Jean.

2.2.1 Caractéristiques géographiques

Le bassin hydrographique du lac Saint-Jean s'étend entre les latitudes nord 47°20' et 51°10' et les longitudes ouest 70°20' et 74°20'. C'est le complexe hydroélectrique d'Isle-Maligne, localisé sur

les rivières Grande Décharge et Petite Décharge à l'est du lac Saint-Jean, qui sert d'exutoire. On retrouve également deux centrales au fil de l'eau, soit Chute à la Savane et Chute du Diable, situées sur la portion de la rivière Péribonca incluse dans le bassin. La forme du bassin est un "Y", orienté nord/sud, ayant une surface proéminente dans la partie ouest. L'altitude varie entre les cotes 100 et 850 mètres. L'altitude moyenne est estimée à 413 mètres (Pilon et Thompstone, 1979a). La figure 2.3 montre la délimitation, l'hypsométrie et la courbe hypsométrique du bassin du lac Saint-Jean.

Du point de vue géologique, le territoire contient des dépôts meubles d'origine glaciaire et post-glaciaire (Lasalle et Tremblay, 1978). On retrouve principalement des argiles jusqu'aux limites des basses-terres (cote 100 à 200 mètres). Le comportement hydraulique de l'argile est d'assimiler beaucoup d'eau et de la restituer très lentement. Elle a tendance à rester imbibée. Aux altitudes supérieures à 200 mètres, on retrouve des vallées de dépôts fluvio-glaciaires le long des principales rivières, des affleurements rocheux et beaucoup de vestiges du passage des glaciers continentaux (till glaciaires).

Dans l'ensemble, avec le type de matériau que l'on retrouve en surface du territoire du lac Saint-Jean, on devrait s'attendre à une réponse relativement rapide du bassin lors d'averses de pluie intense et uniforme, comparativement à des terrains de pente moyenne et de superficie comparable. L'analyse d'hydrogrammes historiques corrobore ce

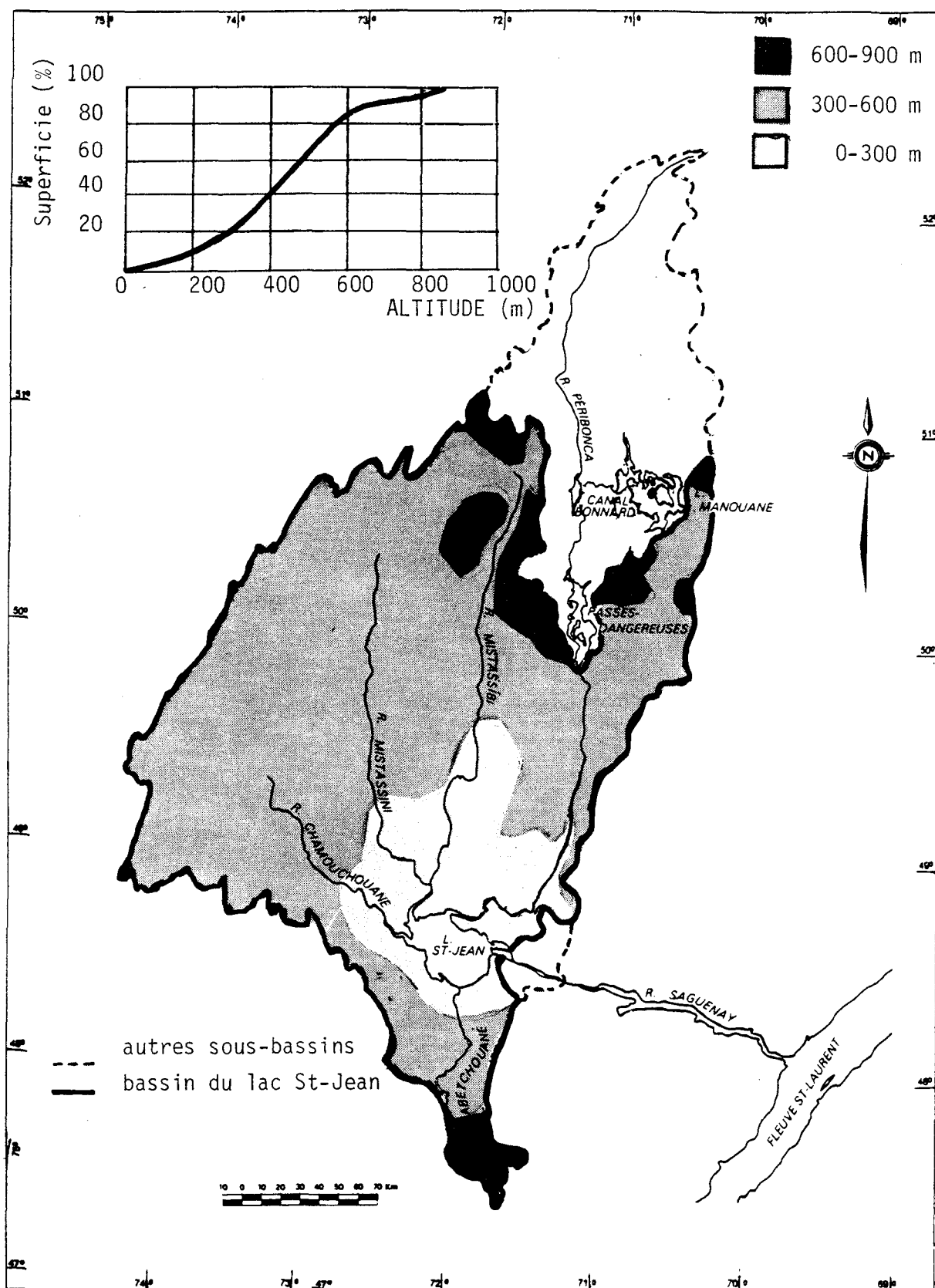


FIGURE 2.3: Délimitation, hypsométrie et courbe hypsométrique du bassin hydrographique du lac St-Jean

fait. Toutefois, il peut arriver que la réponse du bassin varie à cause de la grande superficie du territoire (57 100 km²). La variabilité spatiale et temporelle des précipitations joue un rôle très important dans ce cas.

Enfin, mentionnons que 88,5% de la superficie du bassin du lac Saint-Jean est recouverte de forêt (Pilon et Thompstone, 1979a). On retrouve essentiellement des conifères dans les hautes-terres et la forêt décidue dans les basses-terres (Marie Victorin, 1964).

L'omniprésence de la forêt joue un rôle important dans le comportement hydrométéorologique du bassin. Elle permet une meilleure uniformité de la neige au sol, de l'albedo et du rayonnement solaire. Elle atténue également l'effet du vent au moment de la fonte de la neige au printemps. Cela a d'ailleurs permis de simplifier avantageusement la conceptualisation du processus de fonte de neige (Gray, 1970; Bouchard et Salesse, 1983).

2.2.2 Caractéristiques hydrométéorologiques

Le bassin du lac Saint-Jean est un territoire ayant un régime thermique tempéré typique des forêts boréales à hiver froid et à été court et frais. Du point de vue humidité, si on compare à l'échelle terrestre, les précipitations sont réparties de façon relativement uniforme au cours de l'année et sans saison sèche (Gagnon, 1969). On

retrouve toutefois une zone de micro-climat dans la plaine du lac Saint-Jean caractérisée par un été plus clément (Gariépy, 1978). La circulation générale des systèmes météorologiques est de l'ouest (Verreault, 1982).

Hydrologie

Les nombreuses rivières du bassin du lac Saint-Jean prennent leur source dans le bouclier canadien. Le tableau IV indique les superficies et l'importance relative des principales rivières de ce bassin. La somme journalière des quantités d'eau parvenant de ces rivières constitue l'apport non contrôlé journalier du lac Saint-Jean ou le ruissellement.

La valeur de l'apport non contrôlé est calculée chaque jour en utilisant la formule du bilan hydraulique:

$$ANC = VFIN - VDEB + DECH - AC \quad (2.1)$$

où ANC = apport non contrôlé journalier pour l'ensemble du bassin hydrographique du lac St-Jean

VFIN = volume d'eau dans le lac St-Jean à la fin de la journée

VDEB = volume d'eau dans le lac St-Jean au début de la journée

DECH = volume d'eau déchargée du lac St-Jean (turbinée ou déversée) durant la journée

AC = apport contrôlé reçu, c'est -à-dire le volume d'eau déchargée des réservoirs en amont du lac St-Jean, durant la journée en tenant compte du délai de cheminement de l'eau

TABLEAU IV - Principaux tributaires du bassin du lac Saint-Jean			
Rivière	Superficie du bassin versant (km ²)	Proportion du bassin du lac St-Jean (%)	Longueur du cours d'eau (km)
Péribonca*	10 925	19	180
Mistassini	21 877	38	320
Ashuapmushuan	15 741	28	320
Métabetchouane	2 325	4	140
Autres	6 232	11	-

* La rivière Péribonca est considérée de son embouchure au lac Saint-Jean jusqu'à la limite physique du barrage de Passes-Dangereuses. On ne tient pas compte de la partie de la rivière Péribonca régularisée en amont de Passes-Dangereuses (59% de la superficie du bassin versant et 62% de la longueur du cours d'eau).

Dans la gestion d'un système hydroélectrique, l'apport non contrôlé devient la variable la plus importante puisque c'est le matériel brut qui sert à produire l'électricité. De plus, au lac Saint-Jean, les apports non contrôlés subissent une grande variabilité quantitative et temporelle entraînant beaucoup d'incertitude sur le phénomène et le rendant très difficile à prévoir. Par exemple, selon les données provenant du système d'information hydrométéorologique (SIH) de l'Alcan (Thompson *et al.*, 1980), on note au tableau V que les volumes d'apports non contrôlés saisonniers du printemps et de l'été/automne sont comparables mais que celui du printemps s'écoule en deux fois moins de temps.

TABLEAU V - Variabilité saisonnière des apports non contrôlés du bassin du lac Saint-Jean (1943-83)			
Période	Saison hydrologique	Apports non contrôlés (hm ³)	Proportion du volume annuel
1 avril @ 15 juin (76 jours)	Crue printanière	15 345	44%
16 juin @ 30 nov. (168 jours)	Été/automne	15 450	44%
1 déc. @ 31 mars (121 jours)	Hiver	3 940	12%

D'autre part, la figure 2.4 montre la variation des apports non contrôlés journaliers du bassin du lac Saint-Jean. On remarque la très grande variabilité des extrêmes surtout au printemps et à l'automne. Tel que mentionné précédemment, les apports non contrôlés de pointe du printemps ont excédé souvent la capacité d'évacuation maximale du lac Saint-Jean. La décharge maximale du lac à l'élévation 101,84 mètres (maximum légal permis) est de 5 837 mètres cubes par seconde (Girard et Perron, 1980). Historiquement, on a rencontré 18 années sur 40 où ce débit a été atteint.

Météorologie

Les statistiques des données de température, de précipitation et de neige au sol du bassin du lac Saint-Jean proviennent également du SIH (Système d'information hydrométéorologique) de l'Alcan et sont présentées au tableau VI.

On note que les températures les plus froides sont enregistrées en janvier et les plus chaudes en juillet. Quant aux précipitations, les plus fortes sont observées en juillet et les plus faibles en février. On remarque que 70% de la précipitation annuelle tombe sous forme de pluie et 30% sous forme de neige. Des observations lors des relevés de neige ont permis d'établir que le retrait de la couverture nivale se fait progressivement du sud au nord et d'une façon préférentielle à partir de la plaine du lac Saint-Jean.

SYSTEME D'INFORMATION HYDROMETEOROLOGIQUE

Apports non contrôlés en m^3/s - Lac St-Jean

(moyennes pour 1 jour(s)) (statistiques de 1953-1983)

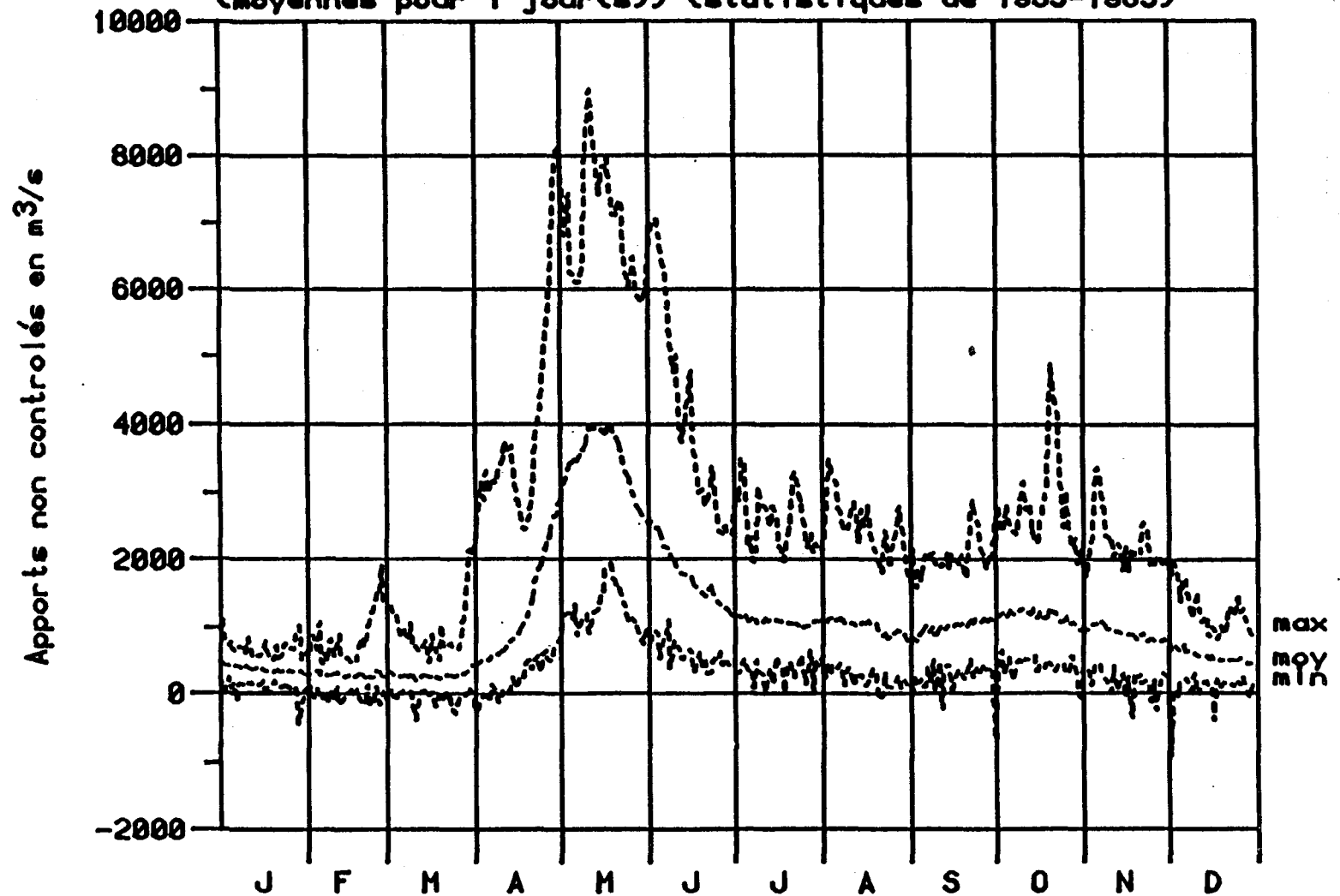


FIGURE 2.4: Variation et moyenne journalière des apports non contrôlés du bassin du lac St-Jean

TABLEAU VI: Données météorologiques mensuelles et annuelles moyennes estimées pour le bassin du lac Saint-Jean													
VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Température moyenne en degrés Celcius	-18,2	-16,2	- 8,7	0,1	7,7	14,0	16,3	14,9	9,9	4,1	- 3,3	-14,1	0,6
Précipitation totale en millimètres	60,9	50,2	53,9	52,6	75,2	91,2	121,6	103,7	105,5	74,4	72,7	69,8	931,7
Pluie en %	5	9	19	65	96	99	100	99	99	87	45	13	70
Neige en %	95	91	81	35	4	1	0	1	1	13	55	87	30
Neige au sol en centimètres d'équivalent d'eau à la fin du mois (1955-1983)	15,8	20,9	24,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(Source: SIH, Alcan, Statistiques 1953-1983)

Enfin, mentionnons que l'évapotranspiration du bassin du lac Saint-Jean est estimée à environ un tiers de la précipitation annuelle.

Données hydrométéorologiques disponibles

Les données hydrométéorologiques disponibles à partir du SIH de l'Alcan qui permettent de calibrer et d'utiliser un modèle hydrologique à des fins de prévision sont les suivantes:

- température minimale et maximale journalière en degré Celcius estimée par bassin versant;
- précipitation liquide et solide journalière en millimètres estimée par bassin versant;
- épaisseur, équivalent d'eau et densité de la neige au sol à la fin de janvier, février et mars estimé par bassin versant;
- apports non contrôlés journaliers en mètres cubes par seconde par bassin versant.

Les données quotidiennes de température et de précipitation proviennent d'un réseau de dix-sept stations tel qu'illustré à la figure 2.5 (Ayotte, 1984). Une technique d'interpolation spatiale est appliquée aux données météorologiques par station pour les transformer en données par bassin. La technique utilisée est une pondération inversement proportionnelle à la distance (Thompstone et Bergeron, 1980). Elle est

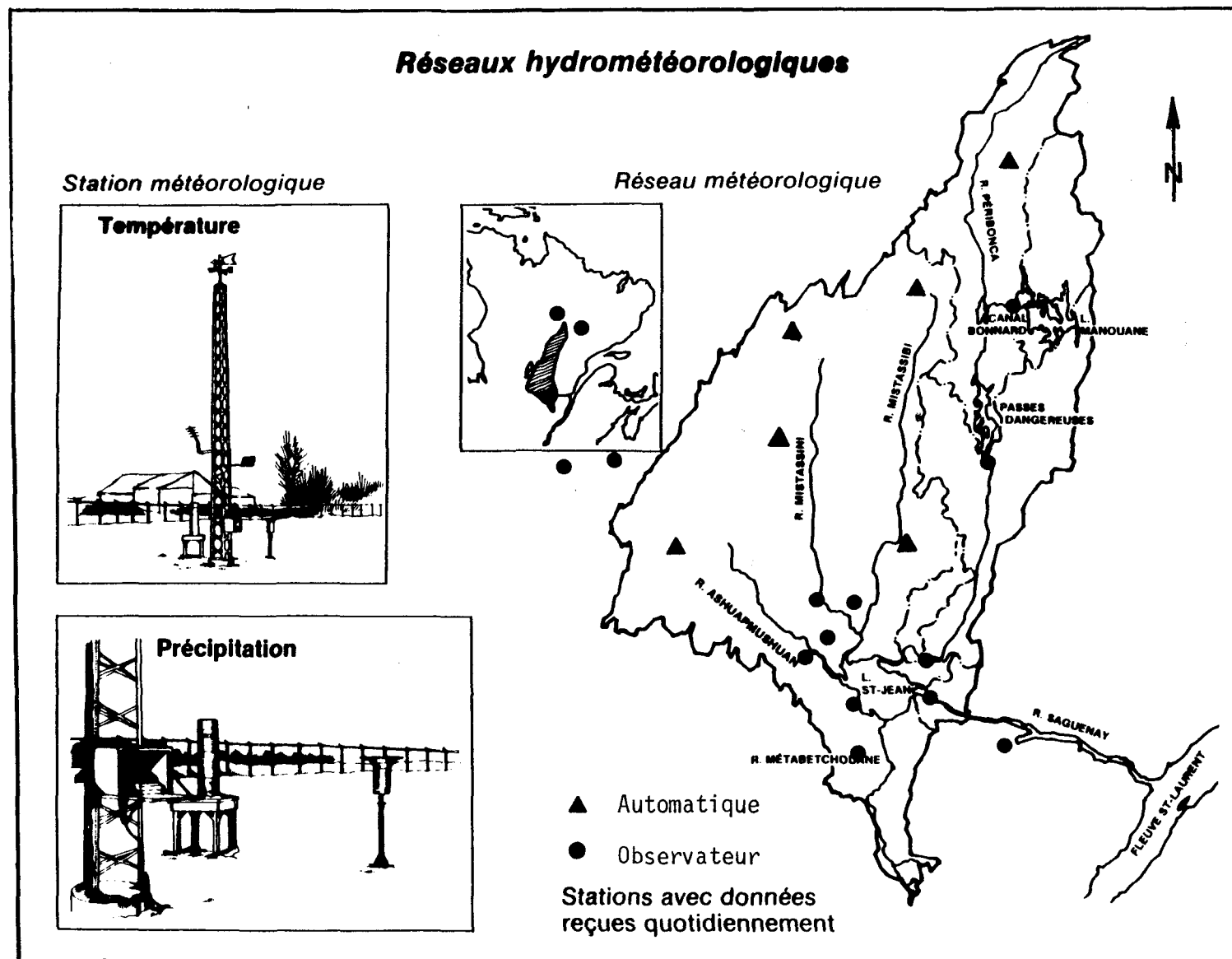


FIGURE 2.5: Réseau des stations météorologiques avec données quotidiennes

rendue possible grâce à un système de quadrillage (carreau de 10 x 10 kilomètres) adapté à l'ensemble du bassin (Pilon et Thompson, 1979b). Les données sont disponibles à partir de 1953.

Les données nivométriques proviennent d'un réseau de vingt stations tel que montré à la figure 2.6. Ces données sont également transformées par bassin à partir d'une technique d'interpolation spatiale. Les données sont disponibles à partir de 1955.

Les données météorologiques utilisées peuvent contenir des erreurs attribuables aux instruments de mesure et à la représentativité de l'estimé de la variable pour l'ensemble du bassin. L'erreur la plus souvent rencontrée due aux instruments de mesure est la déficience de captation de neige causée par le vent (Larson et Peck, 1974). Pour le bassin considéré, ce problème est relativement peu important puisque les mesures de précipitation de neige sont faites à l'aide de capteurs munis d'écran du type Nipher ou Alter.

Par contre, la représentativité des estimés des variables météorologiques est un problème plus important. En effet, tel que montré à la figure 2.5, la partie nord du bassin du lac St-Jean ne comprend pas de stations météorologiques avec observateur. Ceci a pour conséquence que l'estimation des conditions météorologiques moyennes sur l'ensemble du bassin n'est pas représentative. La forte densité de stations autour

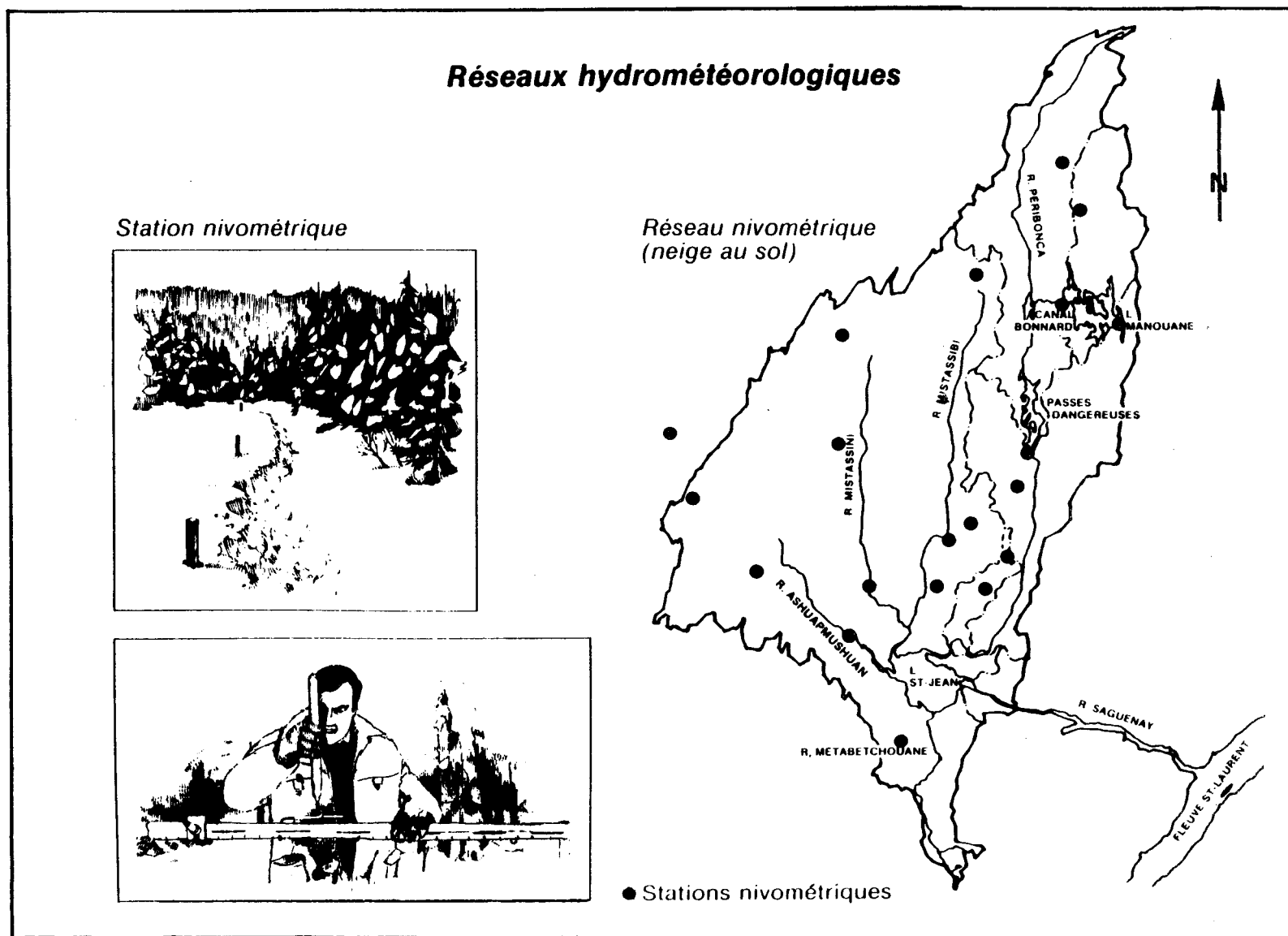


FIGURE 2.6: Réseau des stations nivométriques

du lac St-Jean biaise l'estimé global lors du calcul de la valeur de la variable et ne permet pas de bien représenter la variabilité du phénomène. Cette situation a été remédiée récemment par l'installation de nouvelles stations automatiques au nord du bassin (Ayotte, 1984). Toutefois, le problème demeure présent pour cette étude puisque le choix des années de calibration et de validation du modèle hydrologique doit se faire avec les données météorologiques disponibles avant l'expansion du réseau.

Dans le même ordre d'idées, mentionnons plus particulièrement, que pour un bassin de grande superficie, la variabilité spatio-temporelle des précipitations constitue un problème très important et influence l'estimation des paramètres d'un modèle hydrologique lors de la calibration (Gupta, 1982; Troutman, 1982; Isabel, 1983). Toutefois, les travaux de Ibbitt (1972) ont démontré que certaines erreurs dans les précipitations étaient atténuées par les diverses interactions des composantes du modèle lors de la calibration. Par exemple, les composantes d'eau souterraine et d'évaporation peuvent compenser une sous-évaluation des averses intenses pour l'ensemble du bassin. Ces remarques sont applicables aux erreurs aléatoires mais non aux erreurs systématiques (Gupta, 1982; Isabel, 1983).

Quoiqu'il en soit, peu de travaux ont exploré à fond cet aspect en pratique à cause de la difficulté à différencier les erreurs inhérentes à un modèle hydrologique et celles dues aux données météorologiques

(Garen et Burges, 1981; Gupta, 1982). Bien que cela ne soit pas la solution idéale, Troutman (1982) favorise l'utilisation de paramètres calibrés avec des séries de données ayant des erreurs semblables à celles qui seront employées en simulation ou implicitement en prévision.

CHAPITRE 3

LE MODÈLE HYDROLOGIQUE ORIGINAL MC1

Le système de prévision hydrologique à court terme qui a été développé chez Alcan (Thompstone et al., 1981; Bouchard et Salesse, 1982) était basé sur l'emploi d'un modèle hydrologique déterministe/conceptuel. La description du modèle hydrologique original sera l'objet de ce chapitre.

3.1 DÉFINITION

Un modèle hydrologique conceptuel est un ensemble d'équations mathématiques représentant les phénomènes physiques du cycle hydrologique qui se produisent dans le bassin d'une rivière. Il est défini déterministe si l'estimation des paramètres des équations ne tient pas compte de la distribution de probabilité des données hydrologiques; dans le cas contraire le modèle est appelé stochastique (Chow, 1964).

De plus, le modèle hydrologique est défini de type conceptuel ou analytique si les équations mathématiques qui le composent ont été

établies à partir des considérations du processus physique. Cette méthode laisse beaucoup de choix quant à la structure et aux composantes possibles d'un modèle et c'est pourquoi il en existe un grand nombre. L'une des étapes importantes lors de l'implantation du système de prévision a été le choix d'un modèle hydrologique pour représenter adéquatement le phénomène physique *du cycle hydrologique (Thompstone et al, 1981).

3.2 CHOIX DU MODÈLE

La stratégie adoptée lors de la sélection du modèle hydrologique du système de prévision rejoint sensiblement les idées de Snyder et Stall (1965). Selon eux, un modèle doit tenir compte de la disponibilité des données, la variabilité des contextes, le degré de précision requise et le but de l'application. Il devrait être conçu individuellement pour chaque cas.

Le choix d'un modèle possédant une structure simple et flexible a permis une adaptation plus facile aux particularités du bassin à considérer, des données disponibles et des besoins des utilisateurs.

Le modèle hydrologique initialement choisi pour le système de prévision hydrologique journalière d'Alcan a été originellement développé

par S.I. Solomon et Associés (1974) et modifié par la suite à Environnement Canada par Kite (1978); le modèle modifié a été appelé le modèle WRB (Water Resources Branch). Il a toutefois subi d'autres changements depuis son intégration dans le système de prévision pour mieux s'adapter aux besoins du système Alcan (Bouchard et Salesse, 1983). Ce modèle a été choisi car il répondait aux critères énumérés précédemment. Étant un modèle agrégé (global), il n'a besoin en entrée que de la valeur moyenne des données météorologiques journalières couvrant chacun des bassins hydrographiques plutôt que des spécifications plus détaillées des champs météorologiques comme dans le cas d'un modèle discrétisé (distribué). Conséquemment, il est beaucoup moins consommateur en temps de calcul d'ordinateur. Cela est d'autant plus important lorsqu'on considère qu'il s'agit d'un modèle intégré à un système de prévision hydrologique à court terme exécuté tous les jours. Cela allège également la tâche de la calibration des paramètres. Étant paramétrique, un seul modèle est utilisé pour tous les bassins. Seules les valeurs des paramètres changent selon les particularités du bassin.

Enfin, le modèle hydrologique sélectionné a été comparé avec plusieurs modèles hydrologiques bien connus par Kite (1978). Il a conclu que, pour les mêmes conditions d'expérimentation que celles utilisées avec un bassin du nord de l'Ontario, le modèle WRB donnait des résultats qui étaient quand même très comparables aux performances des modèles plus complexes.

3.3 DESCRIPTION DU MODÈLE ORIGINAL

Tel que mentionné précédemment, le modèle WRB a subi certaines modifications pour son intégration dans le système de prévision de l'Alcan. La version du modèle utilisé dans le système de prévision hydrologique en 1979 s'appelait modèle conceptuel 1 et sera appelé ici MC1.

Le modèle MC1 permettait d'évaluer les apports non contrôlés d'un bassin versant en se servant des données de température minimale et maximale de l'air et des précipitations totales pour chaque jour.

Pour décrire les principes généraux du modèle MC1, la figure 3.1a présente d'abord une conceptualisation du cycle hydrologique. On peut voir qu'il se produit essentiellement quatre étapes soit:

- 1) l'évapotranspiration;
- 2) la condensation;
- 3) la précipitation;
- 4) le ruissellement.

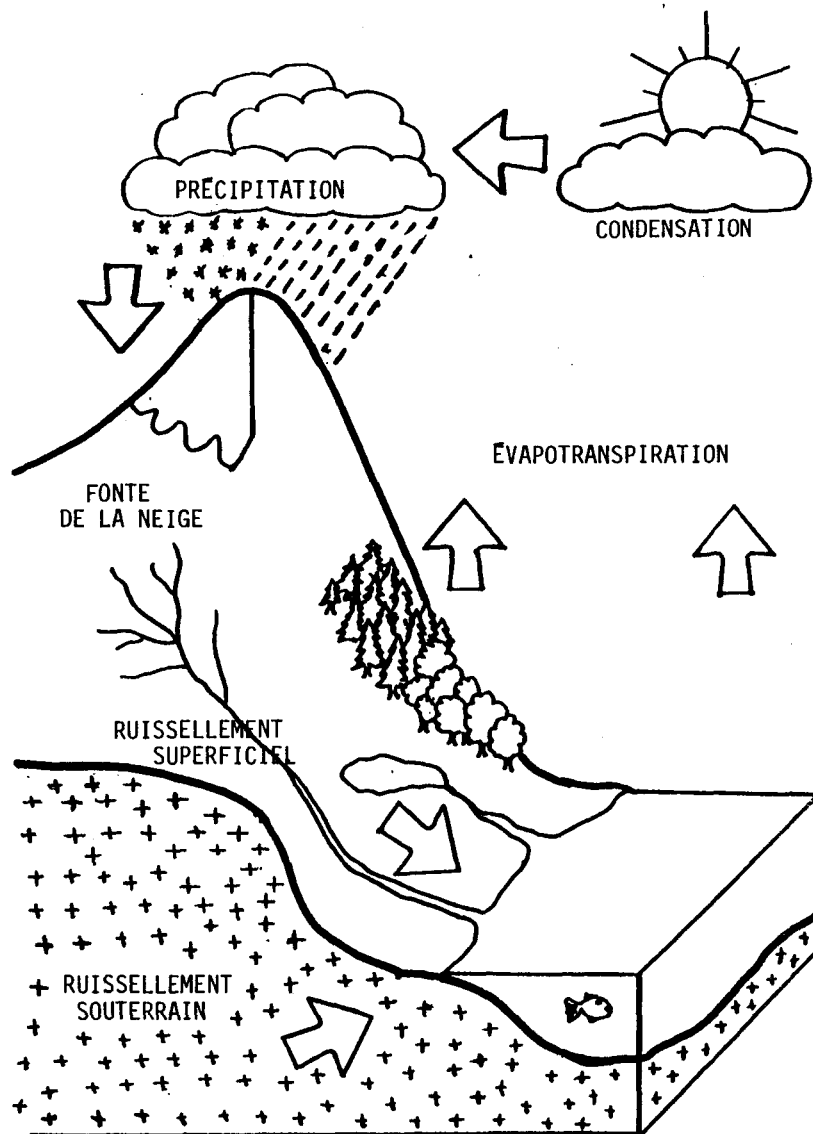


FIGURE 3.1a: Le cycle hydrologique

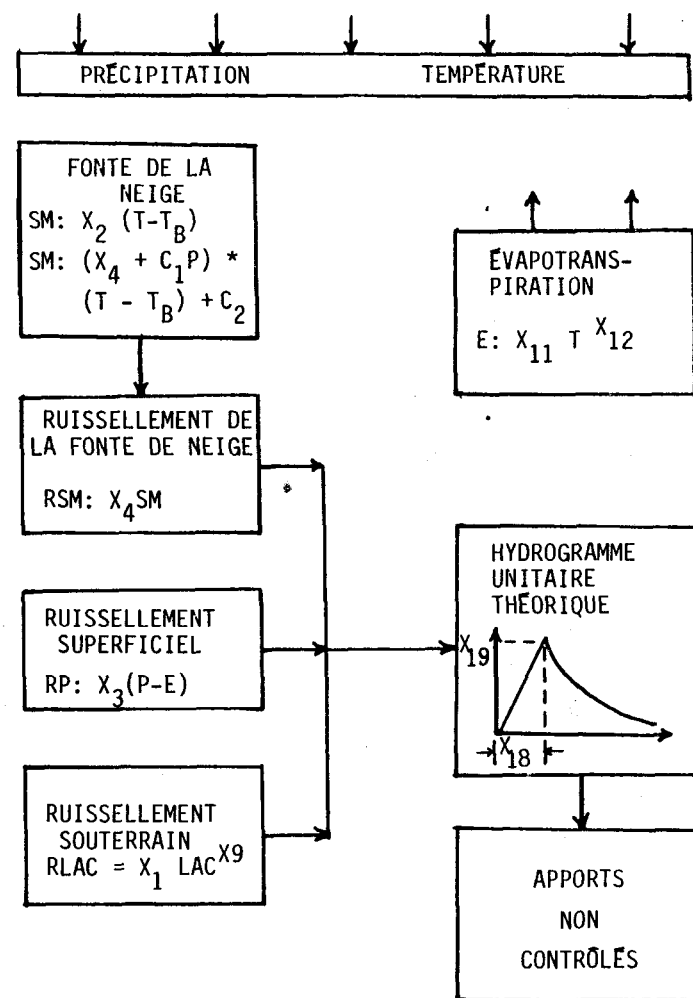


Figure 3.1b: Structure du modèle hydrologique MC1

Les équations paramétriques utilisées pour représenter ces étapes sont indiquées à la figure 3.1b. On considère que les données de précipitation (P) et de température (T) pour l'ensemble du bassin sont disponibles en entrée. On calcule alors trois sources de ruissellement possibles, soit celui dû à la fonte de la neige, celui dû à la précipitation de surface (ruissellement superficiel) et celui dû à l'infiltration souterraine de la précipitation (ruissellement souterrain). Le calcul du ruissellement dû à la fonte de la neige est basé sur une méthode suggérée par Gray (1970). On distingue deux cas soit la fonte de la neige pour périodes avec et sans précipitation. Dans le cas où il n'y a pas de précipitation, la fonte de la neige se calcule uniquement en fonction de la température à partir de l'équation suivante:

$$SM = X_2 (T - T_B) \quad (3.1)$$

où SM = eau de fonte de la neige en mm

X_2 = coefficient à calibrer pour le bassin considéré

T = température moyenne du jour pour le bassin en °C

T_B = température de base ou seuil de congélation en °C, représenté par le paramètre X_6

Dans le cas où il y a précipitation, Gray (1970, p. 9-11) suggère une équation intégrant les diverses composantes calorifiques du

processus de fonte de la neige applicables aux régions à forêts denses et recouvertes de neige, soit:

$$SM = (X_{14} + 0.126P) (T - T_B) + 1.27 \quad (3.2)$$

où SM = eau de fonte de la neige en mm

X_{14} = paramètre ajusté pour le bassin qui tient compte de la chaleur due aux rayons de grande longueur d'onde, à la condensation et à la convection

0.126 = coefficient associé à la chaleur due à la pluie

P = précipitation totale du jour pour le bassin en mm

T = température moyenne du jour pour le bassin en °C

T_B = Seuil de congélation en °C

1.27 = eau de fonte due aux courtes longueurs d'onde et à la chaleur du sol en mm/jour

Une fois la quantité d'eau de fonte évaluée, un coefficient de ruissellement est appliqué tel qu'indiqué dans l'équation suivante:

$$RSM = X_4 SM \quad (3.3)$$

où RSM = ruissellement de l'eau de fonte en mm

X_4 = coefficient de ruissellement calibré selon le bassin

SM = eau de fonte de la neige en mm

Précisons que les équations de fonte de la neige sont effectives seulement lorsque la valeur des degrés-jours cumulés est supérieure à X_{15} , seuil calibré selon le bassin. Toujours concernant les équations de fonte de la neige, si la température minimale du jour est inférieure à 0°C et que la température maximale est supérieure à 0°C , on utilisera ces données plutôt que la température moyenne pour effectuer un calcul plus précis de la quantité de l'eau de fonte.

Le calcul du ruissellement superficiel est beaucoup plus simple. Il s'agit d'évaluer la précipitation nette à laquelle on applique par la suite un coefficient de ruissellement. L'équation prend la forme suivante:

$$RP = X_3 (P - E) \quad (3.4)$$

où RP = ruissellement superficiel résultant de la précipitation nette en mm

X_3 = coefficient de ruissellement à calibrer selon le bassin

P = précipitation totale journalière pour l'ensemble du bassin en mm

E = évapotranspiration journalière calculée

Le calcul de l'évapotranspiration consiste à utiliser l'équation de Thornthwaite (Gray, 1970) modifiée de façon à obtenir une valeur journalière. L'équation est de la forme suivante:

$$E = X_{11} T^{X_{12}} \quad (3.5)$$

où E = évapotranspiration journalière en mm (en hiver, E est constant et est égal à X_{13})

X_{11} = coefficient calibré selon le bassin

T = température moyenne du jour pour le bassin en °C

X_{12} = exposant calibré selon le bassin

Le calcul du ruissellement souterrain s'effectuent également d'une façon très simple. Le sous-sol est considéré comme un réservoir qui recueille l'eau résiduelle et qui l'évacue progressivement. L'eau résiduelle (LAC) provient d'un bilan entre la précipitation (P), l'évapotranspiration (E), le ruissellement superficiel (RP) et le ruissellement de fonte de la neige (SM-RSM) soit:

$$LAC = P - E - RP + SM - RSM \quad (3.6)$$

Le calcul du ruissellement souterrain s'effectue à partir de l'équation suivante:

$$RLAC = X_1 LAC^{X_9} \quad (3.7)$$

où RLAC = ruissellement souterrain en mm

X_1 = coefficient de ruissellement ajusté automatiquement selon la saison et calibré selon le bassin

LAC = eau résiduelle pour chaque jour en mm

X_9 = exposant calibré selon le bassin

Mentionnons que dans le modèle, on fait varier systématiquement la valeur du coefficient de ruissellement X_1 en fonction du temps pour mieux reproduire les variations saisonnières d'écoulement, soit:

- 1) valeur moyenne de X_1 pour la période du 1er octobre au début de la crue (hiver);
- 2) valeur élevée de X_1 (ajout d'une constante, X_{16}) pour la période du début de la crue au 30 juin (crue);
- 3) valeur basse de X_1 (soustraction d'une constante, X_{17}) pour la période du 30 juin au 1er octobre.

De plus, le calcul de l'écoulement souterrain est global et ne différencie pas l'écoulement hypodermique de l'écoulement de base. Une fois que le calcul des trois sources de ruissellement est obtenu, une fonction de transfert temporelle est utilisée pour obtenir les apports non contrôlés journaliers de l'ensemble du bassin. Dans le cas de MC1, on se sert d'un hydrogramme théorique, type linéaire-exponentiel, pour agréger les divers ruissellements et reconstituer les apports non contrôlés dans le temps. L'hydrogramme est décrit au moyen de deux paramètres soit X_{18} , le temps de montée en jours et X_{19} , le débit de pointe en mm. Ces paramètres sont calibrés selon le bassin.

Au total, le modèle MC1 comporte 19 paramètres répartis à l'intérieur de 11 équations. Toutefois, lors de la calibration, il n'y a que 12 paramètres qui sont optimisés. Il y a 5 paramètres qui sont déterminés à partir de la physique du phénomène ou par les caractéristiques

hydrologiques et physiographiques du bassin étudié et deux autres paramètres sont déjà fixés à l'intérieur du modèle (équation 3.2). Le tableau VII fournit une liste des paramètres du modèle MC1. L'ordinogramme du modèle MC1 est fournie en annexe I.

Dans son contexte d'application en 1979, le modèle MC1 pouvait être utilisé selon trois modes distincts: simulation, optimisation et prévision (Thompson et al., 1981; SECAL, 1982).

En mode de simulation, le modèle MC1 nécessitait essentiellement des données journalières de température de l'air et de précipitation et des valeurs préalablement calibrées des paramètres pour le bassin étudié. Le modèle était capable alors de simuler les divers processus physiques du cycle hydrologique et une série de ruissellements journaliers était obtenue à la sortie. En mode d'optimisation, on visait à déterminer les valeurs optimales des paramètres en vue de calibrer le modèle pour un bassin particulier. En plus des données d'entrée décrites précédemment, on devait fournir des estimés initiaux des valeurs des paramètres ainsi que les contraintes. La série de ruissellements simulés était alors comparée à la série de ruissellements observés correspondants en utilisant une fonction critère, telle la somme des erreurs journalières au carré. L'algorithme de recherche directe de Rosenbrock (1960) était utilisé pour modifier systématiquement les valeurs des paramètres afin d'arriver à la solution optimale.

TABLEAU VII: Paramètres du modèle hydrologique MC1

Paramètre	Définition	Unité	Calibration *
X ₁	Coefficient de ruissellement durant l'hiver pour LAC	-	A
X ₂	Coefficient de fonte de la neige	-	A
X ₃	Coefficient de ruissellement de la pluie nette	-	A
X ₄	Coefficient de ruissellement dû à la fonte de la neige	-	A
X ₅	Non utilisé dans MC1		
X ₆	Valeur de la température de base pour le cumul des degrés-jours	°C	M
X ₇	Valeur de l'accumulation liquide, LAC, du bassin versant considéré, au début de la simulation	mm	A
X ₈	Valeur de la température servant de seuil pour déterminer si on est en présence de pluie ou de neige	°C	M
X ₉	Exposant du terme LAC dans l'équation servant à calculer le ruissellement à partir de l'accumulation liquide et du coefficient de ruissellement saisonnier	-	A
X ₁₀	Non utilisé dans MC1		
X ₁₁	Coefficient pour le calcul de l'évapotranspiration	-	A
X ₁₂	Exposant de la variable température moyenne, TM, dans l'équation servant à calculer l'évapotranspiration	-	A
X ₁₃	Valeur de l'évapotranspiration quotidienne en hiver	mm	M
X ₁₄	Valeur basée sur l'apport calorifique provenant de la condensation, de la convection et des rayons de grande longueur d'onde lors de la fonte de la neige avec pluie	-	A
X ₁₅	Valeur de base du nombre de degrés-jours cumulés à être dépassée pour l'emploi des équations de fonte de la neige	°Cjrs	A
X ₁₆	Constante à ajouter à X ₁ pour augmenter la valeur du coefficient de ruissellement au printemps	-	M
X ₁₇	Constante à soustraire à X ₁ pour diminuer la valeur du coefficient de ruissellement durant l'été	-	M
X ₁₈	Valeur du temps écoulé entre le début d'une averse et le débit de pointe dans le sous-programme de l'hydrogramme unitaire, UNTHYD	jours	A
X ₁₉	Valeur du débit de pointe dans le sous-programme de l'hydrogramme unitaire, UNTHYD		A

* (A) automatique
(M) manuelle

En mode prévisionnel, le modèle MC1 était utilisé en mode de simulation en prolongeant pour les sept prochains jours la série de températures et de précipitations journalières observées des jours précédents au moyen des prévisions météorologiques. Ceci constituait le principe à la base du système de prévision hydrologique à court terme tel que décrit plus en détails au chapitre 7.

CHAPITRE 4

AMÉLIORATION DE LA PROCÉDURE DE CALIBRATION

Pour appliquer un modèle hydrologique dans un système de prévision tel que décrit précédemment, il faut procéder à la calibration des paramètres de ce modèle pour le bassin considéré. L'objectivité et le réalisme doivent se refléter dans l'estimation des valeurs des paramètres (Jonhston et Pilgrim, 1976; Kitanidis et Bras, 1980; Isabel, 1983). De plus, la complexité et l'importance de l'étape de calibration sont trop souvent sous-estimées. On soutient dans la littérature concernée, que la performance d'un modèle hydrologique à reproduire correctement le cycle hydrologique est très dépendante de la qualité de l'étape de calibration (Ibbitt et O'Donnell, 1971; Sorooshian et Dracup 1980; Gupta, 1982; Isabel, 1983). On souligne également la complexité des problèmes inhérents à la procédure de calibration au niveau du modèle et de la technique d'optimisation, tels l'influence des données d'entrée, l'inadéquation de la structure et des composantes du modèle, le choix de la fonction critère et le choix de la technique d'optimisation.

Cette exploration des problèmes reliés à la procédure de calibration a démontré que la calibration du modèle original MC1 effectuée en 1979 n'a pas été exploitée à son plein potentiel. Compte tenu de l'in-

fluence de la calibration sur la qualité des résultats du modèle, il a été décidé de reprendre cette étape d'une façon plus systématique et mieux contrôlée. Le présent chapitre est donc consacré au développement d'une meilleure méthode de calibration que celle utilisée initialement en vue d'améliorer, si possible, la qualité des résultats du modèle hydrologique.

4.1 GÉNÉRALITÉS

La calibration d'un modèle hydrologique consiste à rechercher les valeurs des paramètres qui permettent d'optimiser la fonction critère. Sous sa forme mathématique générale, le problème d'optimisation peut être décrit de la façon suivante:

Minimiser ou maximiser la fonction critère, F , donnée par

$$F = f (X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4.1)$$

où X_1, X_2, \dots, X_n sont les n valeurs des paramètres qu'on cherche à optimiser. Les paramètres sont habituellement soumis à des contraintes qui délimitent la région de la recherche de la meilleure solution. D'une façon plus concrète, la calibration d'un modèle hydrologique consiste à effectuer les démarches suivantes:

- 1) simulation pour une période donnée à partir d'une série de valeurs initiales de paramètres;
- 2) évaluation des résultats de la simulation par rapport à la réalité physique;
- 3) modification des paramètres et nouvelle simulation jusqu'au seuil de satisfaction désiré entre l'adéquation de la sortie du modèle et la réalité.

4.2 CALIBRATION DE MC1

On a vu, au chapitre 3, que le modèle hydrologique MC1 pouvait être utilisé en mode d'optimisation lors de son implantation en 1979 dans le système de prévision hydrologique à court terme de l'Alcan (Thompson et al., 1981). La fonction critère alors utilisée était la différence entre les apports non contrôlés observés et simulés élevée au carré, soit:

$$F = \sum_{i=1}^t (ANCOBS_i - ANCSIM_i)^2 \quad (4.2)$$

où F = fonction critère

$ANCOBS_i$ = apports non contrôlés observés pour le
jour i en m^3/s

$ANCSIM_i$ = apports non contrôlés simulés pour le
jour i en m^3/s

t = nombre de périodes en jours

C'est l'algorithme de recherche directe de Rosenbrock (1960) qui était employé pour modifier systématiquement les valeurs des paramètres pour arriver à la solution optimale.

Au moment de la calibration initiale, une seule année de données météorologiques était disponible pour les divers sous-bassins du système hydroélectrique Alcan. Depuis ce temps, le système d'information hydrométéorologique (SIH) de l'Alcan a été développé davantage (Thompson et al., 1980) et plus de 30 années de données hydrométéorologiques journalières (température, précipitation et apports non contrôlés par bassin) sont maintenant disponibles. De plus, la méthode d'interpolation spatiale des données météorologiques utilisée a été améliorée par la suite (Thompson et Bergeron, 1980).

Devant ces faits, une recalibration s'avérait justifiée pour tenir compte de ces nouveaux éléments. Par ailleurs, on a souligné dans l'introduction de ce chapitre l'importance d'effectuer une calibration de qualité. Il apparaissait alors nécessaire d'approfondir, voire même améliorer la méthode de calibration utilisée.

4.3 ÉLABORATION D'UNE MÉTHODE DE CALIBRATION

Si on tient compte des suggestions que l'on retrouve dans la littérature concernée, on devrait être en mesure d'effectuer une calibration efficace d'un modèle hydrologique si on possède les outils suivants:

- 1) bonne connaissance des caractéristiques physiques du bassin;
- 2) série de données hydrométéorologiques adéquates;
- 3) bornes de chaque paramètre et estimé initial;
- 4) critère de comparaison entre les apports non contrôlés observés et simulés (fonction critère ou à optimiser);
- 5) méthode systématique qui permet de varier les valeurs des paramètres et qui contrôle l'amélioration de la valeur de la fonction critère (technique ou algorithme d'optimisation).

Une bonne connaissance des caractéristiques physiques du bassin est un investissement rentable à deux points de vue. En plus de permettre l'estimation immédiate de certains paramètres du modèle, cette information sert à contrôler et interpréter les résultats (Isabel, 1983).

Les données utilisées pour la calibration ont également un rôle déterminant. Il faut s'assurer que celles-ci sont représentatives des

divers phénomènes hydrométéorologiques observés dans le bassin ainsi que des conditions dans lesquelles le modèle hydrologique sera utilisé (Gupta, 1982).

Il faut porter aussi une attention particulière aux bornes et aux estimés initiaux des paramètres. Les bornes sont définies par les limites connues du phénomène physique ou par les limites mathématiques imposées par les équations. Si les résultats du graphique de la variation de la valeur de la fonction critère versus celle du paramètre révèlent la présence de minimums multiples, il conviendra de rétrécir les bornes de façon à éliminer ce problème. Également, il arrive trop souvent que des estimés initiaux différents font converger vers des solutions optimales différentes. Ce phénomène est très fréquent lorsqu'un modèle hydrologique comporte plusieurs paramètres. Au lieu d'obtenir un minimum global on se retrouve dans un minimum local (Ibbitt et O'Donnel, 1971; Jonshton et Pilgrim, 1976; Manley, 1978).

Le choix de la fonction critère est d'une grande importance car elle influence directement les résultats de l'optimisation des paramètres (Ibbitt et O'donnell, 1971; Sorooshian et Dracup, 1980; Isabel, 1983). Il faut donc sélectionner la fonction critère en s'assurant que les besoins du contexte d'utilisation sont respectés.

Finalement, la technique d'optimisation à utiliser dépendra principalement du type de surface générée par la réponse de la fonction critère. Les modèles hydrologiques déterministes à plusieurs paramètres produisent habituellement des surfaces multidimensionnelles irrégulières et complexes. Les algorithmes de programmation non linéaire de recherche directe et analytique sont habituellement utilisés pour résoudre ce genre de problème (Pickup, 1977; Manley, 1978; Sorooshian et Dracup 1980; Gupta, 1982; Isabel, 1983).

Si on tient compte de ce qui précède ainsi que des suggestions des auteurs spécialisés dans le domaine, il est possible d'élaborer une méthode systématique de calibration basée sur les six éléments suivants:

- 1) identification des besoins du contexte d'application;
- 2) représentativité adéquate du régime hydrologique;
- 3) fonction critère adaptée aux besoins;
- 4) technique d'optimisation efficace;
- 5) stratégie d'optimisation adaptée aux besoins;
- 6) étape de vérification.

En premier lieu, il est important de compléter la phase d'identification des besoins. Cela permet de mieux gérer les choix à faire au niveau des diverses étapes de la calibration.

Pour l'application concernée dans ce mémoire, trois besoins principaux ont été identifiés. Le tableau VIII présente une énumération des besoins et les raisons justifiant ces choix.

D'autre part, si on veut représenter adéquatement les diverses conditions du régime hydrologique il faut s'assurer de calibrer avec plusieurs années. D'après les travaux de O'Donnell et Canedo (1980), et Sorooshian et al. (1983), la calibration basée sur trois années de données, représentant des conditions hydrologiques sèches, normales et pluvieuses, s'avère adéquate. La variabilité hydrologique des différentes années, en autant qu'elles soient bien sélectionnées (voir section 4.4), permet de bien cerner la sensibilité et le comportement des divers paramètres d'un modèle hydrologique (Ibbitt et O'Donnell, 1971).

Par ailleurs, dans ses travaux, Isabel (1983) décrit bien les fonctions critères et les techniques d'optimisation les plus utilisées par les hydrologues pour calibrer des modèles hydrologiques déterministes conceptuels. Il indique que la fonction critère de minimisation du carré des résidus et la technique d'optimisation de recherche directe de Rosenbrock (1960) sont de loin les plus utilisées. Il importe toutefois de mentionner que la fonction critère du carré des résidus, quoique très employée, ne constitue pas nécessairement la meilleure. En effet,

TABLEAU VIII: Identification des besoins pour la calibration d'un modèle hydrologique prévisionnel

BESOINS	JUSTIFICATION
1) le modèle hydrologique devra répondre adéquatement aux apports non contrôlés de pointe durant toute l'année.	La juste prévision de l'amplitude des pointes permet de turbiner préalablement l'eau au lieu de la déverser (économie) et permet également de mieux gérer les risques d'inondation (autre possibilité d'économie (Yeh et al., 1978)).
2) le modèle hydrologique devra respecter les changements hydrologiques temporels.	Encore ici, la prévision d'un creux (sécheresse) ou d'une pointe (averse extrême) doit correspondre au bon moment dans le temps. Un événement hydrologique prévu trop tôt ou trop tard peut entraîner des répercussions économiques importantes.
3) le modèle hydrologique devra reproduire correctement le début de la crue printanière.	Pour le système hydroélectrique considéré, le début de la crue printanière constitue le point de départ d'une période particulièrement critique au point de vue gestion. L'expérience passée a montré que les gestionnaires étaient très préoccupés d'obtenir de bonnes prévisions durant cette période.

Sorooshian et Dracup (1980) ont proposé des fonctions critères considérées comme plus objectives, basées sur la théorie statistique du maximum de vraisemblance, qui se sont avérées supérieures du point de vue estimé des paramètres et fiabilité des résultats.

Cependant, Isabel (1983) souligne que puisque les essais ont été effectués à partir de données synthétiques, il n'est pas certain que cette supériorité se manifesterait clairement à l'étape de validation dans le cadre d'une calibration avec des données réelles. Ceci apparaît une avenue intéressante pour d'autres travaux de recherche. Néanmoins, dans ce mémoire, on s'en tiendra plutôt à l'utilisation des outils traditionnels de calibration qui répondent d'ailleurs très bien aux besoins identifiés précédemment. En effet, la valeur des résidus au carré a la particularité de mettre plus d'emphasis sur les grandes erreurs. Or, on retrouve généralement les plus grandes erreurs avec les apports non contrôlés de pointe.

Concernant la stratégie d'optimisation, les méthodes suggérées par Nash et Sutcliffe (1970), Koren et Kuchment (1971), McCuen (1973), l'Organisation météorologique mondiale (1975) et par Manley (1978), constituent des approches intéressantes. Dans le cadre de ce mémoire, la stratégie envisagée rejoint sensiblement leurs recommandations. Essentiellement, il s'agit d'effectuer d'abord une optimisation semi-automa-

tique des paramètres identifiés comme les plus sensibles du modèle. Une analyse des graphiques de la valeur de la fonction critère en fonction de chaque paramètre constitue un outil valable pour identifier les paramètres les plus sensibles. Ainsi, dans un premier temps, on peut faire une optimisation des paramètres sensibles au comportement du modèle durant la période de crue et dans un second temps, on peut effectuer une optimisation des autres paramètres sensibles pour le restant de l'année. Une fois qu'une série de valeurs des paramètres les plus sensibles est obtenue pour chaque année de calibration, il s'agit d'effectuer une pondération de ces valeurs si elles sont différentes. Après cette étape, il s'agit de fixer ces valeurs et d'effectuer ensuite une optimisation automatique des paramètres qui restent.

On considère qu'on a convergence, ou atteint la solution optimale, lorsqu'on obtient un très faible taux de variation de la fonction critère versus le nombre d'itérations. Par exemple, le programme utilisé dans cette étude fait en sorte que l'optimisation s'arrête automatiquement lorsqu'une variation de moins de 10^{-5} est atteinte pour tous les paramètres.

Enfin, lors de l'étape de vérification, il s'agit de se doter de méthodes d'évaluation standards et efficaces. À ce sujet les sugges-

tions faites par Aitken (1973), Weeks et Hebbert (1980) et Hoang et Robert (1981) constituent un bon éventail. On peut alors comparer la sortie du modèle avec la réalité à partir de critères communs. La vérification sera complète uniquement si on prévoit une étape de validation, c'est-à-dire un test des paramètres optimaux du modèle pour des années n'ayant pas servi à calibrer le modèle. Si l'étape de calibration a bien été effectuée, un bon comportement du modèle devrait être obtenu à l'étape de validation (Quick et Pipes, 1976).

Mentionnons qu'une sous-routine d'évaluation comprenant une série de critères a été spécialement élaborée dans le cadre de cette étude. Une description détaillée de chaque critère et un guide d'interprétation sont fournis en annexe 2.

4.4 NOUVELLE CALIBRATION DE MC1

Les principes élaborés à la section précédente nous permettent maintenant d'effectuer une calibration plus systématique en vue d'améliorer si possible la qualité des résultats du modèle hydrologique. Une nouvelle calibration de MC1 a donc été réalisée.

En premier lieu, une analyse des données hydrométéorologiques historiques a été effectuée afin de sélectionner trois années pour servir

à la calibration. Mentionnons que l'année hydrologique de MC1 est définie du 1 octobre au 30 septembre. La recherche s'est restreinte à des années ultérieures à 1960 car c'est seulement à partir de cette période qu'une certaine stabilité a été observée dans le nombre et la localisation des stations météorologiques du bassin hydrographique du lac Saint-Jean. De plus, la fourchette d'années disponibles a été arrêtée en 1980 puisque les années ultérieures à cette période ont été conservées pour l'étape de validation du modèle hydrologique.

Dans un premier temps, une sélection des années extrêmes (sèche et pluvieuse) et celles situées près de la moyenne a été effectuée en considérant les valeurs moyennes annuelle et saisonnière des apports non contrôlés et des précipitations. Dans un deuxième temps, une analyse de la répartition mensuelle a permis d'effectuer le choix final pour chaque régime hydrométéorologique recherché. Les années hydrométéorologiques ayant des caractéristiques uniformes (c'est-à-dire plusieurs mois avec une tendance hydrologique donnée) ont été préférées à celles comportant des événements extrêmes localisées. Ce choix constitue un compromis entre les besoins des gestionnaires, le type de données nécessaires à articuler le modèle et le nombre d'années disponibles. Les années hydrométéorologiques qui ont été sélectionnées pour la nouvelle calibration de MC1 sont fournies au tableau IX.

TABLEAUX IX: Années historiques sélectionnées pour la nouvelle calibration de MC1			
Régime hydrométéorologique	Année (1/10 au 30/09)	Précipitation (% de la moyenne)	Apports non contrôlés (% de la moyenne)
Sec	1962-63	97%	76%
Normal	1968-69	102%	95%
Pluvieux	1973-74	114%	121%

Par ailleurs, à titre d'information complémentaire mentionnons que les régimes hydrométéorologiques annuels des trois années de validation se situent autour de la moyenne. Toutefois, la répartition saisonnière est beaucoup plus variable. Par exemple, on a enregistré en période de crue printanière (1 avril au 15 juin) des apports non contrôlés de 74%, 101% et 117% de la moyenne à long terme respectivement pour les années 1980, 1982 et 1981. En été/automne (16 juin au 30 novembre) on a obtenu respectivement 79%, 100% et 122% de la moyenne à long terme des apports non contrôlés pour les années 1981, 1982 et 1980. D'après ces conditions, on peut considérer que ces années comportent une variabilité hydrologique satisfaisante pour l'étape de validation.

D'autre part, les valeurs initiales des paramètres de la nouvelle calibration ont été les valeurs optimales obtenues lors de la calibration originale (1979) avec une année. Les bornes des paramètres avaient également été établies lors de cette calibration et elles ont été reprises intégralement. Dans la nouvelle calibration, afin d'être conforme aux normes établies précédemment, une analyse graphique supplémentaire a consisté à vérifier si la variation systématique d'une borne à l'autre de chaque paramètre en fonction de la valeur de la fonction critère représentait une courbe à un seul minimum. Ceci avait pour objectif d'éliminer les présences évidentes de minimums multiples. A cet effet, les bornes des paramètres X_7 , X_{15} et X_{18} ont dû être modifiées pour enrayer ce problème. La région de recherche permise a simplement été rétrécie.

Tel que décrit dans la stratégie d'optimisation élaborée à la section précédente, une optimisation des paramètres les plus sensibles a d'abord été effectuée pour les trois années de calibration. Pour déterminer si un paramètre est sensible, un graphique de la variation du paramètre en fonction de la valeur de la fonction critère peut être utilisé. C'est lorsqu'une faible variation du paramètre cause une grande variation de la valeur de la fonction critère qu'un paramètre est dit sensible. Pour le modèle MC1, l'analyse de sensibilité a démontré que sur une base

relative de l'ensemble des paramètres, X_1 , X_2 et X_{14} étaient les plus sensibles. Pour sa part, le paramètre X_7 , représente les conditions initiales de l'écoulement souterrain et doit être déterminé pour chacune des années.

Une première optimisation a été réalisée pour ces paramètres avec chacune des années. Tel que montré au tableau X, les valeurs finales obtenues étaient différentes. Une pondération, soit la moyenne arithmétique des trois années, a été appliquée et les valeurs ainsi ajustées ont été fixées afin de poursuivre l'optimisation des autres paramètres. Cette fois, pour tenir compte de l'interdépendance des valeurs finales optimales de l'ensemble des paramètres, seule l'année moyenne a été utilisée. Toutefois, la qualité des apports non contrôlés simulés versus ceux observés a été vérifiée de façon graphique avec les autres années (sèche et pluvieuse). Les résultats se sont avérés satisfaisants dans l'ensemble (voir chapitre 6).

Avec cette série de valeurs de paramètres, l'étape de vérification finale a pu être effectuée. On présente donc au tableau XI, les résultats numériques des années ayant servi à la calibration ainsi que ceux résultant des années de validation. Les résultats de l'ancien et du nouveau vecteur de paramètres du modèle MC1 y sont comparés. À noter que les critères de comparaison utilisés sont expliqués plus en détail au chapitre 6 et en annexe 2.

TABLEAU X : VALEURS DES PARAMÈTRES LORS DE LA CALIBRATION DE MC1									
Para- mètres	BORNE		1ÈRE ETAPE				2ÈME ETAPE		Équations
	infé- rieur- e	supé- rieur- e	Valeurs initiales	Valeurs finales			Valeurs initiales	Valeurs finales	
				1962-63	1968-69	1973-74		1968-69	
X ₁	0.0	0.005	* 0.00157	0.00156	0.00177	0.00255	0.00196	0.00196	RLAC = X ₁ *LAC**X ₉
X ₂	0.0	1.0	* 0.589	0.522	0.244	0.268	0.338	0.338	SM = X ₂ *(T-X ₆)
X ₃	0.0	1.0	0.273				* 0.273	0.279	RP = X ₃ *(P-E)
X ₄	0.0	1.0	0.669				* 0.669	0.505	RSM = X ₄ *SM
X ₅									
X ₆	-3.0	3.0	-0.56				-0.56	-0.56	TSNM =X ₆
X ₇	250.0	300.0	* 278.1	276.8	290.0	292.0	* 290.0	290.2	LACI = X ₇
X ₈	-3.0	3.0	-0.56				-0.56	-0.56	T (neige) = X ₈
X ₉	0.0	5.0	4.0				4.0	4.0	Voir X ₁
X ₁₀									
X ₁₁	0.0	1.0	0.75				* 0.75	0.75	E = X ₁₁ *TM**X ₁₂
X ₁₂	0.0	2.0	0.63				* 0.63	0.63	Voir X ₁₁
X ₁₃	0.0	1.0	0.2032				0.2032	0.2032	E (hiver) = X ₁₃
X ₁₄	0.0	1.0	* 0.0471	0.0383	0.0625	0.0459	0.0489	0.0489	SM = X ₁₄ (T-TSNM) + 0.0126P(T-TSNM) + 1.27
X ₁₅	40.0	50.0	43.4				43.4	43.4	Seuil degrés-jours
X ₁₆	0.0	0.010	0.003				0.003	0.003	X ₁ = X ₁ + X ₁₆
X ₁₇	0.0	0.010	0.004				0.004	0.004	X ₁ = X ₁ - X ₁₇
X ₁₈	0.0	5.0	3.0				* 3.0	1.0	DÉLTAT DE UNTHYD
X ₁₉	0.0	1.0	0.135				* 0.135	0.146	QMAX de UNTHYD

* Signifie que le paramètre est optimisé durant cette étape.

TABLEAU XI: Résultats des calibrations avec MC1							
A. Emploi du vecteur des paramètres de la calibration originale							
	CCR	F	CNA	CV	CVCRU	CPCRU	CF
CALIBRATION:							
1962-63	0.88	139	0.78	0.03	-0.00	0.24	0.74
1968-69	0.85	229	0.73	0.01	-0.05	0.24	0.77
1973-74	0.97	160	0.94	0.00	-0.01	0.16	0.39
VALIDATION:							
1979-80	0.66	348	0.43	-0.01	-0.09	0.88	2.30
1980-81	0.69	593	0.48	-0.03	-0.08	0.44	1.38
1981-82	0.84	394	0.70	-0.01	-0.04	0.25	0.78
B. Emploi du vecteur des paramètres de la nouvelle calibration							
	CCR	F	CNA	CV	CVCRU	CPCRU	CF
CALIBRATION:							
1962-63	0.92	94	0.85	0.01	-0.01	0.12	0.41
1968-69	0.91	145	0.83	-0.01	-0.03	0.20	0.56
1973-74	0.98	118	0.95	-0.00	-0.01	0.15	0.35
VALIDATION:							
1979-80	0.77	249	0.59	-0.02	-0.06	0.70	1.80
1980-81	0.81	395	0.65	-0.02	-0.06	0.35	1.03
1981-82	0.75	572	0.57	-0.01	-0.01	0.30	1.03

Il est intéressant de constater l'amélioration des résultats attribuable uniquement à la méthode utilisée pour la nouvelle calibration. Des coefficients de corrélation (CCR) entre les apports non contrôlés observés et simulés supérieurs à 0.90 ont été obtenus pour les trois années de calibration sélectionnées. Pour les années de validation, on a obtenu des meilleurs résultats pour 1979-80 et 1980-81 mais non pour 1981-82. Les valeurs du coefficient de Nash (CNA) et du critère final (CF) ont été généralement près des seuils acceptables tel que défini en annexe 2 dans le cas des résultats obtenus avec la nouvelle calibration.

Toutefois, les résultats obtenus en validation sont très inférieurs à ceux de la calibration. Cette tendance a également été observée pour les valeurs du coefficient de pointe en période de crue, CPCRU.

Enfin, on remarque que même si la nouvelle calibration a permis de diminuer légèrement la valeur moyenne de la fonction critère F, l'année de validation 1981-82 a perdu de la précision.

L'incohérence observée entre les résultats de la calibration et de la validation et l'obtention de séries de valeurs optimales des paramètres différents d'une année à l'autre sont des signes indiquant qu'il y a possiblement des problèmes dans la structure du modèle (Pickup, 1977; Manley, 1978; Gupta, 1982).

CHAPITRE 5

AMÉLIORATION DU MODÈLE HYDROLOGIQUE

Selon les résultats obtenus au chapitre 4, une meilleure procédure de calibration a permis d'améliorer sensiblement l'adéquation des sorties du modèle hydrologique avec les apports non contrôlés réels. Toutefois, tel que souligné à la fin du chapitre 4, des problèmes ont été rencontrés avec la cohérence des résultats entre l'étape de calibration et de validation et les valeurs optimales finales des paramètres.

Si on fait l'hypothèse que l'on possède une méthode adéquate de calibration, les problèmes de comportement rencontrés nous amènent à conclure à l'inadéquation de certaines parties du modèle à représenter correctement le processus physique du cycle hydrologique et à fournir une réponse de la fonction critère qui favorise la convergence vers une solution optimale unique. La solution consiste alors à modifier la structure du modèle jusqu'à l'élimination complète si possible de ces problèmes. Quelques auteurs ont cheminé de cette façon pour d'autres types de modèles (Nash et Sutcliffe, 1970; Pickup, 1977; Manley, 1978; Gupta, 1982). Dans le cas de Nash et Sutcliffe (1970), ils ont même proposé une méthode systématique pour modifier progressivement un modèle et contrôler les résultats. Elle s'énonce sensiblement comme suit:

- 1) prendre un modèle simple;
- 2) calibrer les paramètres et étudier leur stabilité;
- 3) mesurer l'efficacité du modèle;
- 4) modifier le modèle - si possible en corrigeant ou ajoutant une partie - répéter les étapes (2) et (3) et décider si la modification est acceptée ou rejetée;
- 5) choisir la prochaine modification et répéter. Contrôler au moyen du graphique des ruissellements simulés et observés.

Cette philosophie consiste pratiquement à adapter le modèle au bassin et non le bassin au modèle. Ceci rejoint les idées de Koren et Kuchment (1971) qui croient qu'il est plus raisonnable de parler non pas de la construction d'un modèle hydrologique en général mais plutôt d'un modèle hydrologique adapté à un bassin particulier. Ils basent leur argumentation principalement sur la diversité des ruissellements et des données disponibles d'un bassin à l'autre. Ces idées sont renforcées si on considère en plus les besoins différents de prévisions hydrologiques d'un gestionnaire de bassin à un autre.

Il a donc été décidé dans le cadre de ce mémoire d'appliquer la méthode de Nash et Sutcliffe (1970) pour poursuivre l'amélioration des

performances du modèle hydrologique. Les sections qui suivent présentent les modifications apportées au modèle MC1. Elles touchent principalement quatre aspects:

- 1) le sous-modèle d'écoulement souterrain;
- 2) le sous-modèle de fonte de la neige;
- 3) la fonction de transfert des ruissellements;
- 4) la définition de l'année hydrologique.

D'une façon générale, la méthodologie a consisté d'abord à approfondir la compréhension du processus physique de l'élément considéré et ensuite d'examiner les équations et la structure du modèle par rapport à cet élément pour en effectuer les modifications nécessaires. Ces éléments ont été choisis pour les raisons suivantes:

- 1) ils ont une grande influence sur la sortie du modèle;
- 2) les valeurs des paramètres de certaines équations ont causé des problèmes de comportement à l'étape de calibration;
- 3) leurs structures ne permettaient pas de représenter adéquatement le processus physique réel.

Les résultats de la calibration du modèle amélioré sont présentés à la fin du chapitre.

5.1 SOUS-MODÈLE D'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN

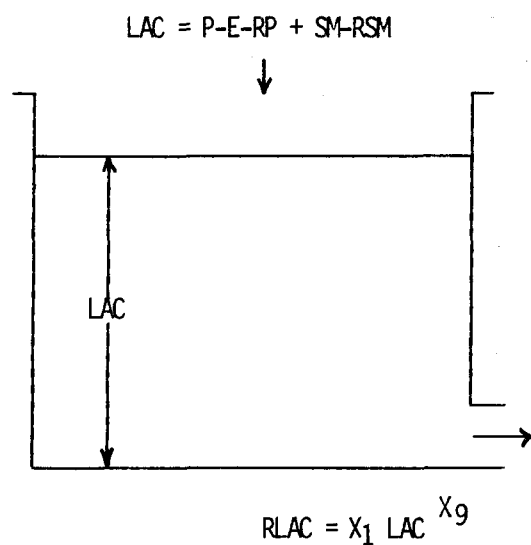
Décrivons d'abord brièvement en quoi consiste le mécanisme du ruissellement tel qu'on le décrit dans la littérature. Les eaux de précipitation et de fonte de la neige s'écoulent essentiellement sous trois formes:

- 1) ruissellement de surface (écoulement superficiel);
- 2) ruissellement hypodermique (écoulement souterrain);
- 3) ruissellement de base (écoulement souterrain).

Lors d'une averse, il y a saturation progressive du sol. Si le taux de précipitation dépasse la capacité d'infiltration du sol il y a ruissellement de surface. Une partie des précipitations infiltrées circule latéralement dans les couches supérieures du sol. Le ruissellement hypodermique est plus ou moins important selon la structure et la nature du sol. Quand la zone supérieure est saturée, il y a alors percolation de l'eau jusqu'aux couches plus profondes et alimentation de la nappe phréatique. L'importance de cet apport est fonction de la structure et de la géologie du sous-sol ainsi que de l'importance du régime de pluie. En général l'écoulement souterrain aura un temps de parcours d'une durée beaucoup plus longue que le ruissellement de surface (Gray, 1970; Llamas, 1978).

On a vu au chapitre 3 que le sous-modèle d'écoulement souterrain de MC1 était simple. Il s'agissait essentiellement d'un réservoir à une sortie tel que schématisé à la figure 5.1a. Un tel sous-modèle ne permet pas de représenter adéquatement le concept du processus d'écoulement souterrain décrit précédemment. Toutefois, la simplicité du modèle se prête bien à la méthode de modifications progressives suggérée au début du chapitre.

Une modification a donc été apportée en s'inspirant d'un sous-modèle d'écoulement souterrain provenant des travaux de Gupta (1982). Le schéma du sous-modèle proposé peut être visualisé à la figure 5.1b. Celui-ci est plus complexe que MC1 mais plus simple qu'un modèle tel SSARR (U.S. Army Corps of Engineers, 1975). De plus il a l'avantage de se rapprocher beaucoup plus du processus physique. En effet, le premier réservoir représente l'écoulement intermédiaire et le second réservoir l'écoulement de base. Ainsi, en été, lors d'une averse importante, l'écoulement intermédiaire et de base contribuent à former les ruissellements. Par contre, en hiver, l'écoulement intermédiaire du nouveau sous-modèle devient pratiquement nul et seul l'écoulement de base contribue au ruissellement ce qui correspond au phénomène physique. Ainsi, mathématiquement, le calcul du ruissellement souterrain s'effectue de la façon suivante. On calcule d'abord la valeur de l'entrée d'eau XIN qui résulte d'un bilan des eaux non souterraines:



où

LAC = eau résiduelle en mm

P = précipitation en mm

E = évapotranspiration calculée en mm

RP = ruissellement dû à la précipitation en mm

SM = eau dû à la fonte de la neige en mm

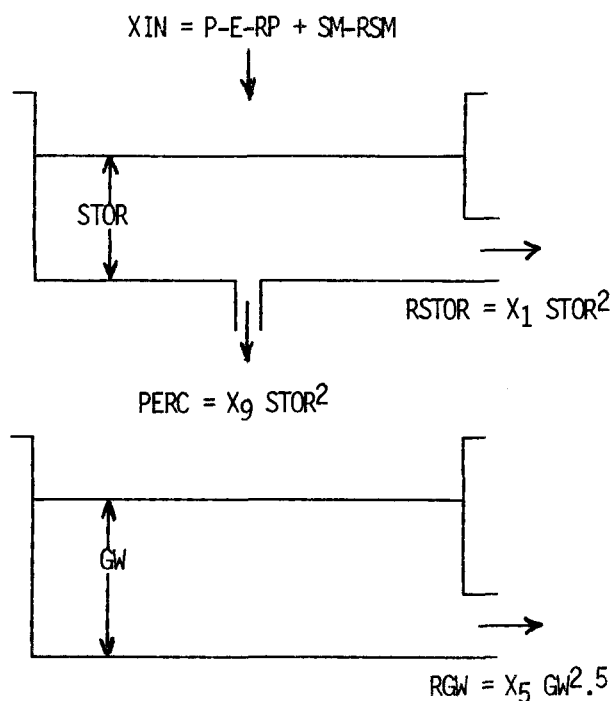
RSM = ruissellement de l'eau de fonte de neige en mm

RLAC = ruissellement souterrain en mm

X_1 = coefficient de ruissellement saisonnier calibré selon le bassin

X_9 = exposant calibré selon le bassin

FIGURE 5.1a Schéma du sous-modèle d'écoulement souterrain de MC1



où

XIN = entrée d'eau au sous-sol en mm

STOR = eau cumulée de l'écoulement intermédiaire en mm

RSTOR = ruissellement de l'écoulement intermédiaire en mm

X_1 = coefficient du ruissellement intermédiaire calibré selon le bassin

PERC = eau de percolation alimentant la nappe en mm

X_9 = coefficient du ruissellement dû à la percolation calibré selon le bassin

GW = eau souterraine cumulée en mm

RGW = ruissellement de base en mm

X_5 = coefficient du ruissellement de base calibré selon le bassin

FIGURE 5.1b Schéma du sous-modèle d'écoulement souterrain proposé

$$XIN = P - E - RP + SM - RSM \quad (5.1)$$

où XIN = entrée d'eau au sous-sol en mm

P = précipitation en mm

E = évaporation calculée en mm

RP = ruissellement dû à la précipitation nette en mm

SM = eau de fonte de la neige en mm

RSM = ruissellement de l'eau de fonte de neige en mm

Le premier réservoir représente l'écoulement intermédiaire. Le ruissellement intermédiaire contribuant directement au ruissellement du bassin est $RSTOR$. Celui alimentant la nappe phréatique est la percolation, $PERC$. Les équations ont la forme suivante:

$$RSTOR = X_1 STOR^2 \quad (5.2)$$

où $RSTOR$ = ruissellement de l'écoulement intermédiaire en mm

X_1 = coefficient de ruissellement intermédiaire calibré selon le bassin

$STOR$ = eau cumulée de l'écoulement intermédiaire en mm

$$PERC = X_9 STOR^2 \quad (5.3)$$

où $PERC$ = eau de percolation alimentant la nappe phréatique en mm

X_9 = coefficient du ruissellement de percolation calibré selon le bassin

Le deuxième réservoir représente le ruissellement de base. Encore-là, il s'agit d'un réservoir avec une sortie. Il s'agit en fait du sous-modèle utilisé dans MC1. Le changement a consisté à rajouter à celui-ci un réservoir supplémentaire pour tenir compte de l'écoulement intermédiaire. Le ruissellement de base est exprimé par RGW et l'équation suivante:

$$RGW = X_5 GW^{2.5} \quad (5.4)$$

où RGW = ruissellement de base en mm

X_5 = coefficient de ruissellement de base calibré selon le bassin

GW = eau souterraine cumulée de la nappe phréatique en mm

Pour représenter le processus physique d'écoulement d'un réservoir à surface libre, la valeur de STOR a été élevée arbitrairement au carré dans le cas de RSTOR et PERC et un exposant de 2.5 a été mis à GW dans le cas de RGW afin d'obtenir des équations du type non linéaire croissante. Lors de la calibration, ce sont les paramètres X_1 , X_5 et X_9 qui assurent une certaine flexibilité de ces équations dans la recherche du comportement optimal du sous-modèle d'écoulement souterrain. Il n'est pas jugé utile de mettre les valeurs des exposants comme paramètre à calibrer car elles sont associées à un comportement physique connu soit l'écoulement d'un réservoir à surface libre avec débit non linéaire croissant en fonction de la hauteur.

L'analyse des sorties détaillées des simulations du modèle a démontré un comportement qui s'apparente beaucoup plus avec le processus physique. Ainsi, en hiver, le réservoir d'écoulement intermédiaire ne contribue pratiquement plus au ruissellement du bassin. C'est plutôt le réservoir d'écoulement de base qui joue ce rôle. En été, le réservoir d'écoulement intermédiaire monte et descend au gré de la pluie et des sécheresses. Cette flexibilité se fait sentir au niveau de la souplesse du modèle à répondre à des événements hydrologiques particulièrement variables tels les fortes précipitations d'été et d'automne.

De plus, il est permis de croire que les améliorations apportées ont permis d'atteindre un compromis raisonnable entre l'adéquation des sorties du modèle avec la réalité du processus physique et les problèmes de calibration engendrés par une trop grande complexité de la structure du modèle. Cet aspect de la calibration des modèles hydrologiques a été étudié en détail par Gupta (1982). Il en est venu à la conclusion qu'un modèle trop complexe favorisait souvent, à cause de la lourdeur de sa structure, la création de problèmes d'instabilité lors de la calibration automatique des paramètres. Par exemple, on peut obtenir des solutions optimales différentes pour des années hydrologiques différentes ou seulement des conditions initiales différentes. Également, la présence de minimums locaux lors de l'optimisation ou simplement l'inca-

pacité de l'équation à représenter adéquatement la variabilité spatio-temporelle du processus contribuent à créer des problèmes d'instabilité des paramètres (Gupta, 1982).

Il a démontré qu'un réaménagement structural plus simple, en l'occurrence une simplification de l'équation de percolation du modèle NWSRFS (National Weather Service River Forecast System) (U.S. Department of Commerce, 1972), produisait des courbes plus concentriques comme réponse de la fonction objective. Cette simplification rend l'optimisation plus efficace en facilitant la convergence vers la vraie valeur optimale et une amélioration des résultats du modèle est constatée.

5.2 SOUS-MODÈLE DE FONTE DE LA NEIGE

Le mécanisme de fonte de neige est un processus thermodynamique très complexe faisant intervenir l'énergie du vent, du soleil, de l'air, de la précipitation et du sol. La modélisation du phénomène de fonte est très difficile. Gray (1970) souligne que la plupart des modèles de fonte que l'on retrouve dans la littérature sont basés essentiellement sur la méthode du bilan d'énergie. Il mentionne que cette méthode fournit de bons estimés des quantités d'eau de fonte de la neige. Toutefois, l'éventail des données requises pour son application la rend souvent inutilisable. Pour pallier à cette situation, plusieurs travaux de recherche

ont été effectués notamment pour déterminer les quantités d'eau de fonte à partir uniquement des données de précipitation et de température. Selon Haan et al. (1982), des méthodes simples ont été développées et ont permis d'obtenir de bons résultats. Les travaux réalisés par U.S. Army Corps of Engineers (1956, 1960) sont sûrement parmi les plus utilisés. C'est d'ailleurs une simplification de ces travaux, développée par Gray (1970), qui a été utilisée dans le modèle MC1 tel que décrit au chapitre 3. Selon Gray (1970), cette méthode, basée sur les indices de température, fournit habituellement de bons résultats pour les grands bassins forestiers ayant des caractéristiques hydrologiques homogènes .

Toutefois, l'analyse des résultats obtenus avec MC1 a démontré qu'on observait certains problèmes lors du départ de la crue et dans l'adéquation de l'amplitude et de la synchronisation des apports non contrôlés de pointe simulés et observés (voir chapitre 6). Une partie importante des travaux de ce mémoire a donc consisté à modifier le sous-modèle de fonte existant afin d'en améliorer la qualité compte tenu de sa grande influence sur les résultats.

La méthode de modifications progressives suggérée au début du chapitre a donc été appliquée. Les travaux ont porté d'abord sur l'équation du calcul de l'eau de fonte sans précipitation et ensuite sur celle avec précipitation.

5.2.1 Équation de fonte de la neige sans précipitation

Rappelons que l'équation utilisée dans MC1 pour calculer l'eau de fonte de la neige pour les journées sans précipitation était la suivante:

$$\begin{aligned} SM &= X_2 (T - T_B) \text{ si } T > T_B \\ &= 0 \quad \text{si } T \leq T_B \end{aligned} \quad (5.5)$$

où SM = eau de fonte de la neige en mm
 X_2 = coefficient ajusté selon le bassin
 T = température moyenne journalière pour le bassin en °C
 T_B = paramètre X_6 de MC1 ou seuil de congélation en °C

Pour tenter de résoudre les problèmes existants avec MC1 en période de crue, une variante de calcul suggérée par U.S. Army Corps of Engineers (1956) a été utilisée. Il s'agit de remplacer le terme $(T-T_B)$ par l'équation suivante:

$$\left(\frac{2 \text{ TMX} + \text{TMN}}{3} - T_B \right)^{1.4} = \text{ECH}^{1.4} \quad (5.6)$$

où TMX = température maximale journalière du bassin en °C
 TMN = température minimale journalière du bassin en °C
 $\text{ECH} = \frac{(2 \text{ TMX} + \text{TMN})}{3} - T_B$ définie comme l'énergie de
 3
 chaleur en °C

L'avantage de la nouvelle méthode de calcul réside dans le fait qu'en utilisant un poids différent pour TMX et TMN, les échanges réels d'énergie de part et d'autre du point de congélation sont mieux reproduits; ceci est un facteur très important au début de la crue. Également, en mettant un poids plus important à TMX et un exposant à l'ensemble de l'expression, cela permet un meilleur rapprochement avec le processus physique réel des chaudes journées ensoleillées du printemps. En effet, lorsque la température maximale est de l'ordre de 20°C, une quantité énorme d'énergie est disponible pour faire fondre la neige et les équations qui considèrent uniquement la température moyenne ne sont pas assez flexible dans ce cas.

Par exemple, une série de températures observées sur le bassin du lac Saint-Jean en mai 1983 a été utilisée pour expliquer ce phénomène. La figure 5.2 montre la variation de "l'énergie" de chaleur calculée selon le type d'équation utilisée. Avec $(T - T_B)$ et $(ECH)^{1.4}$, des quantités "d'énergie" de chaleur du même ordre de grandeur sont observées pour les températures près de 0°C. Toutefois, lorsque des températures maximales élevées sont enregistrées, la méthode suggérée est beaucoup plus sensible en passant d'un facteur 3 fois plus grand pour le début de la période à un facteur 5 à la fin de la période. Ceci s'apparente beaucoup plus aux taux de fonte observés en analysant les ruissellements réels. Les résultats ont été particulièrement intéressants pour des années où les précipitations étaient faibles en période de crue. C'est alors la température qui jouait un rôle prépondérant pour la fonte de neige.

DATE	TMX	TMN	T	ECH*	ECH 1.4	T-T _B *
10/05/83	9.0	0.0	4.5	7.0	15.2	5.5
11/05/83	12.0	0.0	6.0	9.0	21.7	7.0
12/05/83	17.0	2.0	9.5	13.0	36.3	10.5
13/05/83	23.0	1.0	12.0	16.7	51.5	13.0
14/05/83	22.0	2.0	12.0	16.3	49.8	13.0

* la valeur de T_B est -1°C (valeur obtenue en calibration)

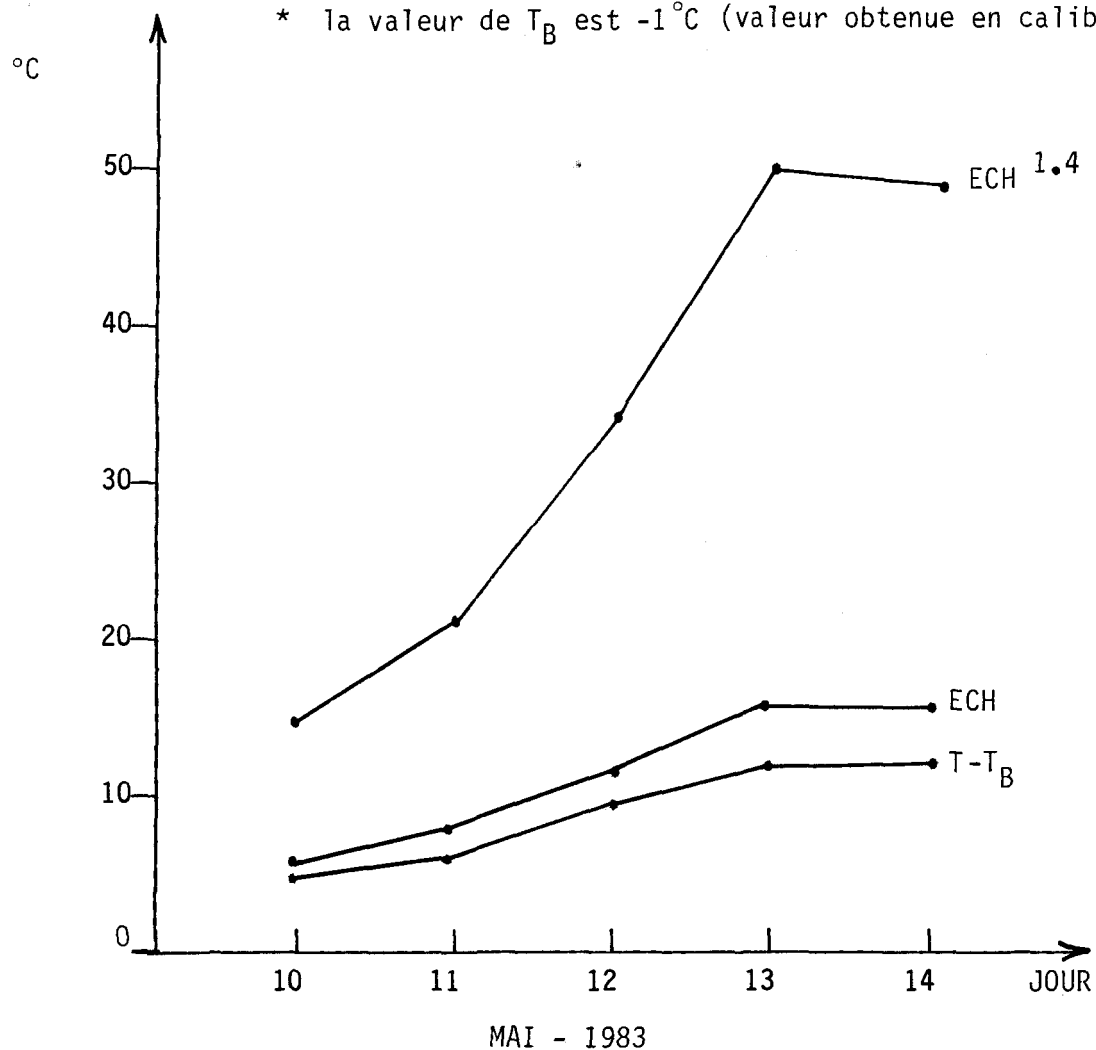


FIGURE 5.2: Comparaison de T et ECH pour une période de température chaude au printemps

Par ailleurs, une modification supplémentaire a été introduite pour favoriser une reproduction encore plus précise du départ de la crue. Il s'agit d'un ajustement inspiré d'observations du processus physique qui veut que la nature du couvert de neige (épaisseur, albédo et état de mûrissement) varie au fur et à mesure qu'on avance vers la crue.

Cela peut se traduire mathématiquement par une variation temporelle de la valeur du coefficient X_2 (U.S. Army, Corps of Engineers, 1956). En pratique, on vise à obtenir une faible valeur de X_2 au début ou avant la crue car à ce moment la fonte est difficile à cause de la faible densité de la neige. Au fur et à mesure que le temps se réchauffe, la neige murie et des canalisations se forment à travers le couvert de neige rendant ainsi la fonte plus facile, énergétiquement parlant. Pour représenter ce phénomène il faut une valeur de X_2 plus grande. Ensuite, une espèce d'équilibre entre l'apport d'énergie et le taux de fonte est atteinte. Une valeur constante de X_2 pour le reste de la crue est alors considérée. Cette variation temporelle de la valeur de X_2 a été rendue possible en le munissant d'un cumuleur d'énergie avec seuil maximal. On peut voir à la figure 5.3, le type de cumuleur utilisé et son effet sur la valeur de X_2 en fonction du temps.

DATE	AVRIL (températures, bassin du lac St-Jean)												
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ECH	1	1	2	3	2	4	4	5	4	4	4	5	5
X_2	$\frac{\text{SUMECH}}{X_8}$												
	0,01	0,06	0,13	0,26	0,39	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45

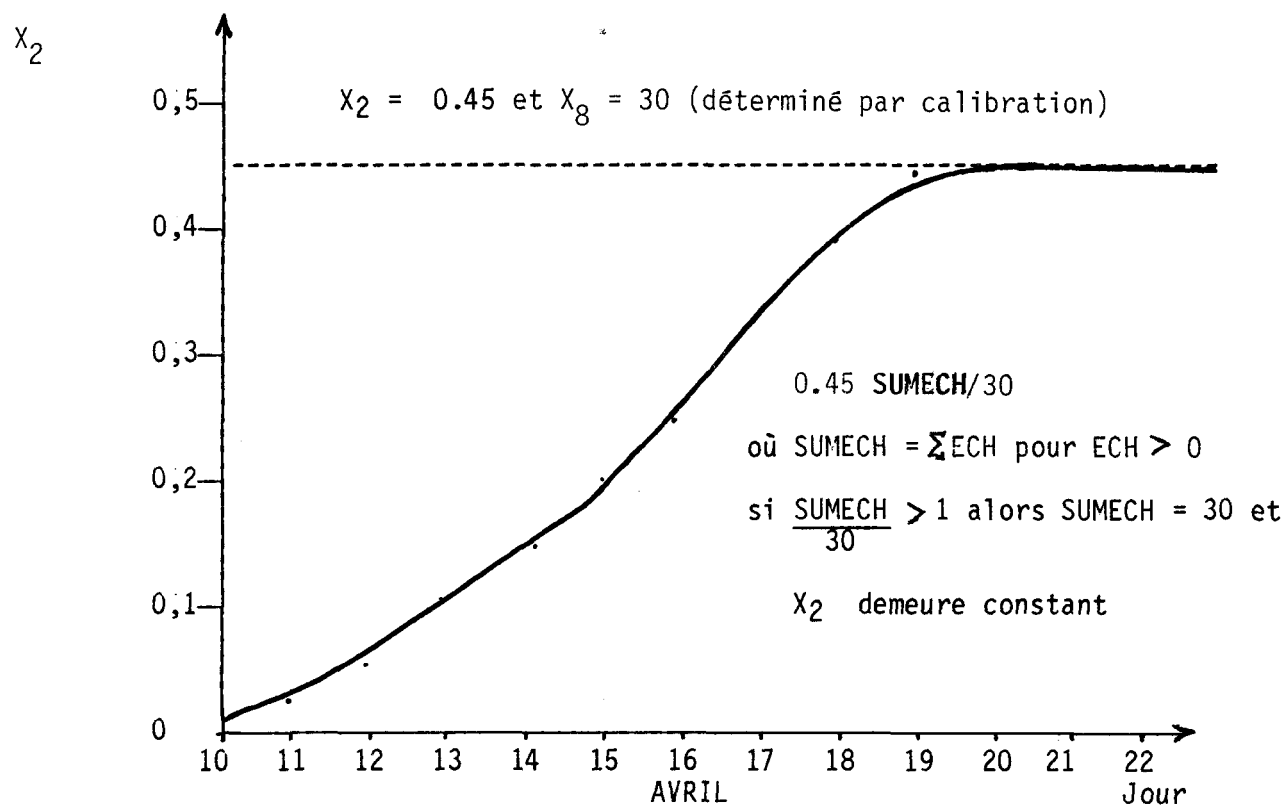


FIGURE: 5.3 Effet du réducteur de sensibilité sur le facteur degré-jour

La forme finale de l'équation de la fonte de la neige sans précipitation est donc la suivante:

$$SM = (X_2 \frac{SUMECH}{X_8}) (ECH)^{1.4} \quad (5.7)$$

où SM = eau de fonte en mm/jour

X_2 = coefficient ajusté selon le bassin

$$ECH = \frac{(2TMX + TMN)}{3} - T_B$$

$SUMECH = \sum ECH$ pour $ECH > 0$

X_8 = coefficient ajusté selon le bassin en ° C

Il est à noter que lorsqu'il n'y a pas de neige au sol, la valeur de ECH et SUMECH est zéro. C'est à partir du début de l'hiver, c'est-à-dire lorsque la neige commence à s'accumuler dans le modèle, que le calcul de SUMECH et ECH s'effectue. Lorsque $SUMECH/X_8 > 1$, alors $SUMECH = X_8$ et la valeur du paramètre X_2 demeure constante jusqu'à la fonte complète de la neige. La valeur de X_8 sera déterminée par l'analyse d'une année hydrologique où les précipitations auront été faibles aux alentours du départ de la crue.

5.2.2 Équation de fonte de la neige avec précipitation

L'équation utilisée dans MC1 pour calculer l'eau de fonte de la neige dans les cas où il y a présence de précipitation a été présentée au

chapitre 3. Rappelons qu'elle était basée sur la méthode du bilan d'énergie et comportait plusieurs simplifications telles que suggérées par Gray (1970). Les modifications apportées à cette équation pour l'améliorer proviennent surtout de l'expérience acquise avec le modèle. Ainsi, quoique l'équation semblait relativement simple, elle demeurait tout de même complexe puisqu'elle tenait compte à la fois de la température et de la précipitation. L'interprétation des résultats de cette équation était ainsi rendue difficile. De plus, suite à un examen détaillé de la structure du sous-modèle de fonte, deux points importants ont ressorti:

- 1) étant donné que l'équation de la fonte de la neige sans précipitation tenait déjà compte de la température on alourdissait inutilement le sous-modèle de fonte en considérant une autre équation qui tenait compte également de la température;
- 2) de plus, l'équation de la fonte de neige avec précipitation tenait compte de la précipitation totale et non de la précipitation liquide, soit celle qui contribue directement à la fonte.

Le réaménagement de l'équation a surtout consisté à appliquer un raisonnement logique au phénomène en présence en établissant les principes suivants:

- utiliser une seule équation qui tient compte de la température que ce soit pour les cas de fonte de la neige avec ou sans précipitation;
- par contre, s'il y a de la pluie, utiliser en plus une méthode de calcul qui permettra de tenir compte de l'eau de fonte supplémentaire résultant de la présence de pluie.

La méthode suggérée est la suivante:

$$SMP = X_{14} PL \quad (5.8)$$

où SMP = eau de fonte dû à la pluie en mm/jour

X_{14} = coefficient ajusté selon le bassin

PL = précipitation liquide en mm

Cette modification a permis de simplifier et mieux cerner le rôle de chaque élément pouvant influencer le taux d'apport non contrôlé du bassin en période de crue.

Afin de se rapprocher davantage du processus physique du début de la crue, comme il a été préconisé à la sous-section précédente, un

réducteur de sensibilité de fonte a également été incorporé. La forme finale de l'équation est donc devenue:

$$SMP = X_{14} \frac{SUMPL}{X_{15}} PL \quad (5.9)$$

où $SUMPL$ = pluie cumulée en mm

X_{15} = coefficient ajusté selon le bassin en mm

Il est suggéré de calibrer X_{15} manuellement dans un premier temps et de le laisser fixe par la suite. Idéalement, on devrait se baser sur une averse historique importante ayant fait démarrer une crue. La valeur de $SUMPL = 0$ jusqu'au moment où l'on atteint une valeur de neige au sol de 20 millimètres. Cela permet d'éviter les périodes de fonte de neige en automne. À partir de ce moment, le calcul de $SUMPL$ s'effectue. Lorsque $SUMPL/X_{15} > 1$, alors $SUMPL = X_{15}$ et le réducteur de sensibilité n'a plus d'effet jusqu'à la fin de la fonte de la neige.

Enfin, pour éliminer le paramètre X_8 du modèle MC1 et tirer avantage des informations du SIH, le modèle MC2 a été modifié de façon à obtenir directement les données de précipitation liquide et solide disponibles dans la banque de données météorologiques par bassin.

5.2.3 Synthèse et analyse du nouveau sous-modèle de fonte

Au bilan, les modifications apportées jusqu'ici au sous-modèle de fonte ont permis d'établir une équation de fonte de la neige basée sur l'énergie de la température et une autre basée sur l'énergie de la précipitation liquide. On obtient donc l'équation globale suivante:

$$SM = SMCH + SMP \quad (5.10)$$

où SM = eau de fonte totale en mm/jour

$SMCH$ = eau de fonte dû à la chaleur en mm/jour (équation 5.7)

SMP = eau de fonte dû à la pluie en mm/jour (équation 5.9)

Par ailleurs, pour respecter la physique de l'écoulement de l'eau entre la surface et le sous-sol, un coefficient de ruissellement associé à la quantité d'eau de fonte SM doit être appliqué. L'équation prend alors la forme suivante:

$$RSM = X_4 SM \quad (5.11)$$

où RSM = ruissellement de surface dû à la fonte de la neige en mm/jour

X_4 = coefficient ajusté selon le bassin

SM = eau de fonte totale en mm/jour

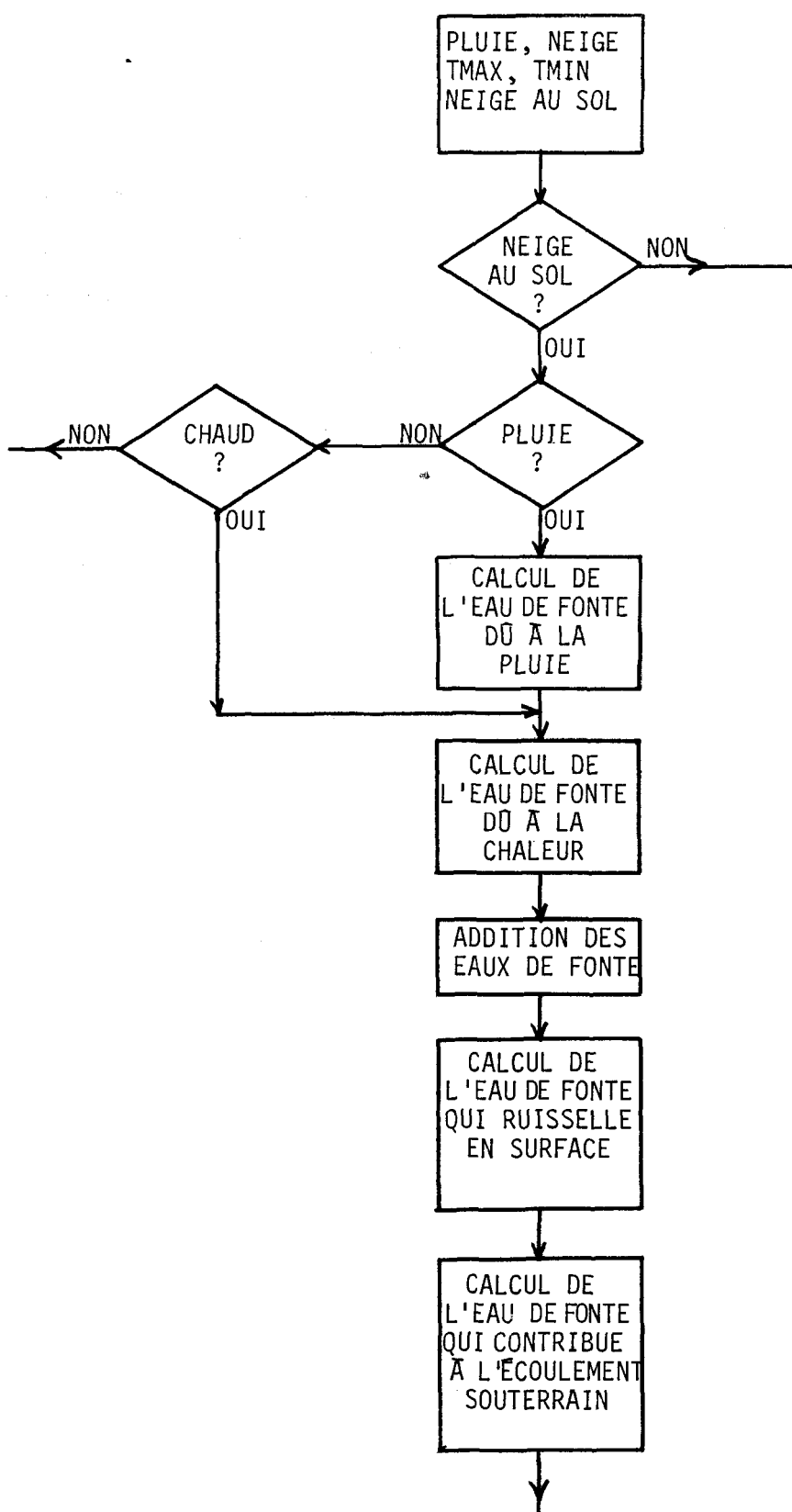
Enfin, c'est la quantité d'eau résultante soit:

$$XIN = SM - RSM \quad (5.12)$$

qui sera la quantité d'eau de fonte de la neige contribuant à l'écoulement souterrain. La figure* 5.4 montre un schéma simplifié du nouveau sous-modèle de fonte proposé. Les résultats des améliorations effectuées sont présentés et commentés au chapitre 6.

5.3 FONCTION DE TRANSFERT DES RUISSELLEMENTS

Une fois que les divers types de ruissellement (souterrain, surface et fonte de la neige) sont calculés, il faut se doter d'une fonction de transfert pour que cette eau puisse reconstituer l'hydrogramme réel des apports non contrôlés du bassin. Lorsqu'on travaille avec un bassin de grande superficie, tel celui traité dans ce mémoire, il faut tenir compte que les effets d'une averse dureront plusieurs jours. Dans ce genre de cas, on utilise habituellement un hydrogramme unitaire historique ou synthétique qui a pour rôle de distribuer les volumes d'eau calculés à chaque jour dans le temps. Toutefois, il faut être conscient des limites de la théorie de l'hydrogramme unitaire car son application est surtout réservée aux bassins de petites superficies. L'un des critères de base de cette théorie est l'homogénéité spatio-temporelle de l'intensité de l'averse. Ceci survient rarement en pratique pour de grands bassins (Gray, 1970).



NOTE: On retrouve un ordinogramme détaillé du modèle hydrologique MC2 en annexe 3

Figure 5.4: Schéma simplifié du nouveau sous-modèle de fonte

Rappelons que dans le modèle MC1, tel que mentionné au chapitre 3, on utilise un hydrogramme unitaire synthétique (HUS) du type linéaire exponentiel comme fonction de transfert (Bouchard et Salesse, 1983). Il est décrit au moyen de deux paramètres, le temps de montée, X_{18} et le débit de pointe, X_{19} . Il s'agit là d'un hydrogramme purement mathématique.

Le type d'hydrogramme unitaire utilisé dans MC1 comportait principalement deux problèmes.

En premier lieu, un seul hydrogramme unitaire synthétique était utilisé pour toutes les sources de ruissellement. Une comparaison a été faite entre l'hydrogramme unitaire synthétique et un hydrogramme unitaire historique déterminé par la méthode standard basée sur un événement pluie-ruissellement (Gray, 1970) pour le bassin concerné. Le graphique est montré à la figure 5.5. On remarque que l'hydrogramme unitaire synthétique est beaucoup plus aplatie que l'historique. Ceci a pour effet de retarder et d'atténuer en partie la réponse du modèle lors d'averses importantes tel qu'observé lors de l'analyse des résultats avec MC1. Ainsi, pour améliorer la situation et se rapprocher du processus physique, deux types d'hydrogramme de type unitaire ont été introduits. Le premier hydrogramme de type unitaire historique servira aux conditions de ruissellement en régime saturé et l'autre de type unitaire synthétique pour les autres types de ruissellement (surface, souterrain et fonte de la neige). Une structure semblable a été utilisée avec succès dans le modèle UBC de Quick et Pipes (1976).

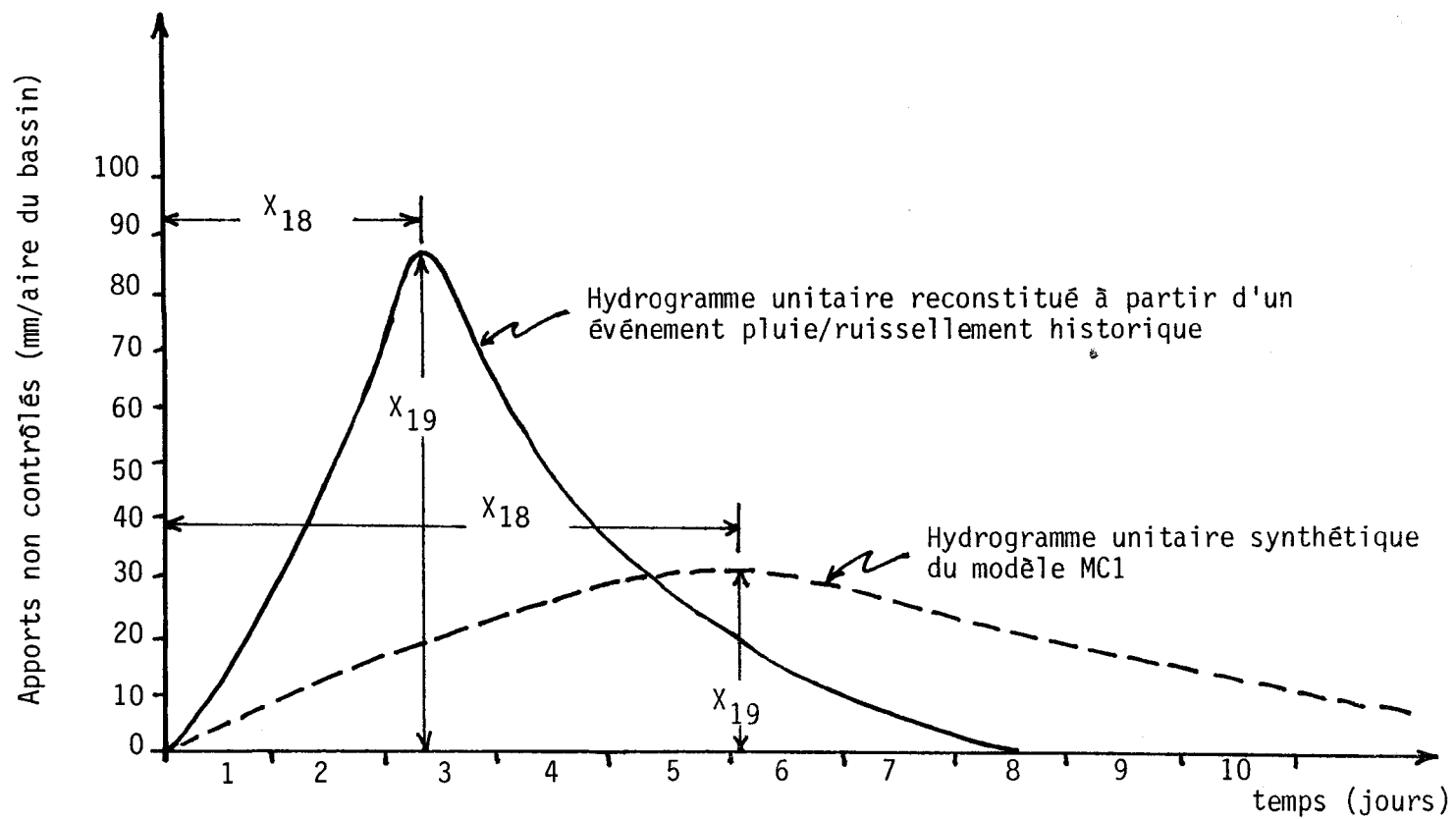


Figure 5.5: Comparaison d'un hydrogramme unitaire historique et de l'hydrogramme unitaire synthétique de MC1

Seul l'écoulement de base, RGW, n'a pas été soumis à un hydrogramme unitaire puisque la nature de l'équation permettait déjà un écoulement lent et décroissant. L'idée générale des changements apportés à la fonction de transfert est basée sur le fait que chaque type de ruissellement a un temps de cheminement différent à cause de la variabilité de la nature du sol et de l'humidité où s'effectue l'écoulement.

On définit qu'on est en régime saturé lorsqu'il survient une précipitation importante sur le bassin. Dans ces conditions, le taux de précipitation excède le taux d'infiltration du sol et l'eau ruisselle en surface. Une montée rapide et importante des apports non contrôlés du bassin est alors constatée. Une équation supplémentaire a été ajoutée pour reproduire ces conditions soit:

$$RPS = X_{17} (P - E - X_{16}) \quad (5.13)$$

où RPS = ruissellement de surface en régime saturé en
mm/jour

X_{17} = coefficient de ruissellement ajusté selon le
bassin

P = précipitation totale journalière en mm

E = évapotranspiration journalière calculée en mm

X_{16} = quantité de précipitation qui définit le seuil
du régime saturé et ajustée selon le bassin.

Il est à noter que cette équation est utilisée uniquement lorsque $P \geq X_{16}$, autrement RPS égale 0.

En second lieu, lors d'essais de calibration avec MC1, le paramètre X_{18} , représentant le temps de montée de l'hydrogramme unitaire synthétique, s'est avéré très peu sensible nous amenant à conclure de l'inutilité de le calibrer automatiquement.

Ces modifications ont été incorporés au modèle amélioré et ont permis d'obtenir des résultats très satisfaisants (voir chapitre 6) du point de vue de la synchronisation temporelle entre les apports simulés et observés. Cette méthode d'unir un hydrogramme unitaire historique et synthétique selon la nature de l'écoulement apparaît très convenable pour résoudre le problème de fonction de transfert de bassins à grande superficie.

À titre d'information pratique il est suggéré de donner à X_{18} , le temps de montée de l'hydrogramme unitaire synthétique, une valeur égale à environ la moitié du temps de réponse de l'hydrogramme unitaire historique utilisé pour le ruissellement en régime saturé. Par exemple, pour le bassin étudié, le temps de montée de l'hydrogramme unitaire historique était de deux jours et le temps de réponse 10 jours. La valeur de X_{18} a donc été fixée à quatre jours.

5.4 LA DÉFINITION DE L'ANNÉE HYDROLOGIQUE

Pour les bassins hydrographiques du type de celui du lac Saint-Jean, on utilise généralement une définition particulière de l'année hydrologique, soit du 1er octobre au 30 septembre. Le départ d'une nouvelle année hydrologique s'effectue lorsque le sol est saturé au milieu de l'automne. Toutefois, un examen de cette définition et des conséquences qu'elle entraîne sur l'optimisation des paramètres a fait ressortir un problème important.

En effet, lorsqu'on débute une simulation, la réponse du modèle demeure un certain temps en régime transitoire. Pour remédier à cela, les hydrologues font rouler le modèle durant plusieurs périodes afin d'obtenir une réponse en régime stable. Toutefois cette méthode a le gros désavantage d'utiliser de précieuses données sans vraiment pouvoir en retirer profit. De plus, en débutant la simulation en automne, on doit estimer les paramètres d'écoulement souterrain au moment où ils sont les plus actifs et les conditions d'écoulement très variables. Cela est difficile et entraîne souvent des erreurs pouvant persister durant tout l'hiver.

La solution qui a été adoptée dans ce mémoire pour remédier à ce problème a consisté à redéfinir l'année hydrologique ou simplement le moment où débute la simulation. Si on veut atténuer les effets des

problèmes décrits précédemment il s'agit de débiter la simulation au début du mois de mars, période où les ruissellements sont les plus faibles dans l'année pour le bassin du lac St-Jean. À ce moment, l'écoulement est généralement de nature uniquement souterraine. De plus, dans le cas du bassin étudié, on dispose pour chaque année d'une estimation de la couverture nivale au début de mars. L'expérience de calibration débutant le 1er mars comparée à celle débutant le 1er octobre a permis de faire ressortir les points suivants:

- 1) l'erreur résultant du régime transitoire a peu d'effet sur les résultats à cause de la faible valeur des ruissellements au début de mars;
- 2) au début de mars, seule la valeur initiale du paramètre de l'écoulement de base doit être estimée, les autres types de ruissellement étant négligeables;
- 3) l'estimé du couvert de neige au sol à partir des données observées au début de mars est représentative et permet d'entreprendre la crue printanière avec des données précises;
- 4) avec la nouvelle année hydrologique on maximise le potentiel des données disponibles puisqu'on a pas besoin de périodes de réchauffement pour le modèle.

Le problème du début d'une simulation hydrologique a été peu traité dans la littérature consultée et la méthode proposée apparaît un développement intéressant et pratique à ce sujet.

5.5 LE NOUVEAU MODÈLE MC2

Un résumé des équations du modèle MC1 et du nouveau modèle, qu'on appellera dorénavant MC2 est présenté au tableau XII. La description des paramètres du nouveau modèle, MC2, est fournie au tableau XIII et un ordinogramme détaillé est disponible en annexe 3.

En résumé, des modifications importantes ont été apportées au modèle MC1 en regard des sous-modèles d'écoulement souterrain et de fonte de la neige et à la fonction de transfert. Une modification avantageuse a également été apportée à la définition de l'année hydrologique. Aussi, le modèle MC2 a profité de la disponibilité des données nivométriques et de précipitation (pluie et neige) contenues dans le SIH Alcan. Toutefois, beaucoup d'efforts ont été investis dans le but de ne pas augmenter la complexité du modèle. Plus un modèle est complexe, plus il a tendance à mieux représenter la nature mais également plus il devient exigeant en données. Si les données ne sont pas disponibles ou si elles sont de mauvaise qualité, il est alors fréquent que de meilleurs résultats puissent être obtenus avec un modèle plus simple (Kite, 1978; Garen et

TABLEAU XII: Comparaison des équations paramétriques des modèles MC1 et MC2	
ANCIEN MODÈLE: MC1	NOUVEAU MODÈLE: MC2
RLAC = $X_1 * LAC ** X_9$	RSTOR = $X_1 * (STOR ** 2)$
SM = $X_2 * (T - X_6)$	SMCH = $((X_2 * SUMECH / X_8) * ECH ** 1.4)$
RP = $X_3 * (P - E)$	RP = $X_3 * (P - E)$
RSM = $X_4 * SM$	RSM = $X_4 * SM$
X_5, X_{10} = Non utilisés	RGW = $X_5 * GW ** 2.5$
TSNM = X_6	TSNM = X_6
LACI = X_7	X_7 = GW initial
X_8 = Seuil de fonte de la de la neige	PERC = $X_9 * (STOR ** 2)$
E = $X_{11} * (TM ** X_{12})$	X_{10} = Non utilisé
X_{13} = E en hiver	E = $X_{11} * TM ** X_{12}$
SM = $(X_{14}) * (T - TSNM) + 0.0126 * P * (T - TSNM) + 1.27$	X_{13} = E en hiver
X_{15} = seuil degrés-jours	SMP = $X_{14} * SUMPL / X_{15} * PL$
X_1 = $X_1 + X_{16}$	RPS = $X_{17} * (P - E - X_{16})$
X_1 = $X_1 - X_{17}$	
DELTAT = X_{18}	DELTAT = X_{18}
QMAX = X_{19}	QMAX = X_{19}

NOTE: 1) Pour la définition des symboles voir la liste fournie au début du texte page xi
 2) * est le symbole utilisé pour la multiplication
 ** est le symbole utilisé pour l'exposant
 / est le symbole utilisé pour la division

TABLEAU XIII: Paramètres du modèle hydrologique MC2			
Paramètre	Définition	Unité	Calibration automatique (A) ou manuelle (M)
X ₁	Coefficient de ruissellement intermédiaire	-	A
X ₂	Coefficient de fonte de la neige dû à la chaleur	-	A
X ₃	Coefficient de ruissellement de l'écoulement de surface	-	A
X ₄	Coefficient de ruissellement de l'eau de fonte de la neige	-	A
X ₅	Coefficient de ruissellement de l'écoulement souterrain	-	A
X ₆	Seuil pour le calcul de l'énergie dû à la chaleur	°C	M
X ₇	Quantité d'eau souterraine au début de la simulation	mm	M/A
X ₈	Dénominateur de l'atténuateur du coefficient de fonte de la neige dû à la chaleur	°C	M
X ₉	Coefficient de ruissellement de percolation	-	A
X ₁₀	Non utilisé		
X ₁₁	Coefficient pour le calcul de l'évapotranspiration	-	M/A
X ₁₂	Exposant de la température moyenne dans l'équation du calcul de l'évapotranspiration	-	M/A
X ₁₃	Valeur de l'évapotranspiration journalière en hiver	mm	M
X ₁₄	Coefficient de fonte de la neige dû à la pluie	-	A
X ₁₅	Dénominateur de l'atténuateur du coefficient de fonte de la neige dû à la pluie	mm	M
X ₁₆	Seuil du taux de précipitation journalière déterminant les conditions d'écoulement de surface en régime saturé	mm	M
X ₁₇	Coefficient de ruissellement de l'écoulement de surface en régime saturé	-	A
X ₁₈	Temps de montée de l'hydrogramme unitaire synthétique	Jours	M
X ₁₉	Débit de pointe de l'hydrogramme unitaire synthétique		A

Burges, 1981; Naef, 1981). Les problèmes supplémentaires engendrés par la complexité d'un modèle annulent trop souvent les avantages d'une meilleure représentativité des processus (Isabel, 1983).

Rappelons que le modèle MC1 comportait douze paramètres à calibrer automatiquement, cinq autres étaient déterminés par la physique du phénomène et deux paramètres étaient fixés dans le modèle, soit un total de dix-neuf paramètres. Pour sa part, le modèle MC2 comporte lui aussi douze paramètres à calibrer automatiquement, six paramètres sont estimés en se basant sur les caractéristiques physiques du bassin considéré et quatre paramètres sont fixés dans le modèle (exposants des équations 5.2, 5.4 et 5.6 et valeur initiale de STOR), soit un total de vingt-deux paramètres. Des parties du modèle original ont été simplifiées et d'autres élaborées mais les mêmes données d'entrée ont été conservées exception faite de la lecture directe des données de pluie et de neige au lieu de la précipitation totale et des données nivométriques du 1er mars. Seuls les paramètres X_3 , X_4 , X_{11} , X_{12} et X_{13} n'ont pas eu à subir de modifications de MC1 à MC2.

5.6 LA CALIBRATION DE MC2

La méthode élaborée au chapitre 4 a été employée pour calibrer le modèle MC2.

Une nouvelle analyse des données hydrométéorologiques historiques a dû être effectuée à cause du changement de la définition de l'année hydrologique (1er mars au 28 février). Les années sélectionnées ont été 1962-63 (année sèche avec 80% de la moyenne à long terme), 1968-69 (année normale avec 93% de la moyenne à long terme) et 1973-74 (année pluvieuse avec 119% de la moyenne à long terme).

Les bornes des paramètres de MC2 ont été déterminées en trois étapes. En premier lieu, les bornes de X_6 , X_8 , X_{13} , X_{15} , X_{16} et X_{18} ont été estimées en se basant sur les conditions limites du phénomène physique pour le bassin étudié. En second lieu, les bornes des autres paramètres ont été établies à partir des limites mathématiques imposées sur les équations concernées. En dernier lieu, un graphique de la variation de la valeur de la fonction critère en fonction de chacun des paramètres a permis de s'assurer de l'existence d'un seul minimum. Dans les cas où il y avait plus d'un minimum, le champ de recherche de la valeur optimale a été rétréci de façon à éliminer le problème. À cet effet, les bornes des paramètres X_7 et X_{14} ont dû être modifiées.

Par ailleurs, ce sont les valeurs optimales des graphiques de la fonction critère en fonction de chaque paramètre qui ont été choisies comme valeurs initiales pour l'étape de calibration. Seuls les paramètres X_{13} , X_{16} et X_{18} ont été directement estimés à partir de la connaissance physique du bassin à l'étude.

L'optimisation a été réalisée en trois étapes tel que montré au tableau XIV. Deux séries de paramètres ont démontré une grande sensibilité, soit ceux reliés au sous-modèle de fonte et ceux du sous-modèle d'écoulement souterrain. Une optimisation de chacune de ces séries de paramètres a été effectuée pour les trois années. Encore là, les valeurs optimales finales ont été différentes et ont dû être pondérées (moyenne arithmétique) sauf pour X_7 qui est différent pour chaque année. Encore une fois, la dernière étape de la calibration a été effectuée uniquement avec l'année moyenne afin de tenir compte de l'interdépendance des valeurs finales optimales de l'ensemble des paramètres. Les résultats sont discutés au chapitre 6 et se sont avérés très satisfaisants.

À titre de commentaire général, mentionnons que les résultats obtenus lors de la calibration et la validation avec MC2 étaient du même ordre de grandeur et à ce titre étaient beaucoup plus cohérents que ceux de MC1. Toutefois, les améliorations apportées au modèle n'ont pas permis de résoudre le problème de la présence de minimums locaux. Les paramètres du sous-modèle d'écoulement souterrain ont convergé plus facilement vers des valeurs optimales semblables. Par contre, ce ne fut pas le cas pour les paramètres du sous-modèle de fonte de la neige. En particulier, plusieurs essais ont permis de faire ressortir l'interdépendance des paramètres X_2 et X_4 et une variation notable de X_{14} d'une année hydrologique à l'autre. Cette variation pourrait signifier que le sous-modèle de fonte de MC2 pourrait être encore amélioré du point de vue stabilité des paramètres.

TABLEAU XIV: VALEURS DES PARAMÈTRES LORS DE LA CALIBRATION DE MC2												
Para- mètres	BORNE		1ÈRE ETAPE				2ÈME ETAPE				3ÈME ETAPE	
	infé- rieu- re	supé- rieu- re	Valeurs initiales	Valeurs finales 1961-62	Valeurs finales 1968-69	Valeurs finales 1973-74	Valeurs initiales	Valeurs finales 1961-62	Valeurs finales 1968-69	Valeurs finales 1973-74	Valeurs initiales	Valeurs finales 1968-69
X ₁	0.0	1.0	0.20				0.20				* 0.20	0.23
X ₂	0.0	1.0	* 0.50	0.39	0.42	0.54	0.45				0.45	0.45
X ₃	0.0	1.0	0.30				0.30				* 0.30	0.26
X ₄	0.0	1.0	* 0.60	0.31	0.42	0.35	0.36				0.36	0.36
X ₅	0.0	0.10	0.04				* 0.034	0.037	0.068	0.045	0.05	0.05
X ₆	-3.0	3.0	-1.00				-1.00				-1.0	-1.0
X ₇	0.50	2.0	* 1.00	0.65	1.20	1.17	* 1.20	0.65	1.20	1.17	* 1.20	1.2
X ₈	1.0	100.0	30.0				30.0				30.0	30.0
X ₉	0.0	2.0	1.5				1.5		*		* 1.5	1.4
X ₁₀	-	-	-				-				-	-
X ₁₁	0.0	1.0	0.75				0.75				* 0.75	0.85
X ₁₂	0.0	2.0	0.63				0.63				* 0.63	1.63
X ₁₃	0.0	1.0	0.2032				0.2032				0.2032	0.2032
X ₁₄	0.0	4.0	* 1.0	1.22	1.70	2.81	1.90				1.90	1.90
X ₁₅	1.0	80.0	50.0				50.0				50.0	50.0
X ₁₆	5.0	80.0	10.0				10.0				10.0	10.0
X ₁₇	0.0	1.0	0.5				0.5				0.5	0.5
X ₁₈	0.0	5.0	4.0				4.0				4.0	4.0
X ₁₉	0.0	1.0	0.1				* 0.1	0.11	0.25	0.24	0.199	0.199

* Signifie que le paramètre est optimisé durant cette étape.

NOTE: Les valeurs réelles des paramètres X₁, X₅ et X₉ contenues dans ce tableau doivent être multipliées par 10⁻³ (voir annexe 3).

CHAPITRE 6

COMPARAISON DES RÉSULTATS

Des améliorations ont été apportées au niveau de la procédure de calibration (chapitre 4) et de la structure du modèle original (chapitre 5). Ce chapitre présente une comparaison entre les résultats du modèle amélioré (MC2) et du modèle original (MC1). Une série de critères graphiques et numériques sont utilisés pour évaluer et comparer les deux modèles. Cette vérification s'effectue d'abord sur une période annuelle et ensuite pour la période de crue. Les résultats sont discutés pour les trois années de calibration (sèche, normale, pluvieuse) et pour les trois années de validation (période 1980 à 1982) provenant des données hydrométéorologiques du bassin du lac St-Jean.

6.1 RÉSULTATS GÉNÉRAUX

Les critères de vérification graphiques et numériques utilisés dans ce mémoire pour évaluer les apports non contrôlés observés et simulés des deux modèles sont présentés au tableau XV.

La série de critères suggérés permet d'évaluer et de comparer la qualité des simulations et a été basée sur ceux utilisés habituellement dans la littérature hydrologique (Nash et Sutcliffe, 1970; Aitken, 1973; Organisation météorologique mondiale, 1975; Kite, 1978; Weeks et Hebbert, 1980).

TABLEAU XV: Critères graphiques et numériques de vérification utilisés	
MÉTHODES	<ul style="list-style-type: none"> - hydrogramme annuel des apports non contrôlés journaliers simulés et observés
GRAPHIQUES	<ul style="list-style-type: none"> - hydrogramme de crue des apports non contrôlés journaliers simulés et observés - diagramme de dispersion des apports non contrôlés par $\frac{1}{4}$ de mois simulés et observés.
CRITÈRES	<p>a) <u>Paramètres statistiques*</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> - coefficient de corrélation: CCR entre les apports non contrôlés simulés et observés - fonction critère : F - erreur type d'estimation : S - critère de Nash : CNA - critère de volume : CV et CVCRU - critère de pointe : CPCRU - critère final : CF
NUMÉRIQUES	<p>b) <u>Test statistique non paramétrique</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - test de Wilcoxon (Wilcoxon Signed Rank Test) <p>*NOTE: Une description des critères numériques et la façon de les interpréter est fournie en annexe 2</p>

Les hydrogrammes résultant des simulations avec MC1 et MC2 sont présentées aux figures 6.1 et 6.2 pour les années de calibration et aux figures 6.3, 6.4 et 6.5 pour les années de validation.

Pour les années de calibration, les performances des deux modèles sont assez semblables du point de vue visuel et peuvent être jugées de bonne qualité dans l'ensemble. Ceci est confirmé dans les résultats numériques contenus dans le tableau XVI. Toutes les valeurs des coefficients de mesure indiquent que la reproduction des modèles est de grande qualité. Cela signifie que la calibration est excellente et que les valeurs optimales des paramètres obtenues sont fiables.

Dans le cas présent, il importe de souligner que l'étape de calibration sert à fournir une série de valeurs optimales de paramètres pour chacun des modèles considérés. L'intercomparaison doit se faire plutôt au niveau de l'étape de validation puisque des années hydrométéorologiques différentes ont servi à calibrer les deux modèles à cause du changement de la définition de l'année hydrologique (voir section 5.4). De plus, c'est en période de validation qu'on peut vraiment tester la valeur d'un modèle et les résultats obtenus en font foi. En effet, on peut voir à la figure 6.3 (année 1980) la souplesse qu'a le modèle MC2 à reproduire les apports non contrôlés observés. Particulièrement en été, on peut voir que malgré une très grande variabilité des ruissellements, le modèle MC2 est très fidèle. Le modèle MC1 s'articule moins bien pour ces conditions.

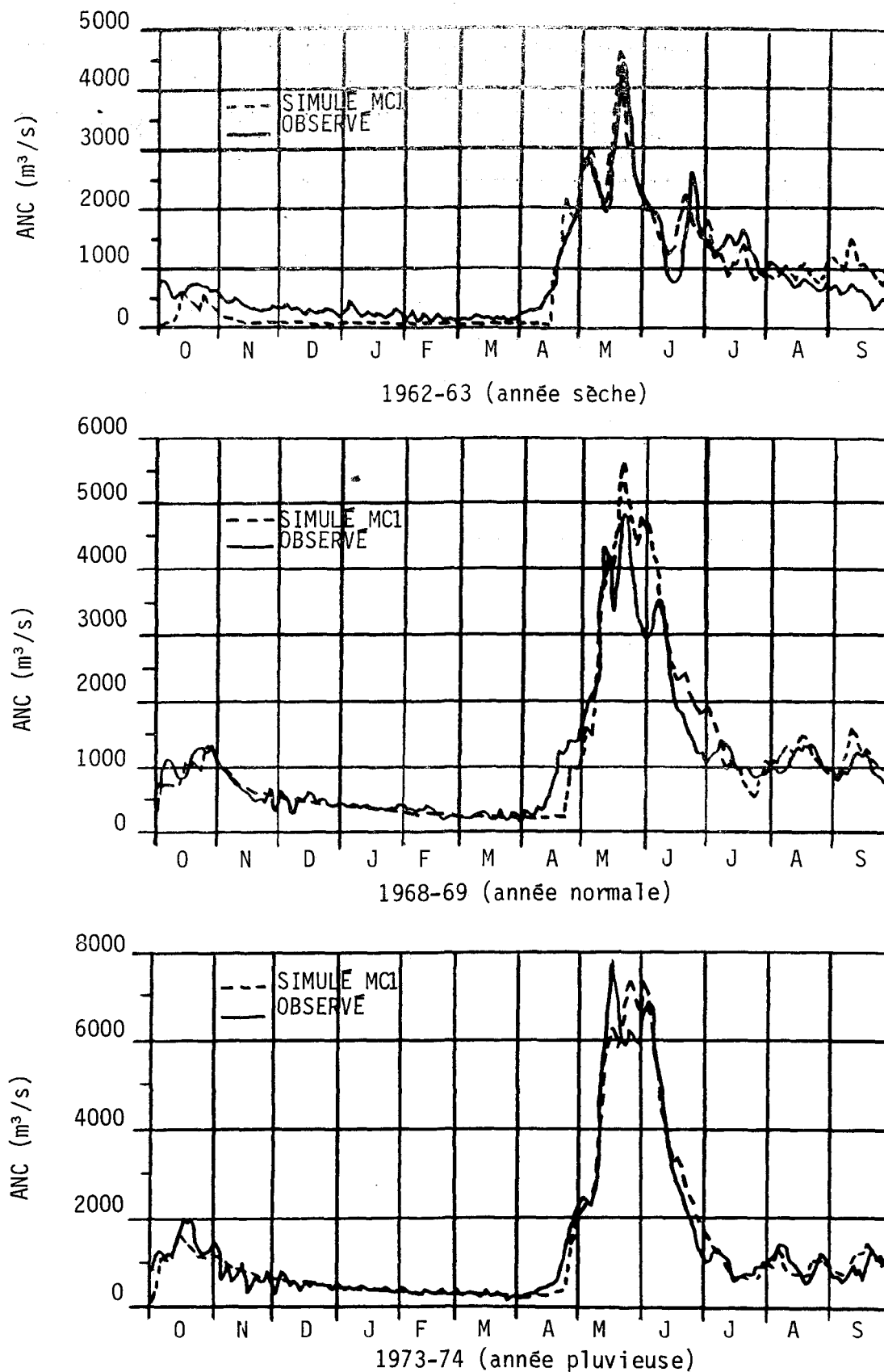


Figure 6.1: Résultats des simulations pour la période de calibration avec MC1

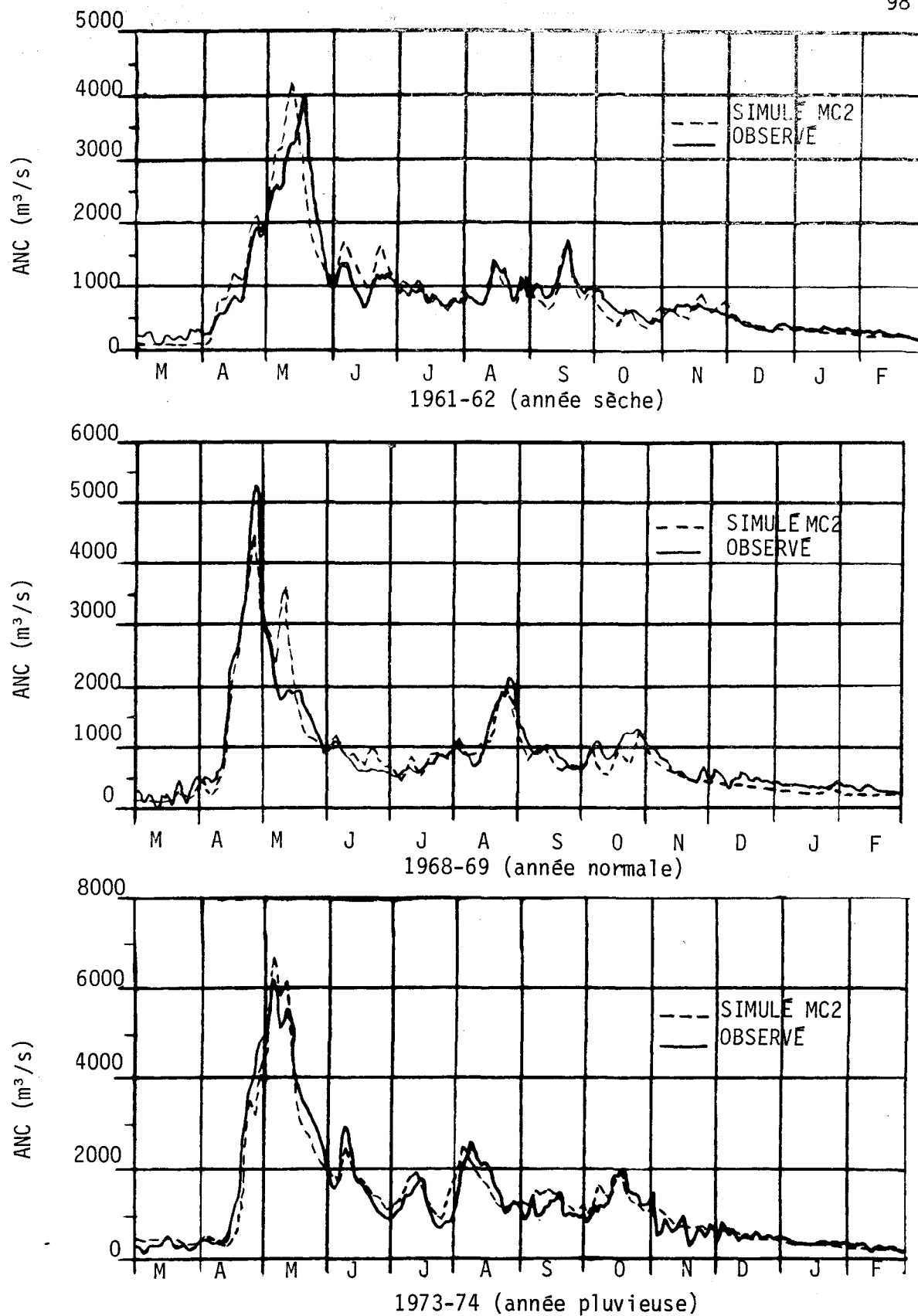


Figure 6.2: Résultats des simulations pour la période de calibration avec MC2.

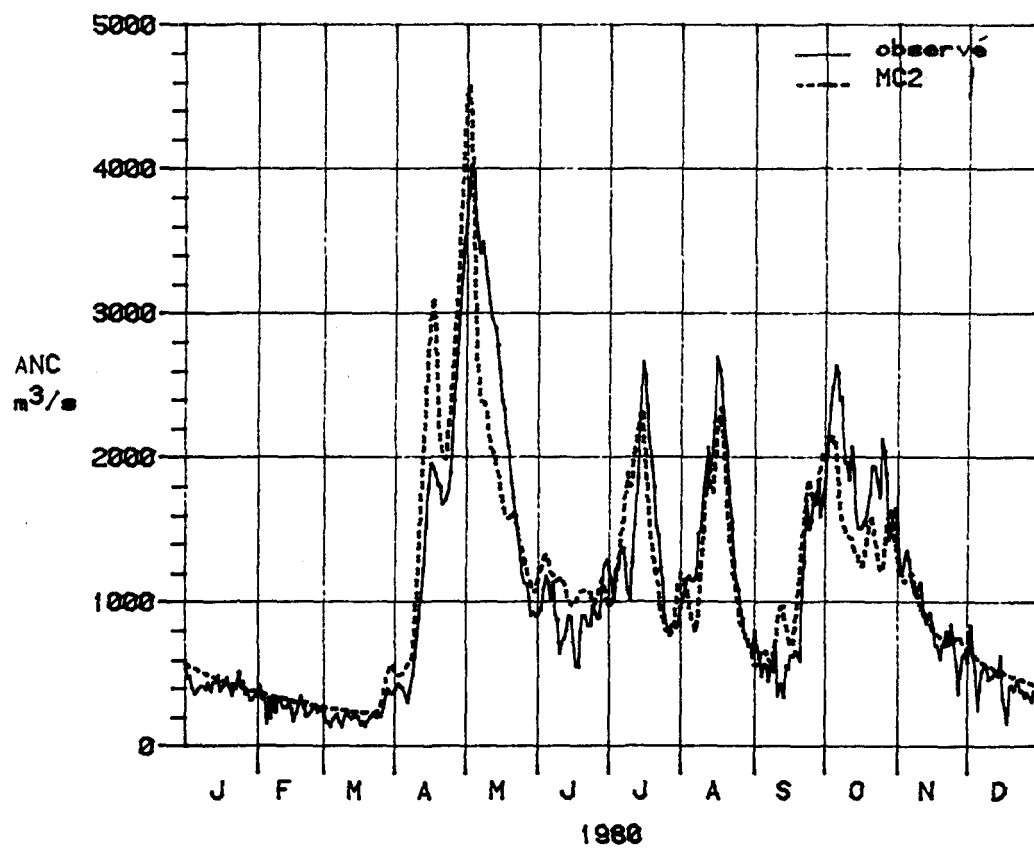
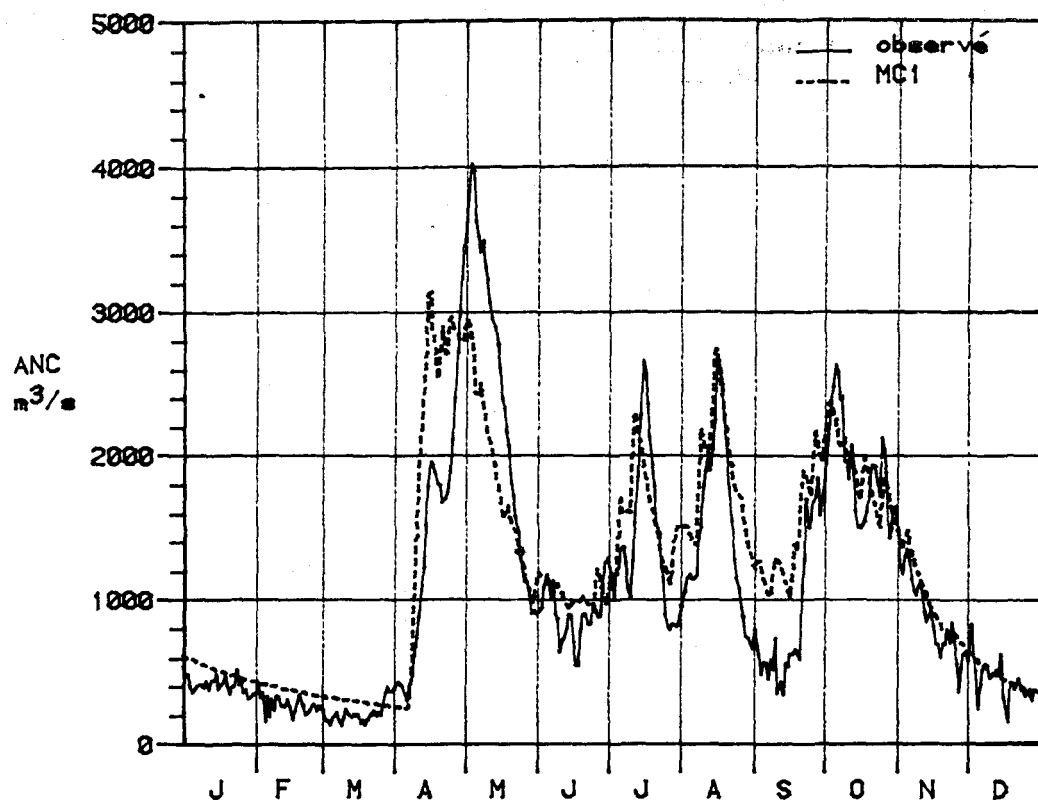


FIGURE 6.3: Résultat des simulations avec MC1 et MC2:
année de validation 1980

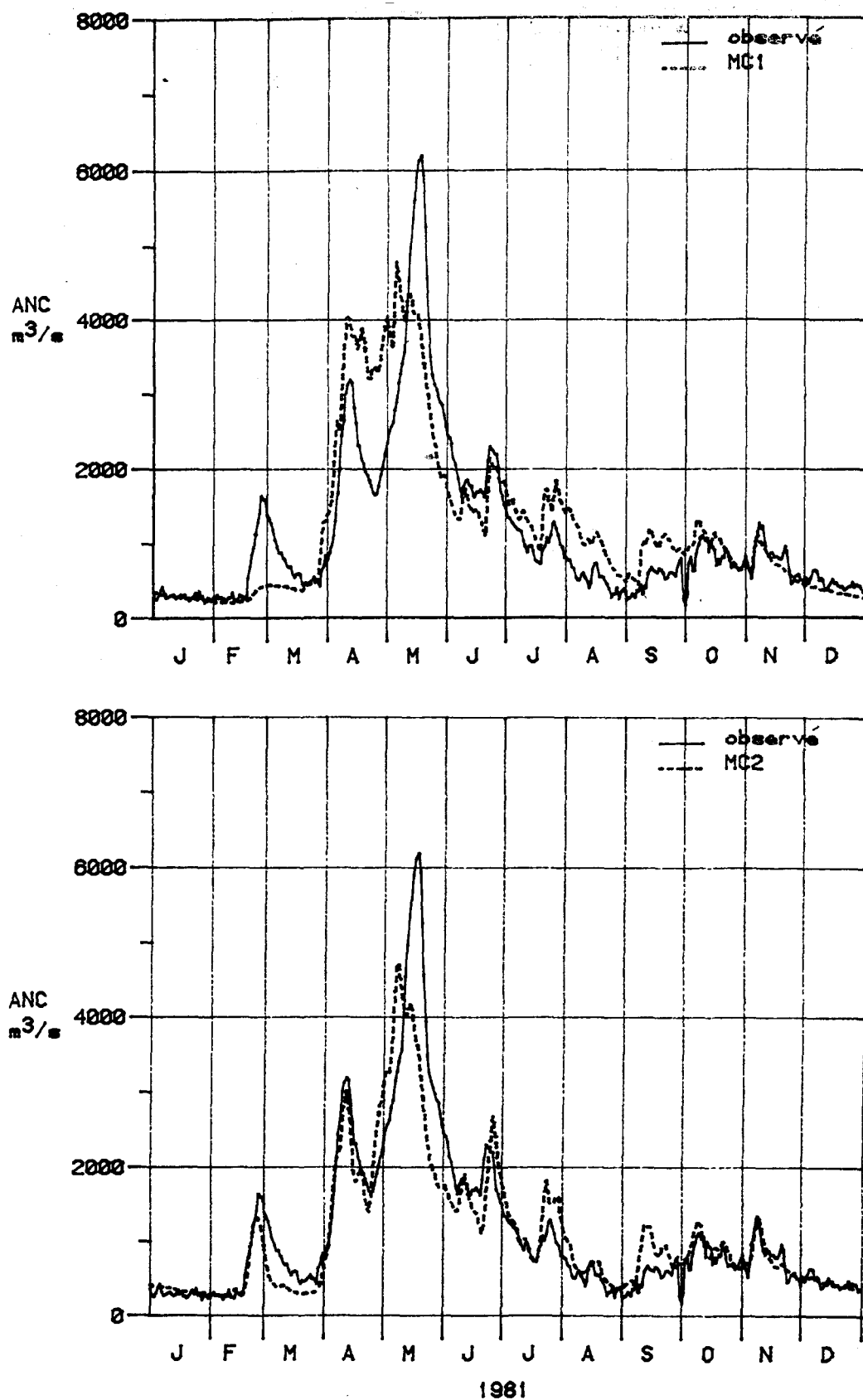


FIGURE 6.4: Résultats des simulations avec MC1 et MC2:
année de validation 1981

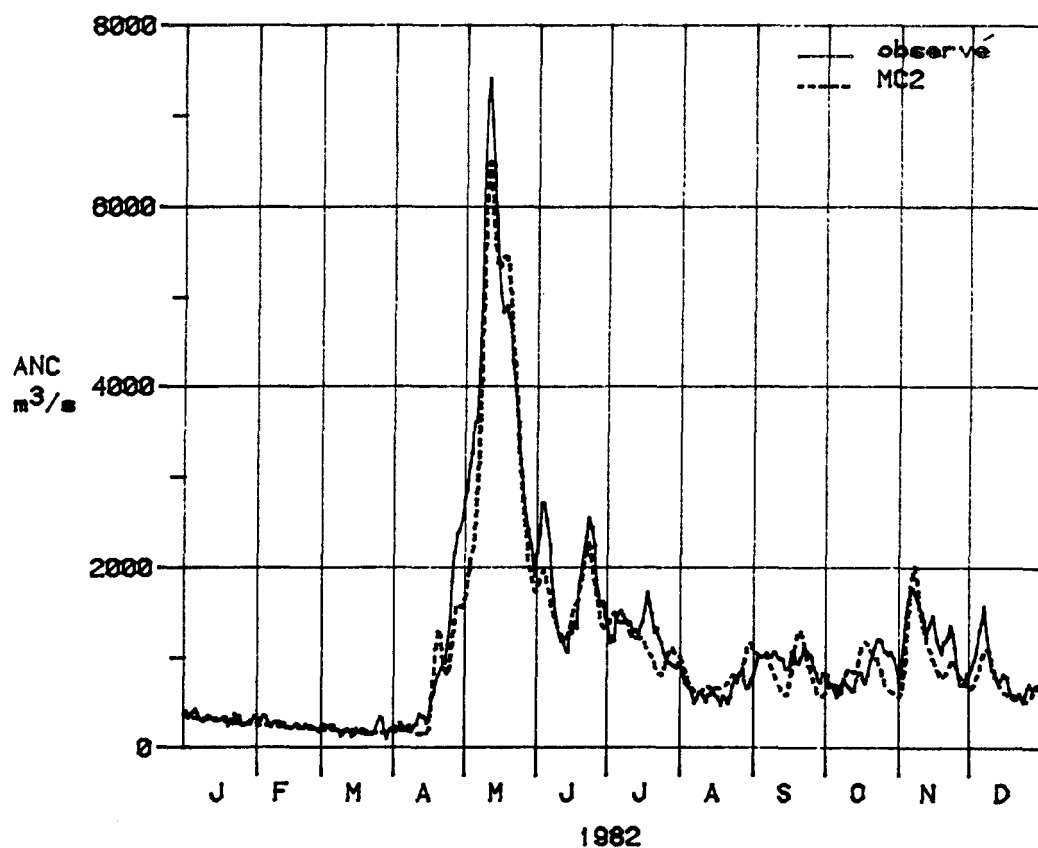
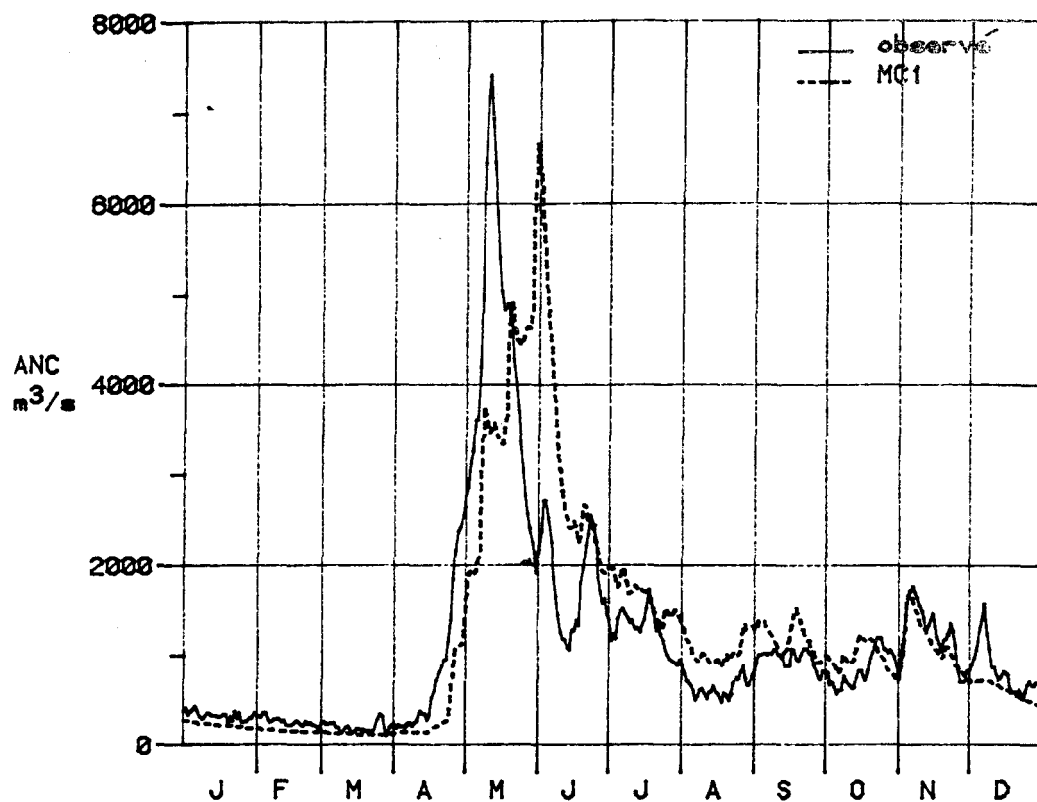


FIGURE 6.5: Résultats des simulations avec MC1 et MC2:
année de validation 1982

TABLEAU XVI: Comparaison des résultats à partir des valeurs des paramètres statistiques							
Paramètres statistiques		CCR	F	S	CNA	CV	CF
<u>Années de calibration</u>							
année sèche	MC1	0.92	94	0.507	0.85	0.01	0.40
	MC2	0.93	62	0.412	0.86	0.00	0.60
année normale	MC1	0.91	145	0.630	0.83 [*]	-0.01	0.50
	MC2	0.93	80	0.468	0.87	0.01	0.50
année pluvieuse	MC1	0.98	118	0.569	0.95	-0.00	0.35
	MC2	0.97	93	0.505	0.93	-0.00	0.30
<u>Années de validation</u>							
1980	MC1	0.87	158	0.658	0.75	-0.03	0.70
	MC2	0.92	99	0.521	0.84	-0.00	0.58
1981	MC1	0.82	343	0.969	0.68	-0.02	0.97
	MC2	0.90	192	0.725	0.82	0.01	0.57
1982	MC1	0.67	690	1.375	0.45	-0.01	1.15
	MC2	0.97	84	0.480	0.93	0.01	0.43

À la figure 6.4 (année 1981), on remarque un fait hydrologique très inusité pour le bassin du lac St-Jean en février soit un taux de fonte anormalement élevé. Le modèle MC2 réagit à cet extrême tandis que le modèle MC1 l'ignore. Le problème d'apport non contrôlé de pointe est discuté à la section suivante. À la figure 6.5 (année 1982), les résultats du modèle MC2 sont nettement plus fiables que ceux obtenus avec le modèle MC1.

D'autre part, l'analyse des résultats numériques du tableau XVI est également très intéressante pour comparer les deux modèles. Ainsi, dans le cas du modèle MC2, le coefficient de corrélation demeure supérieur ou égal à 0.90 pour les trois années de validation et les valeurs de CNA et CF sont du même ordre de grandeur que celles obtenues pour les années de calibration. Ceci indique que les résultats du modèle amélioré sont stables; c'est un aspect extrêmement important pour un modèle déterministe utilisé dans un système de prévision. L'erreur du modèle doit être minimale et stable afin que le gestionnaire puisse développer une confiance dans son outil de prévision.

Dans le cas du modèle MC1, les résultats obtenus ont démontré une plus grande instabilité entre les années de calibration et de validation. Par exemple, la valeur moyenne de S pour les années de validation a pratiquement doublé par rapport à celle obtenue en calibration. Particulièrement, l'année 1982 a comporté beaucoup d'imprécision.

Par ailleurs, une méthode graphique complémentaire a fourni des résultats très intéressants dans la comparaison directe des modèles MC1 et MC2. Il s'agit des diagrammes de dispersion des apports non contrôlés simulés et observés par période de $\frac{1}{4}$ de mois pour les trois années de validation. On peut voir l'allure des deux graphiques à la figure 6.6. Les périodes de $\frac{1}{4}$ de mois sont définies selon les dates suivantes:

1 au 7 (7 jours)

8 au 15 (8 jours)

16 au 22 (7 jours)

23 à la fin du mois (6 à 9 jours)

On remarque la grande variabilité dans la différence des apports non contrôlés simulés du modèle MC1 (version recalibrée) avec ceux observés. La comparaison avec les résultats obtenus du modèle MC2 démontre d'une façon évidente la supériorité de ce dernier à simuler les volumes d'apports non contrôlés hebdomadaires observés. On remarquera que la variabilité de l'erreur de MC2 est faible et sans présence de biais significatif. La qualité de la simulation à estimer les volumes d'eau disponibles à chaque semaine représente un autre atout important du modèle MC2 pour son utilisation dans le système de prévision hydrologique à court terme.

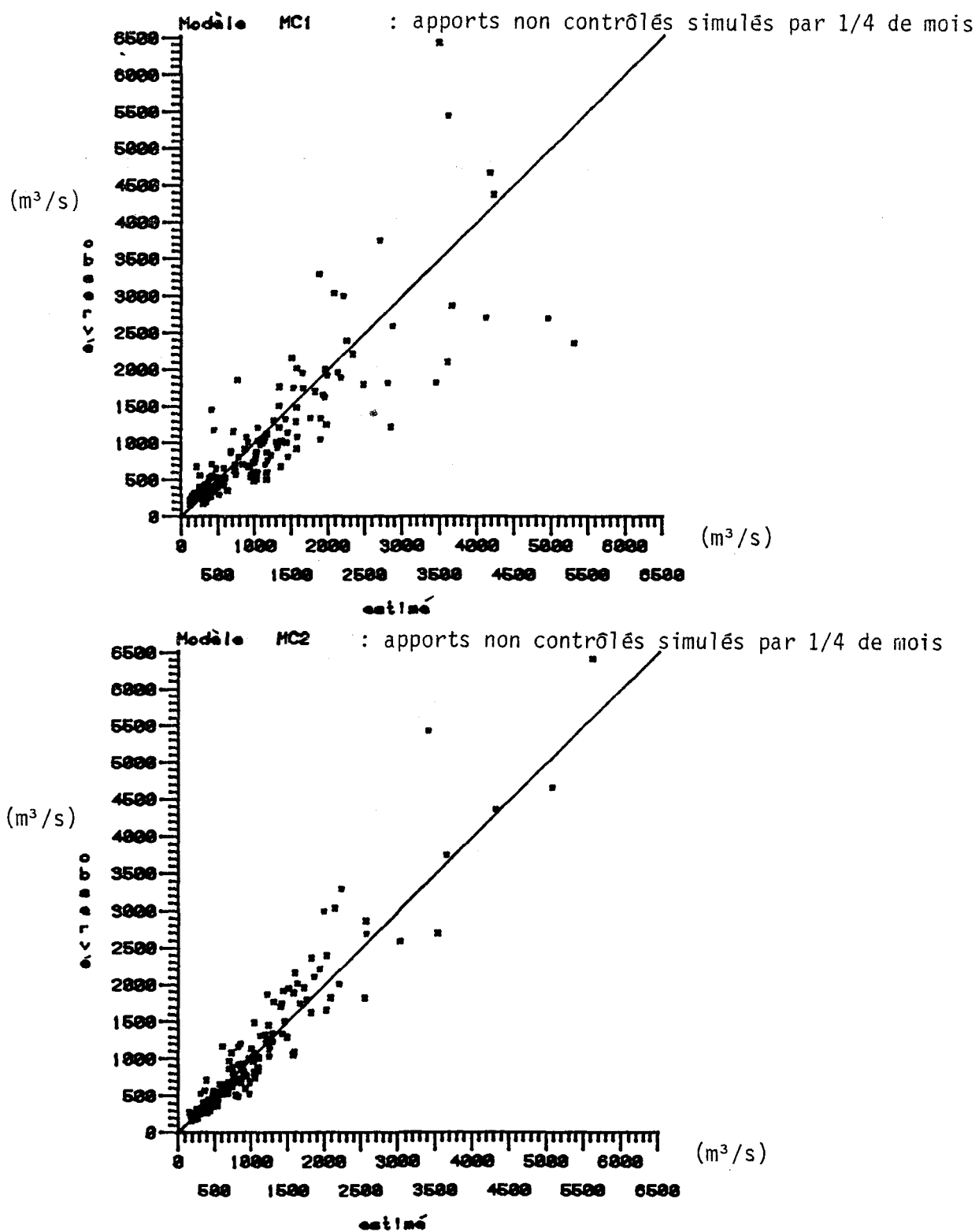


FIGURE 6.6: Diagrammes de dispersion de MC1 et MC2 pour les années de validation 1980 à 1982

Les paragraphes précédents ont permis de comparer les deux modèles à partir de critères numériques et graphiques. De façon générale, le modèle amélioré fournit de meilleurs résultats. Toutefois, il ne suffit pas de s'en tenir à une simple comparaison numérique, il faut vérifier si la différence dans la comparaison d'un modèle à l'autre est vraiment significative statistiquement parlant (Noakes, 1984). À cet effet, l'utilisation d'un test d'hypothèses statistiques, tel le test non paramétrique de Wilcoxon, peut être employé (Conover, 1971; Noakes, 1984).

Pour l'application de ce mémoire, la différence des erreurs (résidus) provenant de deux séries de résultats est comparée.

On veut vérifier les hypothèses suivantes:

Hypothèse nulle H_0 : les résidus du modèle MC1, $E(X)$ sont du même ordre de grandeur que ceux du modèle MC2, $E(Y)$, soit $E(X) = E(Y)$

Hypothèse alternative H_1 : les résidus du modèle MC1 sont plus grands que ceux du modèle MC2 soit $E(X) > E(Y)$

Pour appliquer le test de Wilcoxon, il s'agit d'abord de classer les différences des valeurs absolues des résidus des modèles X et Y

en ordre de grandeur ascendant. Une fois que le rang est assigné, la sommation des rangs de toutes les différences positives est effectuée, ce qui forme la valeur $T(+)$. On compare ensuite la valeur de $T(+)$ au seuil d'acceptation W_p . D'après ce test, l'hypothèse H_0 est rejetée au niveau de la confiance choisie p si $T(+)$ > W_p . On accepte H_0 si $T(+)$ est plus petit que W_p . La valeur de W_p peut être approximée par la formule suivante si N , la grandeur de l'échantillon, est plus grand que 20 (Conover, 1971):

$$W_p = (N(N+1)/4) + X_p \sqrt{N(N+1)(2N+1)/24}$$

où X_p est le p -ième quantile d'une variable standard aléatoire normale (exemple: $X_p = -1.6449$ pour $p = 0.05$)

Une comparaison des deux modèles a été effectuée en se basant sur les résultats des simulations des années de validation. En premier lieu, une comparaison des résidus des modèles a été faite pour les volumes d'apports non contrôlés par période de $\frac{1}{4}$ de mois.

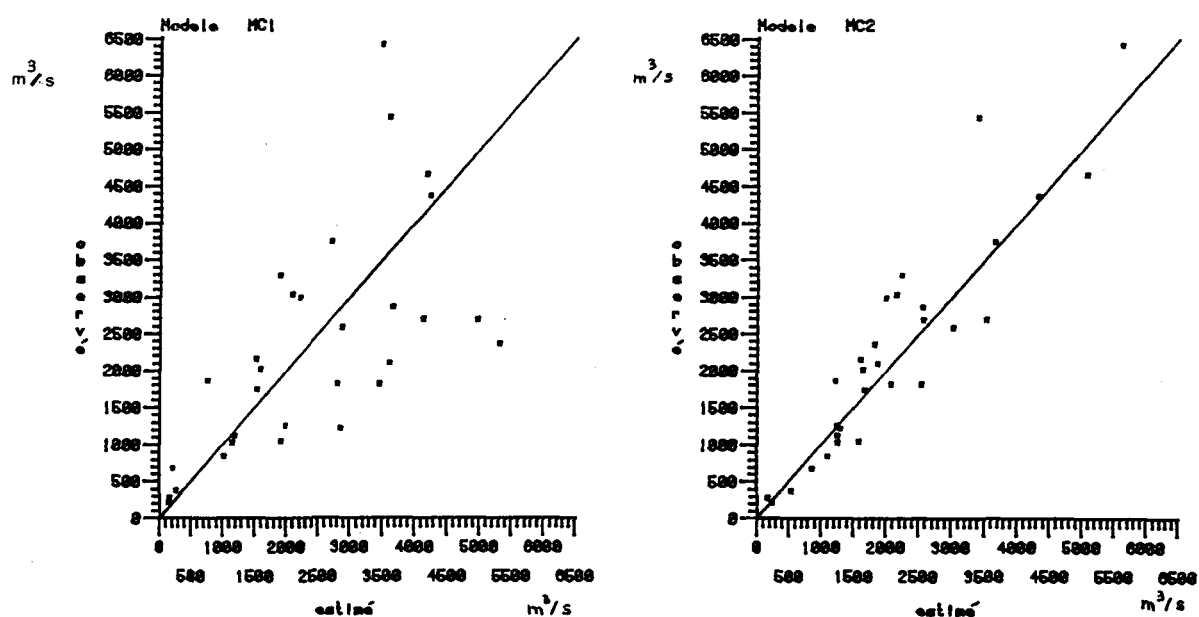
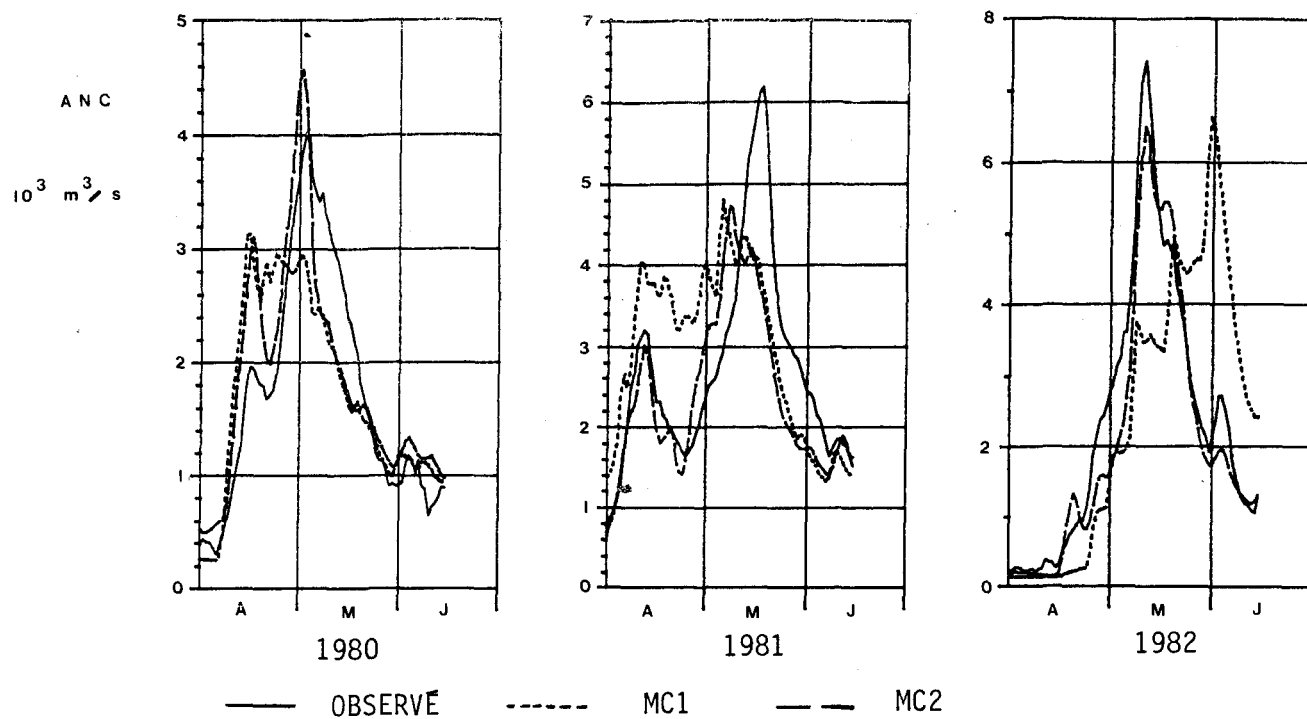
Pour $N = 144$ et un niveau de confiance à 5% ($p = 0.05$), on obtient une valeur de $W_p = 4395$. La valeur de $T(+)$ obtenue a été de 8072. Ainsi, $T(+)$ > W_p et on doit rejeter H_0 . C'est donc dire que dans ces conditions, il y a une réduction significative des valeurs des résidus du modèle MC2 par rapport au modèle MC1.

Le test de Wilcoxon a été appliqué à l'ensemble des résidus journaliers des deux modèles pour la période de validation ($N = 1096$). En utilisant un niveau de confiance à 5%, on obtient une valeur de $T(+)$ de 442 004 et $W_p = 283\,337$. Les résidus du modèle MC2 demeurent inférieurs à ceux du modèle MC1. Bref, la fidélité du modèle MC2 à reproduire les apports non contrôlés journaliers et la stabilité avec laquelle il le fait en période de validation constituent de toute évidence des qualités recherchées pour un modèle déterministe utilisé dans un système de prévision hydrologique à court terme.

6.2 RÉSULTATS EN PÉRIODE DE CRUE

L'importance de la période de crue dans le cadre de la gestion des eaux du bassin hydrographique du lac St-Jean a été soulignée précédemment. Une évaluation particulière des performances des deux modèles a donc été effectuée spécialement pour cette période.

On peut visualiser à la figure 6.7 les hydrogrammes et les diagrammes de dispersion des deux modèles pour la période de crue printanière.



Note: Apports non contrôlés par périodes de 1/4 de mois (1980-1982)

FIGURE 6.7: Hydrogrammes et diagrammes de dispersion des deux modèles pour la période de crue (validation)

Les résultats proviennent des années de validation 1980, 1981 et 1982. D'une façon générale, le modèle MC1 est très infidèle au point de vue amplitude et synchronisation par rapport aux ruissellements observés. Le diagramme de dispersion du modèle MC1 est très révélateur à cet égard, surtout lorsqu'on le compare avec celui du modèle MC2. Toutefois, en analysant de façon détaillée les résultats du modèle MC2, on remarque une lacune. En effet, pour la seconde moitié du mois de mai 1980 et 1981, le modèle sous-estime les débits d'une façon systématique. L'examen des sorties détaillées indique effectivement qu'il n'y a plus de neige au sol et que tout porte à croire que le couvert de neige aurait fondu trop vite. Cette interprétation est plausible puisque pour les dates où le couvert de neige est disparu selon le modèle, on observe encore la présence de neige au sol au nord du bassin du lac St-Jean selon les relevés nivométriques disponibles. Le problème provient donc du fait que physiquement, le retrait du manteau nival s'effectue progressivement dans l'espace. Compte tenu que le modèle considère le bassin globalement et que la superficie du bassin est très grande, le modèle n'est pas capable de reproduire le processus correctement. Une solution serait de diviser le bassin en zone où le taux de fonte serait uniforme et où l'on tiendrait compte du décalage du retrait du manteau nival. Une méthode de calcul semblable est employée à l'intérieur du modèle SSARR (U.S. Army Corps of engineer, 1975) et du modèle UBC (Quick et Pipes, 1976). Toutefois, cette technique n'a pas été traitée dans les travaux de ce mémoire. Elle constitue cependant une avenue de solution intéressante.

Malgré tout, il existe une façon simple de compenser cet effet en mode de prévision. Il s'agit de tenir compte des valeurs observées des apports non contrôlés des derniers jours et de s'en servir pour corriger l'amplitude de l'erreur du modèle. Cet aspect est décrit plus en détails au chapitre 7.

À titre d'information, on fournit au tableau XVII les résultats des critères numériques obtenus des deux modèles pour la période de crue. Encore là, on ne saurait nier la supériorité des performances du modèle MC2 par rapport à celles de MC1. Plus particulièrement, les valeurs de CF obtenues en 1981 et 1982 avec le modèle MC1 doivent être considérées inacceptables.

TABLEAU XVII: Résultats numériques des deux modèles pour la période de crue								
Paramètres statistiques		CCR	F	S	CNA	CVCRU	CPCRU	CF
<u>Années de validation</u>								
1980	MC1	0.76	90	1.088	0.57	-0.00	0.24	0.91
	MC2	0.86	55	0.851	0.74	-0.03	0.22	0.67
1981	MC1	0.41	254	1.828	0.17	-0.04	0.33	1.46
	MC2	0.72	148	1.395	0.51	0.05	0.19	0.92
1982	MC1	0.35	626	2.870	0.12	-0.01	0.31	1.49
	MC2	0.96	59	0.881	0.92	0.04	0.18	0.47

En dernier lieu, il est bon de souligner que les améliorations apportées au modèle MC2 ont permis également de mieux représenter le départ de la crue. Le modèle MC1 avait tendance à changer brusquement de saison entre l'hiver et le printemps (voir figures 6.1, 6.3, 6.4 et 6.5). On remarque qu'avec MC2, le départ de la crue est plus doux et plus fidèle. Cette amélioration est principalement attribuable aux changements apportés au sous-modèle de fonte en ce qui concerne l'introduction d'atténuateurs de sensibilité (voir sous-section 5.2.1 et 5.2.2).

Au printemps, les gestionnaires sont très intéressés à connaître la date de départ de la crue car c'est le début d'un mode d'opération particulier où l'on veut s'assurer à la fois de remplir les réservoirs et d'éviter les inondations. Plus particulièrement, les gestionnaires du bassin du lac St-Jean définissent par convention que la crue est débutée lorsque les apports non contrôlés du bassin du lac St-Jean dépassent 780 mètres cubes par seconde. On peut considérer que la crue débute en moyenne à la mi-avril. Les années de validation constituent alors un échantillon intéressant où l'on retrouve un départ de crue hâtif (1981), moyen (1980) et tardif (1982). Dans les trois cas, le modèle MC2 s'en est très bien tiré.

Au bilan, si on considère les performances du modèle MC2 sur une base annuelle et en période de crue, il ne fait aucun doute qu'il est supérieur au modèle MC1. En conséquence, MC2 constitue un meilleur modèle hydrologique déterministe pouvant être employé actuellement dans le système de prévision hydrologique à court terme de l'Alcan.

CHAPITRE 7

SYSTÈME DE PRÉVISION BASÉ SUR L'UTILISATION D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE DÉTERMINISTE

La prévision hydrologique utilisée dans la gestion d'un système hydroélectrique peut se faire pour différentes périodes de temps et à partir de divers modèles mathématiques (Bisson et al., 1977; Bergström, 1978; Orwig et Fodrea, 1982).

Chez Alcan, la prévision hydrologique à court terme (1 semaine) est basée sur l'utilisation d'un modèle hydrologique déterministe qui permet de transformer pour chaque jour une série de données météorologiques en apports non contrôlés pour un bassin donné. Par contre, la prévision hydrologique à moyen terme (1 mois à 1 saison) est basée sur l'emploi d'un modèle hydrologique stochastique (régression linéaire) qui permet de prévoir un volume d'apport non contrôlé pour une période donnée à partir des conditions hydrométéorologiques antérieures (Thompstone et Bergeron, 1980b; Bouchard et Deslauriers, 1985).

Dans le cadre de ce mémoire, c'est le système de prévision hydrologique journalière à court terme basé sur l'emploi d'un modèle hydrologique déterministe qui a été considéré.

Le présent chapitre porte sur la description de ce système de prévision et sur l'évaluation de ses principaux éléments soit les prévisions météorologiques et la méthode de correction sur les résultats des prévisions.

7.1 DESCRIPTION DU SYSTÈME DE PRÉVISION

Tel que mentionné au chapitre 1, un système de prévision hydrologique journalière à court terme, qui sera appelé dorénavant système PREVIS, a été instauré en 1979 à l'Alcan (Thompstone et al, 1981; Bouchard et Salesse, 1982).

Essentiellement, le système PREVIS utilise un modèle hydrologique en mode de simulation pour l'obtention des prévisions. Une série de données historiques de température et de précipitation jusqu'au jour où s'effectue la prévision et des prévisions météorologiques pour les sept jours suivants servent d'entrée et permettent de faire rouler le modèle pour obtenir les apports non contrôlés en sortie.

Les données d'entrée nécessaires au fonctionnement du système PREVIS sont les paramètres calibrés du modèle hydrologique, les données hydrométéorologiques historiques et les prévisions météorologiques.

Les données hydrométéorologiques (apport non contrôlé, température minimale et maximale et précipitation liquide et solide pour chaque jour) doivent être disponibles jusqu'au jour précédent l'exécution. Elles proviennent directement du système d'information hydrométéorologique Alcan (Thompson et al, 1980) et sont disponibles pour chaque bassin versant (voir chapitre 2).

Pour le jour de l'exécution ainsi que les six jours suivants, on doit se procurer les données météorologiques sous forme de prévision pour poursuivre la simulation et ainsi calculer les prévisions hydrologiques. Ces données sont obtenues du Service de l'environnement atmosphérique (SEA) d'Environnement Canada par l'intermédiaire du bureau météorologique de la base des Forces canadiennes de Bagotville, pour les jours 1, 2, 3, 4 et 5 (on considère le jour 1 comme celui de l'exécution). Pour les jours 6 et 7 les prévisions météorologiques ne sont pas disponibles; les données météorologiques utilisées proviennent des moyennes à long terme. Le tableau XVIII résume l'origine et la nature des données des prévisions météorologiques. Une évaluation de la qualité des prévisions météorologiques est présentée à la section suivante.

À titre d'information, les prévisions météorologiques sont disponibles chaque jour à partir de 11 h 00 et permettent ainsi de fournir au gestionnaire les prévisions hydrologiques pour les sept prochains jours, à la fin de l'avant-midi du jour de l'exécution.

TABLEAU XVIII: Prévisions météorologiques pour les sept prochains jours		
Jour	Origine des prévisions	Nature des prévisions
1 et 2	Prévisions de 48 heures basées sur les cartes QPF/PQP* du Centre météorologique canadien	Prévisions quantitatives par période de 12 heures des températures et des précipitations totales et par période de 24 heures des températures pour la région Saguenay-Lac-St-Jean.
3, 4 et 5	Prévisions provenant des cartes synoptiques préparées par le bureau des prévisions du Québec	Prévisions basées sur les écarts de température et les probabilités de précipitation en relation avec les moyennes à long terme de la région
6 et 7	Banques des données historiques du SIH** Alcan	Moyenne à long terme par bassin

* QPF/PQP: Quantity Precipitation Forecast/Prévision des quantités de précipitation

** SIH : Système d'information hydrométéorologique

Les données de sortie couramment obtenues du système PREVIS sont contenues dans un rapport d'information quotidien qui se présente comme suit:

- 1) Conditions hydrométéorologiques journalières observées sur le bassin pour les sept jours précédents et statistiques (moyenne, % de la normale);
- 2) Apports non contrôlés simulés pour les sept derniers jours à partir de la météo observée et statistique comparative entre ceux observés et simulés;
- 3) Prévisions météorologiques journalières pour les sept prochains jours et statistiques;
- 4) Apports non contrôlés simulés à partir de la météo prévue appelés "prévision hydrologique brute";
- 5) Apports non contrôlés simulés à partir de la météo prévue et corrigés à partir de la différence moyenne entre les apports non contrôlés observés et simulés de la semaine précédente appelés "prévision hydrologique nette". En période de crue la correction s'effectue à partir de la différence moyenne des trois jours précédents à cause de la grande variabilité des ruissellements. Par exemple, si les apports non contrôlés simulés des trois derniers jours sont sous-estimés de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne par rapport à ceux observés, la correction consiste alors à ajouter aux apports non contrôlés prévus une valeur de $300 \text{ m}^3/\text{s}$.

Concernant le dernier item, il s'agit d'une procédure de correction des apports non contrôlés qui permet d'améliorer la qualité des prévisions hydrologiques (Thompstone et al., 1981). Une description plus détaillée et une évaluation de cette méthode de correction sont présentées à la section 7.3.

7.2 ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES PRÉVISIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Si on considère que l'on ne peut s'attendre à obtenir une meilleure qualité des sorties d'un modèle que celles des données d'entrée qu'on lui fournit, on réalise toute l'importance de la qualité des prévisions météorologiques pour un système de prévision tel PREVIS.

D'autres sources d'erreurs influençant les sorties du système de prévision ont été discutées aux chapitres précédents telles la précision des données météorologiques observées, l'adéquation du modèle hydrologique et les valeurs optimales des paramètres. Pour les prévisions météorologiques ce sont la représentativité spatio-temporelle et la variabilité de la précision qui constituent les principaux problèmes.

Les prévisions obtenues du bureau météorologique de Bagotville sont fournies une fois par jour et une seule donnée couvre l'ensemble du territoire (57,100 kilomètres carrés).

Par ailleurs, la précision de la prévision varie selon le patron météorologique, la situation géographique et la saison (Charba et Klein, 1980). Le contrôle de la qualité et de l'uniformité de la prévision est donc très difficile.

Dans le but de vérifier l'ampleur et la nature du problème de la qualité des prévisions météorologiques disponibles, une évaluation a été effectuée. C'est la première fois qu'on fait ce genre d'analyse pour les prévisions météorologiques de la région du bassin du lac St-Jean. Les données couvrent les années de validation soit 1980, 1981 et 1982. Elles sont disponibles en prévisions journalières de précipitation et de température (maximum et minimum) pour les jours 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 9 de chaque période de quart de mois telle que définie précédemment, du 1er janvier 1980 au 31 décembre 1982. À noter que ce sont les moyennes météorologiques à long terme qui sont utilisées au besoin pour les prévisions des jours 8 et 9. Pour la période testée, il y a 144 périodes pour un total de 1096 jours.

7.2.1 Prévision de la précipitation

Les prévisions de précipitation ont été évaluées selon deux volets:

- 1) la prévision de l'occurrence de l'événement (jour avec ou sans précipitation);
- 2) la précision de la quantité prévue.

La qualité de prévision de l'occurrence de l'événement de précipitation a été évaluée et les résultats sont montrés au tableau XIX. Il s'agit simplement du nombre de jours avec et sans précipitation correctement prédits sur le nombre total de jours (144) pour la période testée. Les résultats sont fournis en pourcentage pour les jours 1 à 7. On considère qu'il n'y a pas de précipitation si la valeur observée est inférieure à un (1) millimètre sur l'ensemble du bassin. On peut justifier ce seuil par la faible sensibilité du modèle à réagir à des précipitations inférieures au millimètre et au degré de précision des prévisions fournies par le bureau météorologique (au millimètre près). On peut voir que les jours avec ou sans précipitation sont prédits correctement trois fois sur quatre en moyenne pour les jours 1 et 2. Ces résultats sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par Pugsley (1977) mais s'expliquent en partie à cause de la grande superficie du bassin. Toutefois, on note une baisse importante de la qualité des prévisions pour les jours 3 à 7.

À titre d'information, les prévisions fournies pour les jours 3, 4 et 5 consistent en une anomalie de température et un ajustement de la probabilité de l'occurrence de la précipitation. Ils doivent être combinés aux valeurs des statistiques journalières des données

TABLEAU XIX: Précision de la prévision de l'événement de précipitation							
JOUR	1	2	3	4	5	6	7
BONNE PRÉ- VISION EN %	77	76	52	49	47	42	43

météorologiques à long terme du territoire considéré. Par exemple, si les prévisions fournies pour le jour 3 sont "-2/+20%", cela signifie d'une part que la température prévue sera de 2°C inférieure à la température moyenne pour cette journée et d'autre part qu'il faudra ajouter 20% à la probabilité d'occurrence de précipitation à long terme pour cette journée. Par exemple, si les statistiques à long terme indiquent qu'il y a 45% de probabilité qu'il pleuve pour le jour 3, en ajoutant 20%, on prévoit alors que la probabilité d'avoir de la pluie pour cette journée sera de 65%. Une fois la nouvelle probabilité de précipitation calculée, on utilise le seuil 50% pour déterminer si l'événement de précipitation se produira (plus grand ou égal à 50%) ou ne se produira pas (plus petit que 50%). Lorsqu'il y a événement de précipitation on utilise la hauteur moyenne à long terme des précipitations pour le jour concerné comme prévision. On considère uniquement la moyenne des jours avec précipitation. Pour les jours 6 et 7, on emploie directement les valeurs de précipitation et de température provenant des statistiques à long terme.

Suite aux résultats obtenus, une recherche plus approfondie sur les données utilisées pour effectuer les prévisions a révélé certains faits. D'une part, les probabilités journalières d'occurrence de précipitation à long terme sur l'ensemble du bassin du lac St-Jean se sont avérées très fortes. Selon les données historiques des 30 dernières années, on estime la moyenne à environ 75% pour l'ensemble des jours de l'année, c'est à dire qu'il y a environ 3 chances sur 4 qu'on observe quotidiennement de la précipitation à un endroit quelconque sur le bassin. C'est l'immensité de la superficie qui explique ces valeurs élevées de probabilité d'occurrence de précipitation. À titre d'information, la probabilité d'occurrence de précipitation à un endroit localisé, comme la station météorologique de Roberval par exemple, est beaucoup plus faible. Elle est de l'ordre de 45%.

D'autre part, les ajustements de probabilité fournis par le bureau météorologique régional varient seulement entre 0 et $\pm 35\%$ dans plus de 98% des cas pour les données considérées. C'est donc dire que pour les jours où la probabilité d'occurrence de précipitation est élevée, disons 85%, les ajustements de probabilité prévus n'ont pratiquement aucun effet. Pour ces conditions, le système d'interprétation expliqué précédemment nous amène toujours à conclure qu'il y aura de la précipitation. Ceci entraîne un biais dans les prévisions et en diminue la qualité.

Des essais ont donc été effectuées pour améliorer la qualité des prévisions. Les mêmes valeurs d'ajustement de probabilité ont été conservées mais l'on a fait varier systématiquement la probabilité journalière de l'occurrence de la précipitation à chaque essai. C'est en fixant celle-ci à une valeur de 50% en tout temps que de meilleurs résultats ont été obtenus. La qualité des prévisions a augmenté de l'ordre de 15%. Les résultats sont présentés au tableau XX. À noter que pour les jours 3, 4 et 5, les résultats obtenus sont supérieurs d'environ 5% à ceux de Pugsley (1977).

Des essais ont également été effectués pour améliorer les prévisions des jours 6 et 7. Dans ce cas, la méthode retenue a consisté à soustraire une constante à la valeur de la probabilité journalière de l'occurrence de la précipitation provenant des statistiques historiques. En diminuant celle-ci de 25%, la qualité des prévisions a été augmentée d'environ 10%. On peut expliquer cette situation d'après la valeur élevée des probabilités journalières de l'occurrence de la précipitation et le seuil retenu comme critère de détermination de l'événement de précipitation. En effet, l'estimé de la hauteur des précipitations sur l'ensemble du bassin est souvent inférieur à un (1) millimètre à cause de la méthode de calcul et la grandeur du bassin. On estime qu'environ 50% des estimés de la hauteur des précipitations sont inférieurs ou égaux à un (1) millimètre pour le bassin du lac St-Jean. Il apparaît donc justifié

de recommander la méthode proposée pour augmenter la qualité des prévisions de l'événement de l'occurrence de la précipitation pour les jours 6 et 7 dans le contexte du système de prévision hydrologique à court terme considéré.

TABLEAU XX: Précision de la prévision de l'événement de précipitation après modification sur les valeurs de probabilité à long terme							
JOUR	1	2	3	4	5	6	7
BONNE PRÉ- VISION EN %	77	76	69	56	63	55	51

En second lieu, une évaluation de la précision des quantités prévues de précipitation a été effectuée. Les précipitations ont été divisées en trois classes:

Classe I : précipitation inférieure à 1 millimètre

Classe II : précipitation comprise entre 1 et 10 millimètres

Classe III: précipitation supérieure à 10 millimètres

Il s'agit de la valeur des précipitations journalières observées estimée pour l'ensemble du bassin considéré. Les classes de précipitation ont été déterminées à partir de changements de comportement du modèle soit en régime sec (classe I), en régime normal (classe II) et en régime d'averses intenses (classe III). Selon la valeur calculée du résidu (P observée - P prévue), on considère que la prévision est bonne lorsque:

Classe I : $0 < |\text{résidu}| < 1$ millimètre

Classe II : $0 < |\text{résidu}| < 2$ millimètres

Classe III: $0 < |\text{résidu}| < 4$ millimètres

Les valeurs des bornes supérieures ont été jugées des seuils relatifs acceptables en considération de l'erreur de la prévision, son influence dans le modèle et les besoins identifiés par les gestionnaires.

Les résultats de la précision des prévisions pour les jours 1 à 7 sont fournis en pourcentage pour chaque classe au tableau XXI. Mentionnons que, pour l'échantillon étudié (1980 à 1983), le nombre moyen de cas par classe ont été respectivement de 53%, 40% et 7% pour les classes I, II et III.

TABLEAU XXI: Précision des prévisions de quantité de précipitation en pourcentage							
JOUR	1	2	3	4	5	6	7
Classe I $P < 1\text{mm}$ ($0 < r < 1\text{mm}$)	85 (59)	86 (85)	21 (71)	18 (78)	28 (90)	12 (85)	14 (70)
Classe II $1 \leq P \leq 10\text{mm}$ ($0 < r < 2\text{mm}$)	61 (73)	49 (49)	66 (67)	62 (55)	69 (45)	75 (50)	66 (63)
Classe III $P > 10\text{mm}$ ($0 < r < 4\text{mm}$)	17 (12)	9 (10)	0 (6)	0 (11)	0 (9)	0 (9)	0 (11)

NOTE: Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de cas pour chaque jour dans chaque classe.

D'après les résultats du tableau XXI, on voit immédiatement que pour les jours 1 et 2, plus l'averse est importante, moins la précision de la quantité de précipitation prévue est bonne et cela même si la tolérance d'erreur a été augmentée à 4 millimètres pour des précipitations journalières supérieures à 10 millimètres. À noter que la probabilité d'occurrence d'une précipitation journalière supérieure à 10 millimètres est estimée à 7% pour le bassin du lac St-Jean (statistique basée sur les années 1954 @ 1984). Par ailleurs, on remarque que les meilleures quantités de précipitation prévues pour les jours 3 à 7 ont été obtenues dans la classe II. Ceci s'explique du fait que les hauteurs moyennes à long terme se situent exclusivement dans cette classe. Il faut malheureusement se rendre à l'évidence, que de façon générale, la précision des quantités de précipitation prévue est faible. Seules les prévisions de précipitation inférieures à 10 millimètres pour les jours 1 et 2 et celles autour des valeurs moyennes à long terme (1 à 10 millimètres) pour

les jours 3 à 7 peuvent être considérées comme acceptables pour la prévision hydrologique. Les résultats obtenus pour les prévisions météorologiques du bassin du lac St-Jean se comparent à ceux que l'on retrouve dans la littérature concernée (American Meteorological Society, 1973; Pugsley, 1977; Charba et Klein, 1980; Bosart, 1983).

7.2.2 Prévision de la température

La qualité de la précision des prévisions de température (maximale et minimale) pour les jours 1 à 7 a également été évaluée. Le tableau XXII montre les résultats obtenus lorsqu'une erreur plus petite ou égale à 2° C ou 3° C est tolérée. De façon générale, on remarque que la qualité de la prévision est décroissante au fur et à mesure que l'horizon de prévision augmente. De plus, on note que la prévision de la température maximale est meilleure que celle de la température minimale. On peut voir également que la précision des prévisions augmente de l'ordre de 15% si on accepte une erreur de 3° C plutôt que 2° C.

TABLEAU XXII: Précision des prévisions de la température en pourcentage							
JOUR	1	2	3	4	5	6	7
(erreur $\leq 2^{\circ}\text{C}$) température maximale	67	60	41	38	35	31	34
température minimale	53	40	39	26	31	30	32
JOUR	1	2	3	4	5	6	7
(erreur $\leq 3^{\circ}\text{C}$) température maximale	83	74	59	55	48	41	47
température minimale	67	57	53	38	44	39	47

Une prévision de température comprise à l'intérieur d'une erreur de 3° Celsius apparaît très acceptable compte tenu de la sensibilité du modèle aux variations de température. De plus, c'est la température maximale qui a le plus d'effet lorsqu'on calcule la fonte de la neige sans précipitation et c'est justement la variable qui est la mieux prédite. Dans ces conditions, on peut conclure que les prévisions de température disponibles pour le bassin du lac St-Jean sont acceptables pour fin d'utilisation d'un modèle déterministe dans un système de prévision hydrologique à court terme.

7.3 ÉVALUATION DE LA MÉTHODE DE CORRECTION SUR LES RÉSULTATS DES PRÉVISIONS

Une méthode de correction sur les résultats des prévisions basées sur la différence entre les apports non contrôlés simulés et observés de la semaine précédente a été expérimentée dans PREVIS en 1979 (Thompstone et al., 1981). Cette méthode avait pour objectif d'améliorer la qualité des prévisions hydrologiques en tenant compte de la disponibilité d'informations hydrologiques récentes soit la valeur des apports non contrôlés observés jusqu'au jour précédent l'exécution. Cette technique est particulièrement efficace lorsque le modèle a tendance à sous-estimer ou surestimer systématiquement les apports non contrôlés sur une longue période. Par exemple, si en milieu de décrue printanière, les apports non contrôlés simulés sont sous-estimés systématiquement de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ depuis plusieurs jours, il est fort probable que les apports non contrôlés prévus le seront aussi. En appliquant la méthode de correction décrite, on se trouve indirectement à effectuer un genre de mise à jour du modèle et les prévisions dans ce cas en sont grandement améliorées.

De plus, la méthode de correction peut être considérée comme transparente si les apports non contrôlés observés et simulés sont semblables car dans ces conditions la correction est sans effet.

Comme des améliorations importantes ont été apportées à MC1, une évaluation de la méthode de correction appliquée aux sorties des prévisions

de MC2 a été effectuée. Le tableau XXIII fournit les résultats obtenus avec les sorties de MC2 corrigées pour les années de validation. On peut voir d'abord pour MC2, les statistiques obtenues avec les prévisions "brutes" résultant de l'emploi des prévisions météorologiques, pour 1980, 1981 et 1982. Ensuite, on peut voir les résultats de MC2 (C), soit les sorties de MC2 corrigées à partir de la différence moyenne entre les apports non contrôlés simulés et observés des apports non contrôlés de la semaine précédente (correction sur la moyenne des trois derniers jours en période de crue). On note une amélioration des résultats de la valeur de S de l'ordre de 6%, 11% et 2% respectivement pour les années 1980, 1981 et 1982. On enregistre un gain sensible sauf pour 1982. Un examen détaillé de l'effet de la correction indique que la méthode tend généralement à améliorer les prévisions mais qu'à l'occasion elle joue le rôle inverse. Le principe de la correction des prévisions basées sur la différence moyenne entre les apports non contrôlés simulés et observés de la semaine précédente s'est avéré très influent sur les valeurs "nettes" prévues. Cela est très bon pour les prévisions lorsque le modèle est en défaut, mais lorsqu'il est très fiable, tel qu'en 1982, les prévisions des grandes variations hydrométéorologiques (averses extrêmes par exemple) sont plus souvent qu'autrement désavantagées par la méthode.

En se basant sur ces considérations, l'idée est venue d'effectuer une correction moins contraignante en se basant uniquement sur la différence entre la valeur simulée et observée des apports non contrôlés du jour précédant l'exécution. Autrement dit, cela revient à superposer la dernière

TABLEAU XXIII		Résultats numériques pour le modèle MC2 sans et avec corrections basées sur les apports non contrôlés observés.							
Année de validation		CCR	F	S	CNA	CV	CVCRU	CPCRU	CF
1980	MC2	0.88	145	0.630	0.77	0.02	0.00	0.21	0.67
	MC2(C)	0.89	129	0.594	0.80	0.02	0.01	0.21	0.65
	MC2(J)	0.90	116	0.564	0.82	0.02	0.02	0.22	0.64
1981	MC2	0.88	247	0.823	0.77	0.02	0.08	0.25	0.75
	MC2(C)	0.90	196	0.733	0.81	0.01	0.03	0.26	0.71
	MC2(J)	0.90	199	0.738	0.81	0.01	0.04	0.25	0.70
1982	MC2	0.95	121	0.576	0.90	0.02	0.04	0.20	0.52
	MC2(C)	0.95	117	0.566	0.91	0.01	0.01	0.19	0.48
	MC2(J)	0.96	94	0.507	0.93	0.00	0.01	0.18	0.44

NOTE: MC2 : statistiques pour MC2 sans correction ou lissage

MC2(C): statistiques pour MC2 avec corrections basées sur les apports non contrôlés de la semaine précédente

MC2(J): statistiques pour MC2 avec corrections basées sur les apports non contrôlés du jour précédent

Les autres symboles sont définis en annexe 2.

valeur prédite à celle observée. De cette façon on corrige la différence d'amplitude mais en conservant la variation du taux et la synchronisation des ruissellements prévus. Cette méthode de correction offre plus de souplesse aux éventuelles variations subites d'apports. Les résultats ainsi obtenus sont présentés également au tableau XXIII aux lignes identifiées

MC2(J). Les améliorations des résultats sont uniformes (de l'ordre de 11% pour la valeur de S pour les trois années) et généralement supérieurs à ceux obtenus avec MC2(C).

Pour ces motifs, l'emploi du modèle MC2 avec la correction des prévisions "brutes" basée sur la différence entre la valeur simulée et observée des apports non contrôlés du jour précédant l'exécution est recommandé pour le système de prévision hydrologique à court terme de l'Alcan.

Mentionnons toutefois qu'il existe d'autres possibilités pour traiter les sorties de prévisions hydrologiques provenant d'un modèle déterministe. L'une d'elle, entre autres, consiste à utiliser un modèle stochastique pour prévoir les valeurs des résidus (Cavadias et Gupta, 1978; Lundberg, 1982). Selon Lundberg (1982), les prévisions à court terme résultant d'un modèle déterministe peuvent être considérablement améliorées si l'on applique un modèle autorégressif aux erreurs du modèle. D'autres recherches pourraient être orientées dans cette avenue.

CHAPITRE 8

COMPARAISON DES PRÉVISIONS HYDROLOGIQUES D'UN MODÈLE
DÉTERMINISTE ET D'UN MODÈLE STOCHASTIQUE

Le fait de comparer des prévisions hydrologiques basées sur l'emploi d'un modèle déterministe et d'un modèle stochastique soulève généralement l'intérêt des hydrologistes. Une telle comparaison a été faite, entre autres, dans les travaux de Thompstone (1983) pour les prévisions hydrologiques du bassin du lac St-Jean. Le modèle hydrologique stochastique qui a été recommandé à la suite de ces travaux était basé sur l'emploi d'une fonction de transfert avec bruit ("Transfer Function-Noise"). Celui-ci a été comparé au système PREVIS basé sur MC1. Les résultats obtenus par Thompstone (1983) ont démontré que l'erreur type d'estimation du modèle stochastique était inférieure à celle du modèle déterministe. Cette différence s'est avérée significative en se basant sur le test statistique de Wilcoxon.

Dans ce chapitre, on vise à effectuer une nouvelle comparaison entre le modèle stochastique recommandé mais cette fois avec la version améliorée du modèle déterministe MC1, soit MC2. On présente d'abord une description du modèle stochastique et on discute ensuite des résultats de la comparaison des prévisions provenant des deux modèles.

8.1 DESCRIPTION DU MODÈLE STOCHASTIQUE

Les modèles stochastiques sont de plus en plus utilisés en pratique pour la prévision hydrologique (Salas et al., 1980; Hipel et McLeod, 1985; Thompstone et al., 1985).

Plus particulièrement, les travaux de Thompstone (1983) avaient pour objectif de comparer plusieurs types de modèles stochastiques et c'est le modèle basé sur l'emploi d'une fonction de transfert avec bruit ("Transfer Function-Noise"), qui sera appelé dorénavant le modèle TFN, qui avait obtenu les meilleurs résultats.

Les détails du modèle TFN sont présentés dans les travaux de Thompstone (1983). Toutefois, nous présenterons ici brièvement la forme générale d'un modèle TFN ainsi que la version recommandée par Thompstone (1983).

La forme générale d'un modèle TFN peut s'écrire de la façon suivante:

$$y_t = f(\underline{k}, \underline{x}, t) + N_t \quad (8.1)$$

où t est le temps discrétisé; y_t la variable de la réponse; N_t est la composante stochastique du bruit qui peut être autocorrélée, et $f(\underline{k}, \underline{x}, t)$

est la composante dynamique de y_t . Le terme dynamique inclut un ensemble de paramètres k et un groupe de séries covariées x . Deux séries covariées de données d'entrée ont été utilisées dans le modèle TFN développé par Thompstone (1983). Il s'agit des données désaisonnalisées de pluie et de fonte de la neige. Les sorties du modèle ont été du type logarithmique désaisonnalisé. La forme du modèle était la suivante:

$$y_t = v_1(B) x_{t,1} + v_2(B) x_{t,2} + N_t \quad (8.2)$$

où y_t est la prévision d'apport non contrôlé transformée et désaisonnalisée au temps t ; $x_{t,1}$ et $x_{t,2}$; les séries de pluie et de fonte de la neige désaisonnalisées au temps t . Les fonctions de transfert $v_j(B)$, ont été identifiées comme étant:

$$v_j(B) = \frac{(\omega_{0,j} - \omega_{1,j}B)}{(1 - \delta_{1,j}B)} \quad j = 1,2 \quad (8.3)$$

où $\omega_{0,j}$, $\omega_{1,j}$ et $\delta_{1,j}$ sont les paramètres du modèle à être estimés des données et B un opérateur mathématique de type "back shift", soit par exemple $Bx_t = x_{t-1}$, $B^2x_t = x_{t-2}, \dots$. La composante stochastique de bruit a été identifiée à un processus autorégressif à moyenne mobile (ARMA) de la forme suivante:

$$N_t = \frac{(1 - \theta_1 B)}{(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)} a_t \quad (8.4)$$

où θ_1 est le paramètre de la moyenne mobile de premier ordre, ϕ_i est le i ème paramètre autorégressif et a_t est le bruit blanc (white noise) représenté par une variable indépendante de distribution normale avec moyenne nulle et de variance σ_a^2 . Les estimés des paramètres du modèle TFN sont fournis au tableau XXIV.

TABLEAU XXIV: Valeurs des paramètres du modèle hydrologique stochastique TFN				
<u>Fonction de transfert</u>				
Séries	j	$\delta_{1,j}$	$\omega_{0,j}$	$\omega_{1,j}$
Précipitation désaisonnalisée	1	0.6248	0.2326	-0.2690
Eau de fonte désaisonnalisée	2	0.5793	0.1023	-0.0460
<u>Composante du bruit</u>				
$\phi_1 = 1.3112$		$\phi_2 = -0.3817$	$\theta_1 = 0.7124$	

8.2 RÉSULTATS DE LA COMPARAISON

Dans ses travaux, Thompson (1983) avait comparé les prévisions des volumes d'apports non contrôlés par période de quart de mois obtenues avec le modèle TFN (modèle stochastique) et le système PREVIS basé sur l'emploi du modèle MC1 (modèle déterministe). La comparaison avait été réalisée avec les conditions météorologiques journalières observées pour une période d'un quart de mois tel que définit au chapitre précédent et non la météo prévue ce qui conférait un certain avantage à PREVIS (MC1). Dans cette section, on veut vérifier de quelle façon le système PREVIS (MC2) utilisant cette fois les prévisions météorologiques et non la météo observée se compare aux prévisions du modèle TFN. Mentionnons ici que le modèle stochastique ne tient pas compte des prévisions météorologiques ce qui le met dans une certaine mesure en situation potentiellement désavantageuse.

Le tableau XXV présente les résultats numériques de l'évaluation des prévisions des volumes d'apports non contrôlés par période de quart de mois pour le bassin du lac St-Jean provenant de:

- (1) PREVIS (MC1) : PREVIS basé sur MC1 recalibré et avec la météo observée pour les jours 1 à 7
- (2) TFN : le modèle de fonction de transfert recommandé par Thompson (1983)

(3) PREVIS (MC2) : PREVIS basé sur MC2 avec la météo prévue et avec la méthode de correction sur les résultats des prévisions basée sur la différence des apports non contrôlés simulés et observés pour le jour précédent. Dans le cas où la période d'un quart de mois dépassait 7 jours, on poursuivait les prévisions météo avec les moyennes à long terme.

La comparaison des deux systèmes de prévision a été effectuée pour les années de validation 1980 @ 1982. Rappelons que ces années n'ont pas été utilisées pour déterminer les valeurs des paramètres de chacun des modèles. Toutefois, la période 1980 à 1982, a été utilisée pour déterminer la nouvelle méthode de correction des prévisions hydrologiques de PREVIS (MC2) basée sur la différence des apports du jour précédent.

TABLEAU XXV Comparaison entre TFN, PREVIS (MC1) et PREVIS (MC2) pour la période de validation (1980-82)				
MODÈLE	CCR	F	S	CNA
(1) PREVIS (MC1)	0.79	139	0.982	0.63
(3) TFN	0.86	96	0.816	0.75
(3) PREVIS (MC2)	0.96	33	0.479	0.91

En premier lieu, on peut voir que les prévisions du modèle TFN sont meilleures que celles de PREVIS (MC1) d'après les critères numériques évalués. Ceci est en accord avec les résultats obtenus par Thompstone (1983). Toutefois, on remarque que les prévisions de PREVIS (MC2) sont supérieures à celles fournies par TFN, toujours selon les mêmes critères et dans les mêmes conditions. Plus particulièrement, on note une amélioration de 41% de l'erreur type d'estimation S pour le système de prévision recommandé, PREVIS (MC2) par rapport à TFN.

Il est important de signaler que la valeur de CNA obtenue avec PREVIS (MC2) a été de 0.91 ce qui est signe de prévisions fiables et de grande qualité. Les valeurs des prévisions par période de quart de mois pour chaque système de prévision sont fournies en annexe 4 pour la période de validation (1980 @ 1982).

En second lieu, afin de vérifier si la différence des prévisions de TFN et PREVIS (MC2) était significative statistiquement parlant, le test non paramétrique de Wilcoxon (voir chapitre 6) a été appliqué aux deux séries de résultats. La différence des erreurs des prévisions par période de quart de mois pour les années de validation (1980 à 1982) a été vérifiée à partir des hypothèses suivantes:

Ho : les résidus des prévisions hydrologiques de TFN, $E(X)$ sont du même ordre de grandeur que ceux de PREVIS (MC2), $E(Y)$, soit $E(X) = E(Y)$

H₁ : les résidus des prévisions hydrologiques de TFN sont plus grands que ceux de PREVIS (MC2), soit $E(X) > E(Y)$

Pour $N = 144$ et un niveau de confiance à 5% ($p = 0.05$), la valeur de W_p est de 4395. La valeur calculée de $T(+)$ a été de 5824. Ainsi la valeur de $T(+)$ est plus grande que celle de W_p et on doit rejeter Ho. Pour ces conditions, il y a donc une réduction significative des valeurs des résidus des prévisions avec PREVIS (MC2) par rapport à celles fournies par TFN.

En troisième lieu, une comparaison graphique des prévisions obtenues avec TFN et PREVIS (MC2) a été effectuée pour les années 1980, 1981 et 1982. On peut visualiser les résultats graphiques aux figures 8.1, 8.2 et 8.3 respectivement. On remarque la qualité des prévisions de PREVIS (MC2) aux dépens de celles de TFN particulièrement au début et pendant la période de crue. Il est important de rappeler qu'il s'agissait là de l'un des objectifs de ce travail que de répondre adéquatement aux besoins des gestionnaires pour cette période.

Mentionnons toutefois, qu'il y aurait lieu d'envisager le développement du modèle stochastique TFN afin qu'il puisse tenir compte des infor-

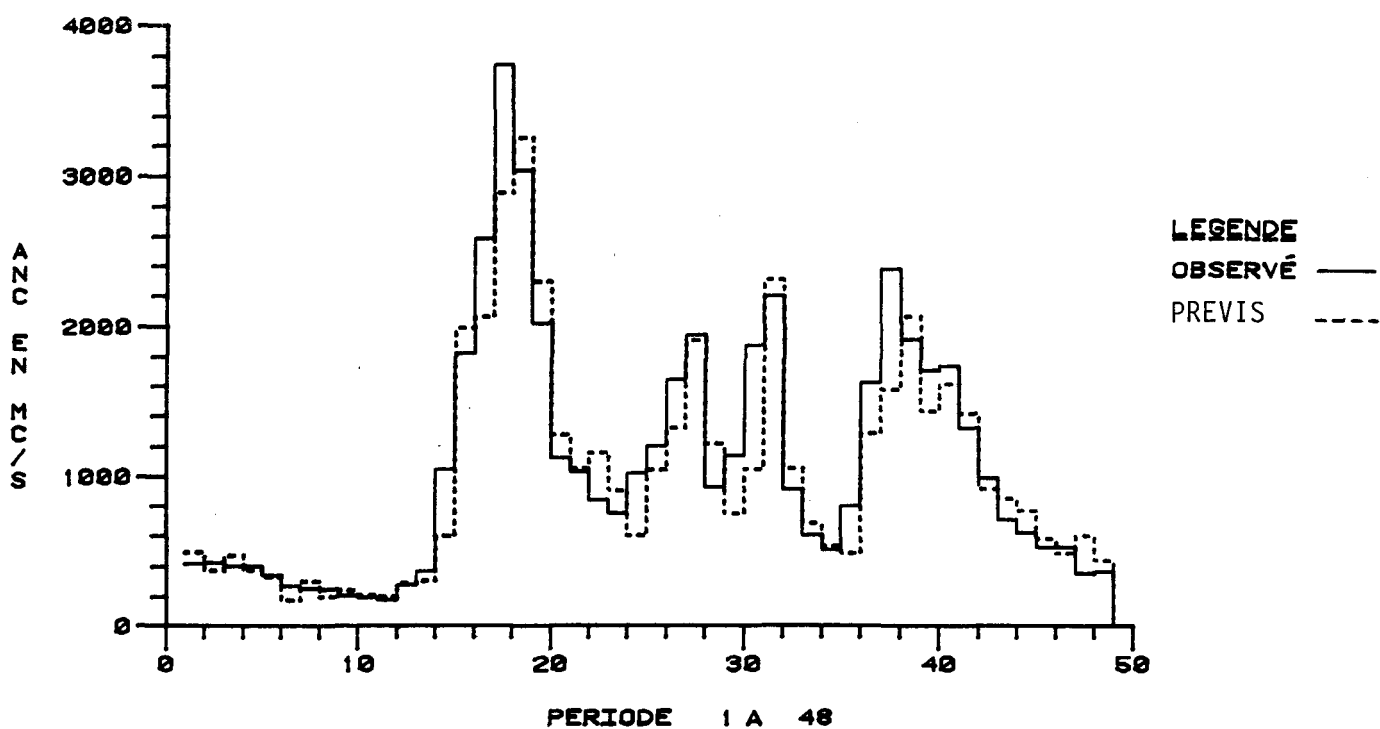
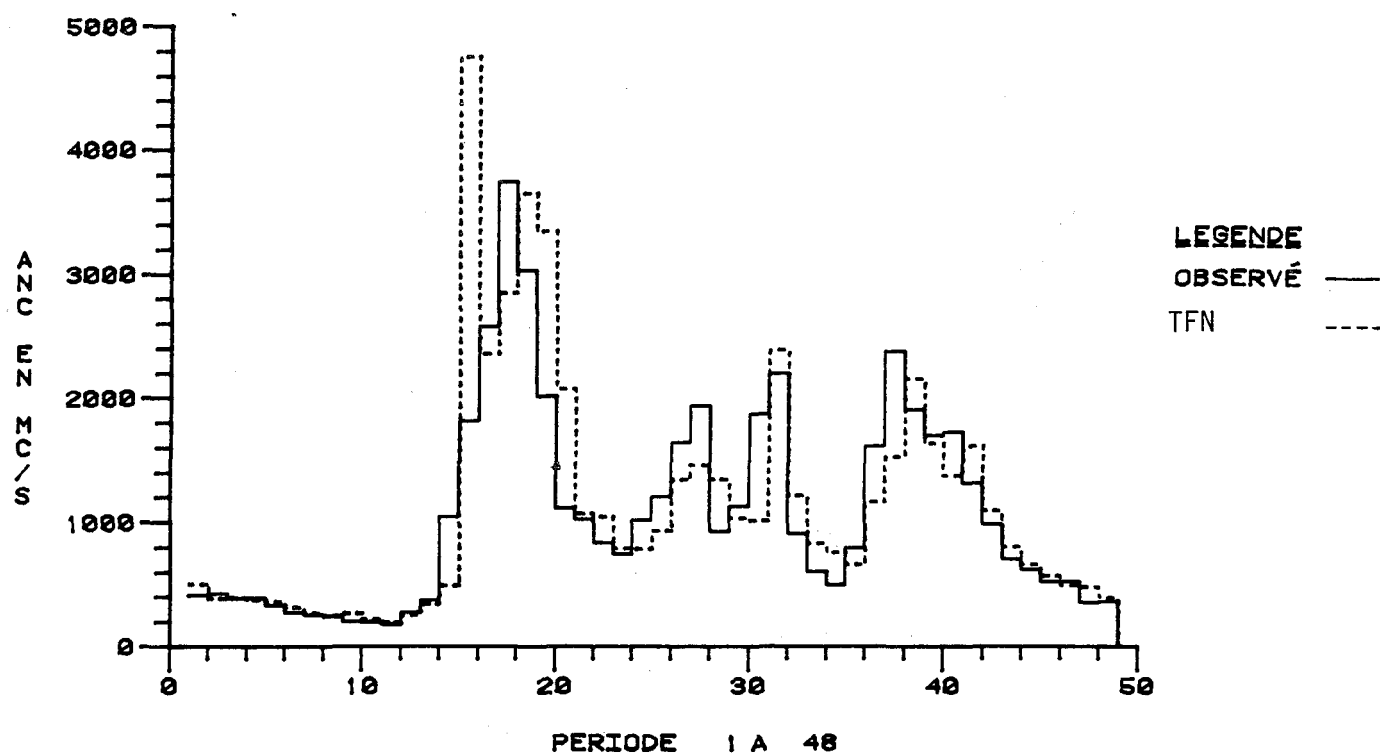


FIGURE 8.1: Prévisions des ruissellements avec TFN et PREVIS (MC2) pour 1980

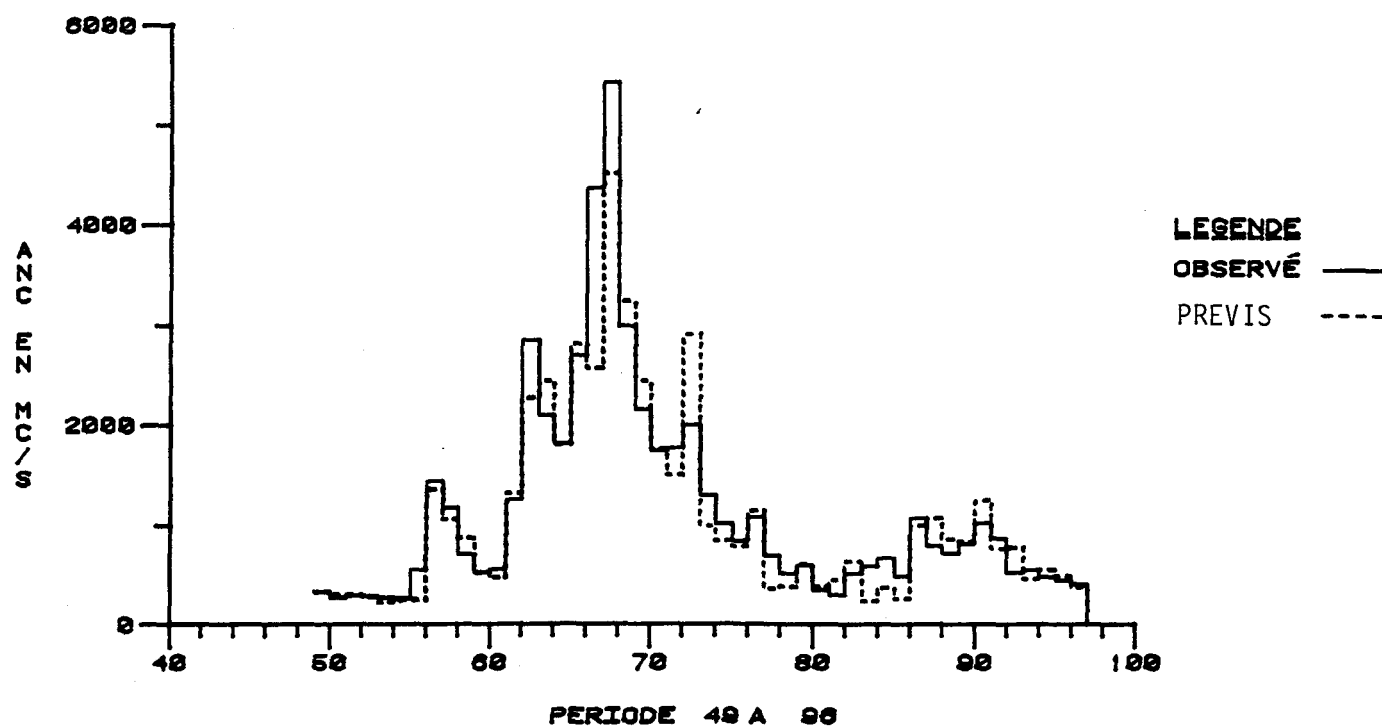
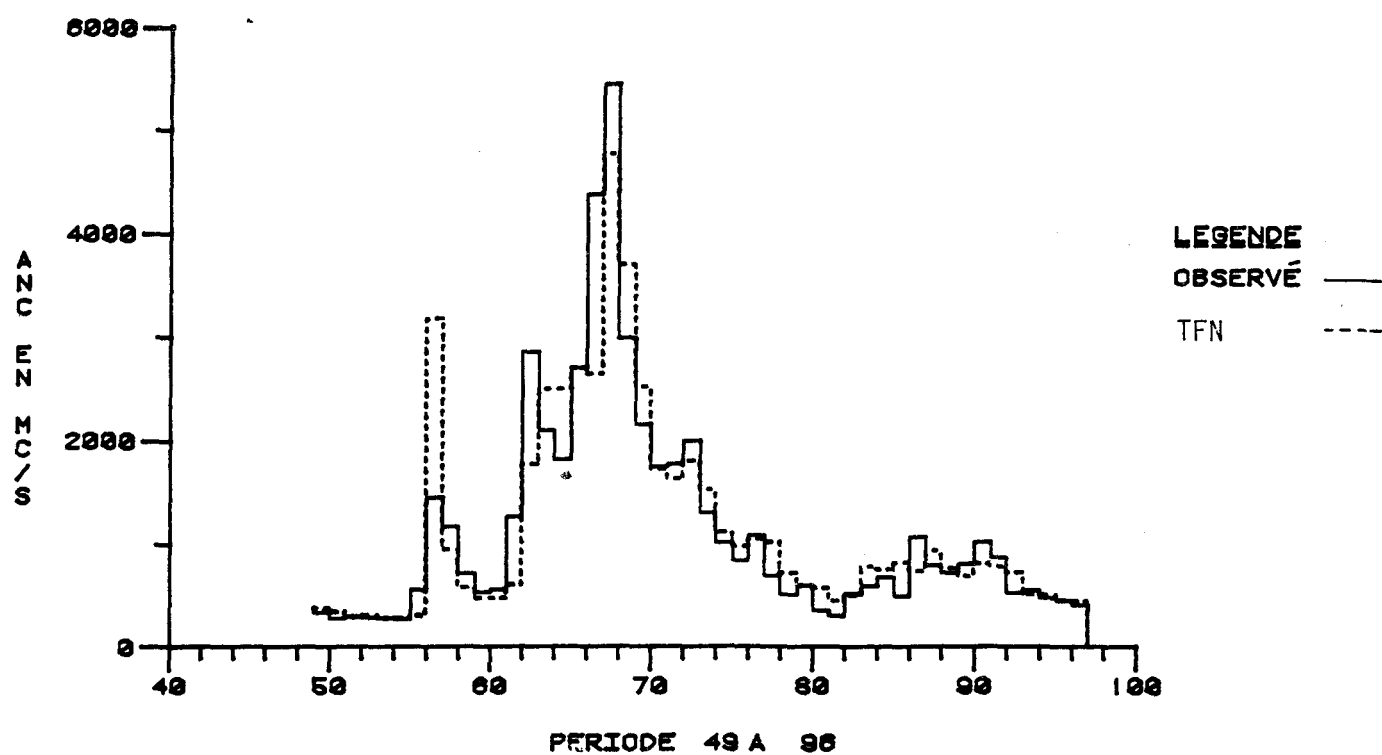


FIGURE 8.2: Prévisions des ruissellements avec TFN et PREVIS (MC2) pour 1981

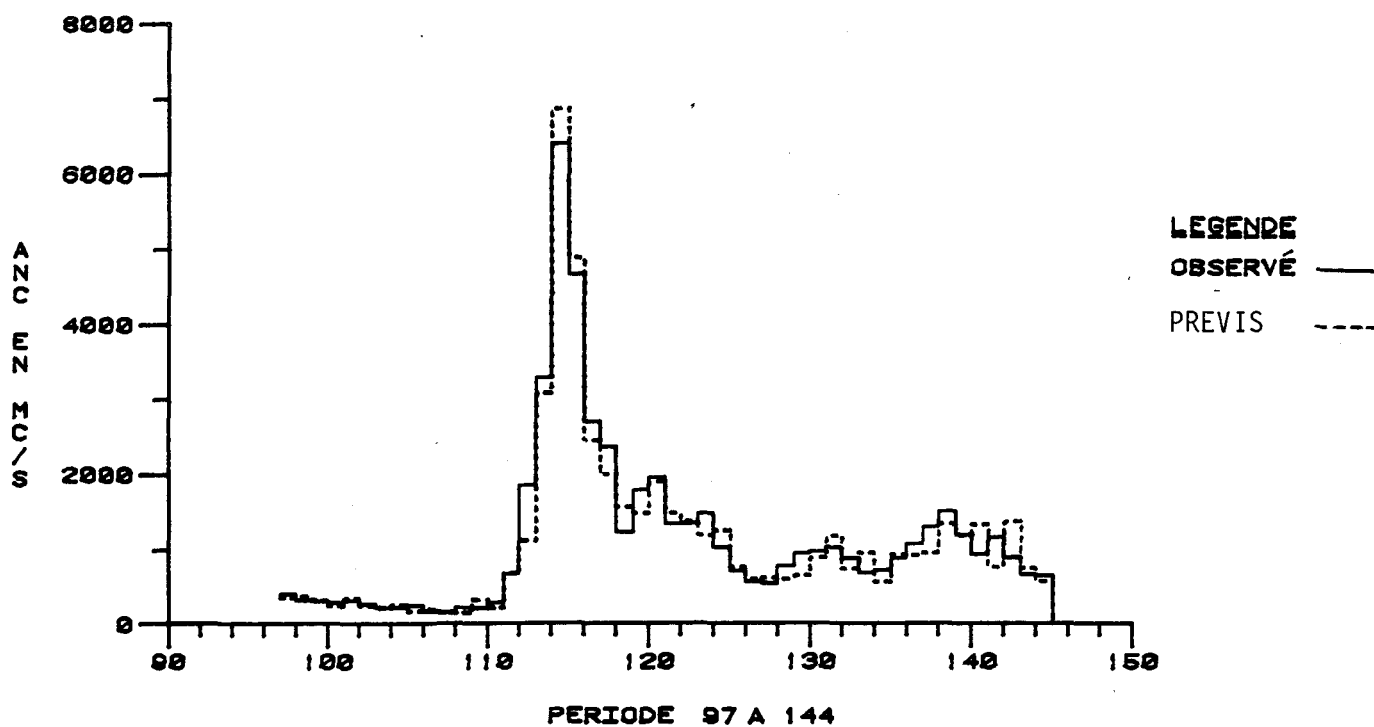
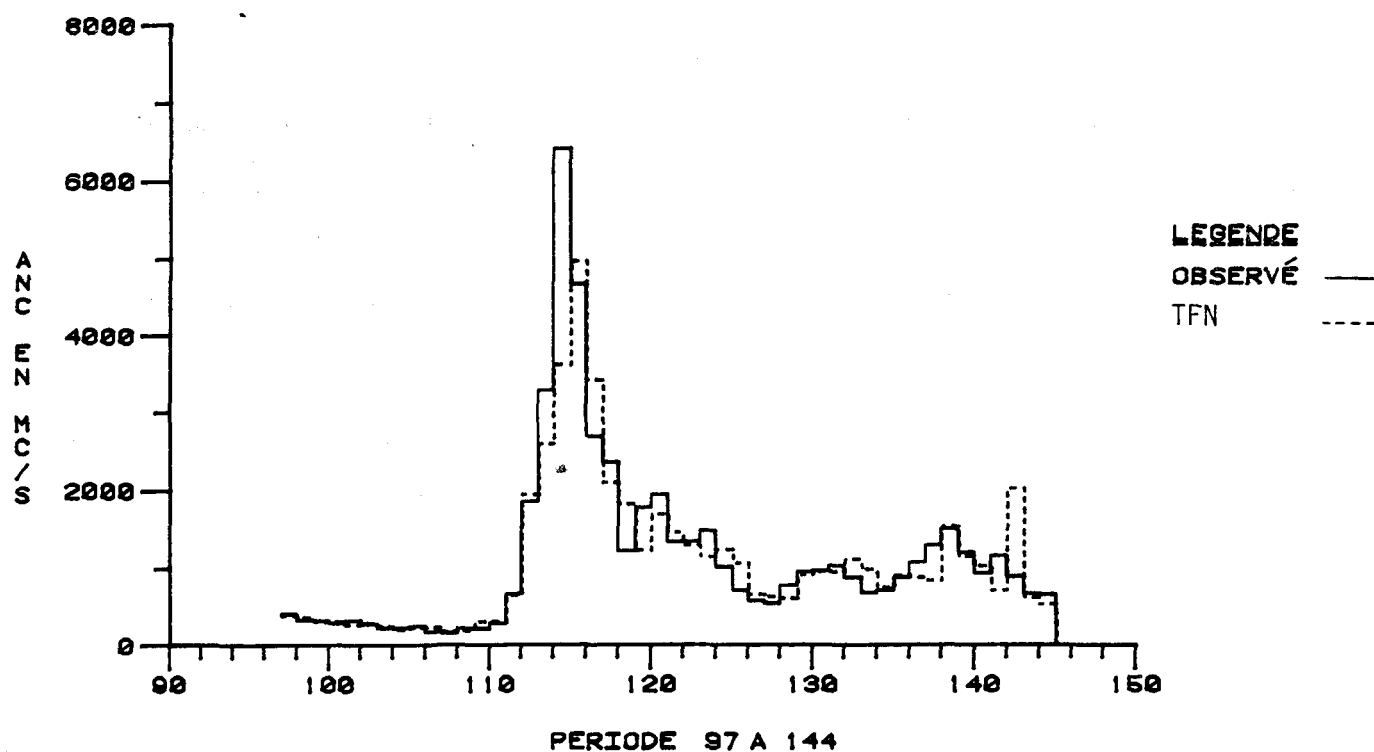


FIGURE 8.3: Prévisions des ruissellements avec TFN et PREVIS (MC2) pour 1982

mations contenues dans les prévisions météorologiques. Cela permettrait éventuellement de comparer les deux modèles avec plus d'objectivité.

Malgré tout, considérant les résultats obtenus dans cette comparaison, PREVIS (MC2) demeure le système de prévisions recommandé pour les prévisions hydrologiques à court terme du bassin du lac St-Jean. En outre, il permet de déterminer les volumes d'apports non contrôlés journaliers, ce qui n'est pas possible avec le modèle TFN.

Néanmoins, quoique les efforts déployés pour augmenter la qualité des prévisions aient permis d'atteindre un gain appréciable, il existe une autre possibilité d'améliorer encore les prévisions mais cette fois avec des travaux de moindre envergure. En effet, tel que démontré par Noakes (1984), le fait de combiner les prévisions du modèle stochastique TFN et du modèle déterministe MC1 a permis d'obtenir de meilleurs résultats que l'un ou l'autre des modèles. Il semblerait que les deux modèles puissent se compléter, l'un profitant d'un type d'information que l'autre ne pourrait exploiter à cause de leur structure différente. Compte tenu de ces considérations, il serait fortement indiqué de poursuivre les recherches dans cette direction. En remplaçant MC1 par MC2, on pourrait s'attendre à obtenir des résultats encore meilleurs.

CHAPITRE 9

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

9.1 CONCLUSION

Des améliorations apportées à un modèle hydrologique concernant la calibration de ses paramètres, ses composantes en vue d'une meilleure adéquation entre les ruissellements observés et simulés et les problèmes pratiques rencontrés en mode de prévision ont permis d'augmenter substantiellement la qualité des prévisions hydrologiques à court terme d'un système de prévision déjà existant.

Le bassin hydrographique considéré, soit celui du lac St-Jean, comportait une grande superficie, une grande variabilité hydrologique et une gestion complexe et exigeante des opérations des centrales et des réservoirs existants en période de crue printanière et automnale. Une attention particulière a été apportée à l'identification des besoins des gestionnaires et ils ont été considérés prioritairement pour le type d'améliorations à effectuer.

Parmi les contributions les plus importantes de cet ouvrage, mentionnons:

- 1) Nouvelle calibration basée sur trois années hydrométéorologiques caractérisées par un régime sec, normal et humide.

Ceci nous a permis de faire ressortir en plus de l'inadéquation du modèle original MC1, un grand nombre de problèmes pratiques.

- 2) Amélioration des composantes du modèle hydrologique et de son comportement en simulation et en prévision.

C'est en scindant le sous-modèle de fonte de neige (fonte due à la température et la pluie), en introduisant un réservoir d'écoulement intermédiaire, en incluant deux types de fonctions de transfert d'écoulement et en redéfinissant plus avantageusement le départ de l'année hydrologique (utilisation des données nivométriques du 1er mars) que les performances du nouveau modèle amélioré, MC2, se sont révélées graphiquement, numériquement et statistiquement meilleures que celles du modèle original. Au bilan, la complexité du modèle a été augmentée légèrement.

- 3) Évaluation systématique de la qualité des prévisions météorologiques journalières des jours 1 à 7 pour le territoire du lac St-Jean.

C'est la première fois qu'une telle évaluation était réalisée pour cette région. Une réorganisation de la méthode d'interprétation des données de prévision a permis d'améliorer la qualité des résultats de 15% pour les jours 3, 4 et 5 et de 10% pour les jours 6 et 7 dans le contexte d'utilisation du modèle.

- 4) Évaluation de la méthode de correction des résultats des prévisions hydrologiques basées sur les apports non contrôlés observés des jours précédents.

Les résultats obtenus ont conduit à l'introduction d'une technique plus simple et plus performante que la méthode de correction existante. Cela a permis l'obtention d'un gain supplémentaire de qualité des prévisions.

- 5) Comparaison des prévisions hydrologiques provenant d'un modèle déterministe et d'un modèle stochastique.

Les résultats obtenus, pour les conditions de prévision du bassin du lac St-Jean, ont démontré la supériorité des prévisions basées sur le modèle déterministe amélioré (mentionnons que le modèle stochastique ne tenait pas compte des informations avantageuses que constituent les prévisions météorologiques).

9.2 RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS

Les recommandations devant être apportées à un système de prévision hydrologique devraient considérer d'une façon prioritaire les particularités inhérentes au bassin hydrographique considéré tel l'aspect physique, les conditions hydrométéorologiques et les besoins des gestionnaires et des utilisateurs de la ressource.

La combinaison des prévisions de modèles hydrologiques de nature différente (par exemple déterministe et stochastique) est d'un grand intérêt pour poursuivre l'amélioration des résultats. Elle l'est d'autant plus si on considère qu'il semble exister un fort potentiel pour obtenir un gain de précision appréciable avec des travaux de beaucoup moindre envergure que ceux réalisés dans cette étude. De plus, il y aurait lieu de développer et d'évaluer le modèle stochastique TFN, afin qu'il puisse tenir compte de l'avantage potentiel que représentent les prévisions météorologiques.

En dernier lieu, il serait souhaitable d'examiner plus particulièrement pour le modèle MC2 l'effet d'une désagrégation spatiale simple dans le processus de fonte de la neige. Également, il faudrait évaluer la sensibilité des ruissellements simulés en regard de la représentativité des données météorologiques pour le bassin du lac St-Jean suite à la disponibilité future des données provenant des stations automatiques.

RÉFÉRENCES

AITKEN, A.P., (1973)

Assessing systematic errors in rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, vol. 20, p. 121 à 136.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY (1973)

Policy statement of the American Meteorological Society on Weather forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 54, no 1, p. 47 à 48.

AYOTTE, A., (1984)

Rationalisation du réseau météorologique utilisé par l'Alcan pour la gestion des ressources hydriques au Saguenay-Lac-St-Jean. *Le climat*, vol. II-I, Association de climatologie du Québec, p. 9 à 11.

BERGSTROM, S. (1978)

Operational Hydrological Forecasting by Conceptual Models in Sweden. *International Symposium on Logistics and Benefits of Using Mathematical Models of Hydrologic and Water Resource Systems*. Université de Pise, Italie, 24 au 26 octobre 1978, International Institute for Applied Systems Analysis. (Luxembourg), Pergamon Press, p. 61 à 74.

BISSON, J.L., R. BRISEBOIS, I. CORBU, F. ROBERGE et D. TRAN-THANH (1977)

Prévision des apports naturels et gestion de la rivière Gatineau en période de crue, comptes rendus du symposium canadien d'hydrologie: 77, Comité associé sur l'hydrologie, Conseil National de recherches, Canada, Edmonton, Alberta, août 1977, p. 167 à 176.

BOSART, L.F. (1983)

An update on trends in skill of daily forecasts of temperature and precipitation at the State University of New York at Albany. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 64, no 4, p. 346 à 354.

BOUCHARD, S. et M. DESLAURIERS (1985)

Système de prévisions hydrologiques utilisé pour la gestion du bassin hydrographique du lac St-Jean. Communication présentée au 53ième congrès de l'Association canadienne-française pour l'avancement des sciences, colloque sur la recherche en hydrologie au Québec, Université du Québec à Chicoutimi, Québec, mai 1985, p. 34 à 57.

BOUCHARD, S. et L. SALESSE (1982)

PREVIS: Système de prévision hydrologique journalière en temps réel utilisé dans la gestion à court terme du système hydroélectrique Alcan. Rapport 82-40, Groupe ressources hydrauliques, Énergie électrique, Québec, Société d'électrolyse et de Chimie Alcan Ltée, Jonquière, Québec, 132 pages.

BOUCHARD, S. et L. SALESSE (1983)

Description du modèle hydrologique MC1V2 utilisé dans le système de prévision hydrologique journalière en temps réel, PREVIS. Rapport 83-18, Groupe ressources hydrauliques, Énergie Électrique, Québec. Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée, Jonquière, Québec, 68 pages.

CAVADIAS, G.S. et S.K. GUPTA (1978)

Stochastic analysis of the residuals of a conceptual model. Proceedings of the International Symposium on Risk and Reliability in Water Resources, volume II, Université de Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, p. 536 à 555.

CHARBA, J.P. et W.H. KLEIN (1980)

Skill in precipitation forecasting in the National Weather Service. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 61, no 12, p. 1546 à 1555.

CHOW, V.T., (1964)

Handbook of applied hydrology, Éditions McGraw-Hill, New York.

CONOVER, W.J. (1971)

Practical Nonparametric Statistics. Editions John Wiley & sons, New York, États-Unis, 410 pages.

GAGNON, R., (1969)

Le Climat du Saguenay-Lac-St-Jean. Feuillelet météorologique, Vol. 8, no 2, Ministère des Richesses naturelles du Québec, p. 36 à 47.

GAREN, D.C. et S.J. BURGESS (1981)

Approximate errors bounds for simulated hydrographs. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 107, no HY11, p. 1519 à 1534.

GARIÉPY, J., (1978)

La classification des climats. Feuillelet météorologique, volume XVII, no 7, Ministère des Richesses naturelles du Québec, p. 125 à 133.

GIRARD, J. et G. PERRON (1980)

Manuel des caractéristiques physiques et hydrauliques en S. I. des installations hydroélectriques Alcan au Saguenay. Rapport 80-38, Groupe de la planification de la production, Énergie électrique, Québec, Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée, Jonquière, Québec.

GRAY, D.M., (1970)

Principes d'hydrologie. Comité national canadien de la décennie hydrologique internationale, Conseil national de la recherche du Canada, Ottawa.

GUPTA, V.K., (1982)

Calibration of conceptual rainfall-runoff models: problems caused by model structure. Thèse de maîtrise, Université de Case Western Reserve, 134 pages.

HAAN, C.T., JOHNSON, H.P. et D.L. BRAKENSIEK, (1982)

Hydrologic modelling of small watersheds. American Society of Agricultural Engineers, Michigan, 533 pages.

HIPEL, K.W., et A.I. MCLEOD (1985)

Time Series Modelling for Water Resources and Environmental Engineers. Elsevier, Amsterdam (en impression).

HOANG, V.D. et B. ROBERT (1981)

Prévision des apports hydriques au Lac Memphremagog. Revue canadienne de génie civil, vol.8, no 4, p. 433 à 441.

IBBITT, R.P. (1972)

Effects of random data errors on the parameter values for a conceptual model. Water Resources Research, vol. 8, no 1, p. 70 à 78.

IBBITT, R.P. et T. O'DONNELL (1971)

Fittings methods for conceptual catchment models. Journal of the Hydraulic Division, A.S.C.E., Volume 97, no. HY9, P. 1331 à 1342.

ISABEL, D., (1983)

Utilisation des méthodes numériques d'optimisation et d'analyse de sensibilité dans la calibration des modèles hydrologiques analytiques. Thèse de maîtrise, Institut national de la recherche scientifique (EAU), Québec, 154 pages.

JOHNSTON, P.R. et D.H. PILGRIM, (1976)

Parameter optimization for watershed models. Water Resources Research, vol. 12, no. 3, p. 477 à 486.

KITANIDIS, P.K. et L.B. BRAS (1980)

Real Time Forecasting with a Conceptual Hydrologic Model: (1) Analysis of Uncertainty. Water Resources Research, vol. 16, no 6, pages 1025 à 1033.

KITE, G.W., (1978)

Development of a Hydrologic Model for a Canadian Watershed. Revue Canadienne de génie civil, vol. 5, no. 1, p. 126 à 134.

KOREN, V.I. et L.S. KUCHMENT, (1971)

Physico-statistical model of rainfall flood formation and determination of its parameters. Publication no. 101, volume 2, A.I.S.H., Symposium sur les modèles mathématiques en hydrologie, Varsovie, p. 688 à 693.

LARSON, L.W. et E.L. PECK (1974)

Accuracy of precipitation measurements for hydrologic modeling. Water Resources Research, vol. 10, no 4, p. 857 à 863.

LASALLE, P. et G. TREMBLAY, (1978)

Dépôt meubles du Saguenay-Lac-St-Jean. Ministère des Richesses Naturelles, Direction générale de la recherche géologique et minérale, Rapport géologique no. 191, Québec, 61 pages.

LLAMAS, J. (1978)

Principes et applications de l'hydrologie paramétrique. Notes de cours GCE-78-01, Université Laval, faculté des sciences et de génie, Québec, 385 pages.

LUNDBERG, A. (1982)

Combination of a Conceptual Model and Autoregressive Error Model for improving Short Time Forecasting. Nordic Hydrology, vol. 13, no 4, p. 233 à 246.

MANLEY, R.E., (1978)

Calibration of hydrological model using technical optimization. Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E., vol. 104, no. HY2, p. 189 à 202.

MARIE VICTORIN, frère, (1964)

Flore laurentienne (revue et mise à jour par E. Rouleau). Les Presses de l'Université de Montréal, Montréal, 927 pages.

MCCUEN, R.H., (1973)

The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling. Journal of Hydrology, vol. 18, no. 1, p. 37 à 53.

NAEF, F., (1981)

Can we model the rainfall-runoff process today? Bulletin des sciences hydrologiques, vol. 26, no 3, p. 281 à 289.

NASH, J.E. et J.V. SUTCLIFFE, (1970)

River flow forecasting through conceptual models, part I. A discussion of principles. Journal of Hydrology, vol. 10, p. 282 à 290.

NOAKES, D.J. (1984)

Applied Time Series Modelling and Forecasting. Thèse de doctorat, Department of Systems Design Engineering, Université de Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 248 pages.

O'DONNELL, T. et P. CANEDO, (1980)

The reliability of conceptual basin model calibration. Publication no. 129, A.I.S.H., Symposium sur les prévisions hydrologiques, Oxford, 571 pages.

ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE, (1975)

Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting. Publication no. 429, WMO, Operational Hydrology, report no. 7, Genève, 172 pages.

ORWIG, C.E. et D.J. FODREA (1982)

Real-time operations in the Willamette river system using the SSARR model with meteorological uncertainty. Article paru dans "Experience in operation of hydrosystems", édité par T.E. Unny et E.A. McBean, Water Resources Publications, Colorado. U.S.A., p. 153 à 174.

PICKUP, G., (1977)

Testing the efficiency of algorithms and strategies for automatic calibration of rainfall-runoff models. Bulletin des sciences hydrologiques, vol. 22, no 2, p. 257 à 274.

PUGSLEY, W.I. (1977)

Meteorological support for flood forecasting in Canada: A case history for the Ottawa river. Communication présentée au Symposium canadien d'hydrologie: 77, Comité associé sur l'hydrologie, Conseil National de recherches, Canada, Edmonton, Alberta, août 1977.

PILON, P.J. et R.M. THOMPSTONE, (1979 a)

The average physiographic characteristics by watershed data bank. Rapport 79-09, Groupe de la recherche et du développement, Énergie électrique, Québec, Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée, Jonquière, 45 pages.

PILON, P.J. et R.M. THOMPSTONE (1979 b)

Alcan's physiographic characteristics data bank. Rapport 79-22, Groupe de la recherche et du développement, Énergie électrique, Québec, Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée, Jonquière, 115 pages.

QUICK, M.C. et A. PIPES, (1976)

A combined snowmelt and rainfall runoff model. Revue canadienne de génie civil, vol. 3, p. 449 à 460.

ROSENBROCK, H.H., (1960)

An automatic method for finding the greatest or least value of a function. Computer Journal, vol. 3, p. 303 à 307.

SALAS, J.D., DELLEUR, J.W., YEVJEVICH, V. et W.L. LANE (1980)

Applied Modelling of Hydrologic Time Series. Water Resources Publications, Littleton, Colorado.

SECAL (SOCIÉTÉ D'ÉLECTROLYSE ET DE CHIMIE ALCAN LTÉE), (1982)

Nouvelle technologie pour accroître la puissance générée par un système hydroélectrique complexe déjà existant. Rapport technique final du projet PAT, Énergie électrique, Québec, Jonquière, Québec, 333 pages.

- SNYDER, W.B. et J.B. STALL (1965)
Men, models, methods, and machines in hydrologic analysis. A.S.C.E., Journal of the Hydraulics Division, vol. 91, no HY2, p. 85.
- SOLOMON, S.I. et ASSOCIÉS Ltée (1974)
Preliminary analysis of potential remote sensing applications in hydrology. Rapport pour Environnement Canada.
- SOROOSHIAN, S. et J.A. DRACUP, (1980)
Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models: correlated and heteroscedastic error case. Water Resources Research, vol. 16, no. 2, p. 430 à 442.
- SOROOSHIAN, S., GUPTA, K.V. et J.L. FULTON, (1983)
Evaluation of maximum likelihood parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models: influence of calibration data variability and length on model credibility. Water Resources Research, vol. 19, no. 1, page 251 à 259.
- THOMPSTONE, R.M. (1983)
Topics in Hydrological Time Series Modelling. Thèse de doctorat. Department of Systems Design Engineering, Université de Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 227 pages.
- THOMPSTONE, R.M. et R. BERGERON, (1980a)
Spatial averaging of daily meteorological data. Practical results from a hydrometeorological information system. Quatrième colloque d'hydrotechnique de la région Atlantique de la S.C.G.C., Saint-Jean, Terre-Neuve.
- THOMPSTONE, R.M. et R. BERGERON, (1980b)
Prévision hydrologique interactive dans un système d'information hydrométéorologique. Compte rendu, Deuxième conférence hydrotechnique du Québec, Société Canadienne de Génie Civil, Sherbrooke, Québec, p. 322 à 337.
- THOMPSTONE, R.M., BOUCHARD, S., PILON, P.J. et R. BERGERON, (1981)
Real-time daily hydrological forecasting for a multi-reservoir hydroelectric system. Cinquième conférence nationale d'hydrotechnique de la S.C.G.C., Frédéricton, Nouveau-Brunswick, vol. 1, p. 37 à 57.
- THOMPSTONE, R.M., HIPEL, K.W. et A.I. McLEOD (1985)
Forecasting Quarter-monthly Riverflow. Water Resources Bulletin, 21 (5), 1985, p. 731 à 741.
- THOMPSTONE, R.M., POIRÉ, A. et A. VALLÉE, (1980)
A Hydrometeorological Information System for Water Resources Management. INFOR-Journal canadien de recherche opérationnelle et d'informatique, vol. 18, no 3, p. 258 à 274.

TROUTMAN, B.M. (1982)

An analysis of input errors in precipitation - runoff models using regression with errors in the independent variables. Water Resources Research, vol. 18, no 4, p. 947 à 964.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, (1956)

Snow Hydrology. U.S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division, Portland.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, (1960)

Runoff from Snomelt. U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Manual EM 1110-2-1406.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS*, (1975)

Program description and user manual for SSARR model streamflow synthesis and reservoir regulation. U.S. Army Corps of Engineers, Program-K5-GOOIO, Portland, Orégon, 202 pages.

U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, (1972)

National Weather Service River Forecasting System Forecast Procedures. NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-14, 151 pages.

VERREAULT, R., (1982)

Introduction à la météorologie. Note de cours 1PHY604, Université du Québec à Chicoutimi.

WEEKS, W.D. et R.H.B. HEBBERT, (1980)

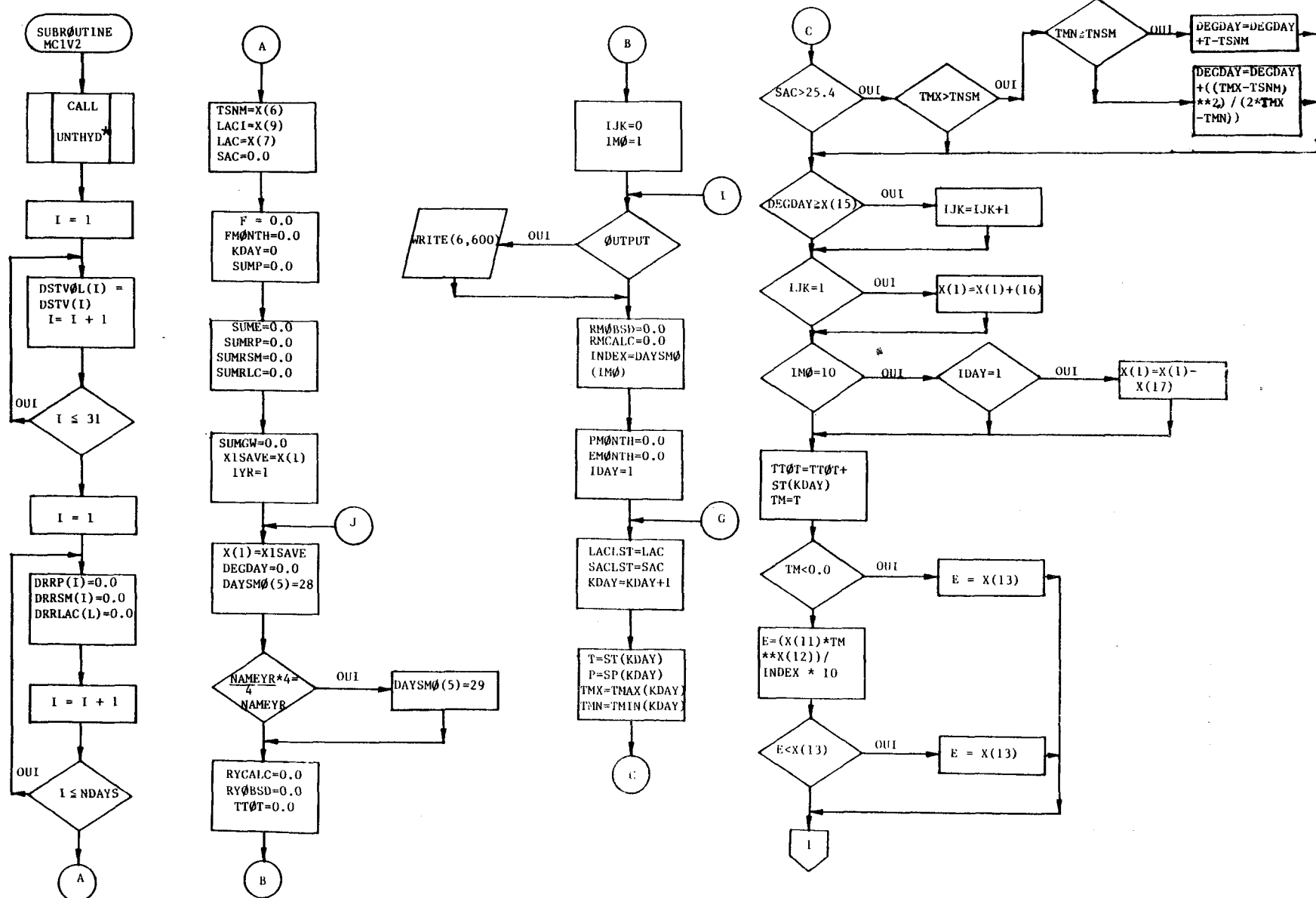
A comparison of rainfall-runoff models. Nordic hydrology, vol. 11, no 1, p. 7 à 24.

YEH, W.G., BECKER, L. et R.L. SOHN, (1978)

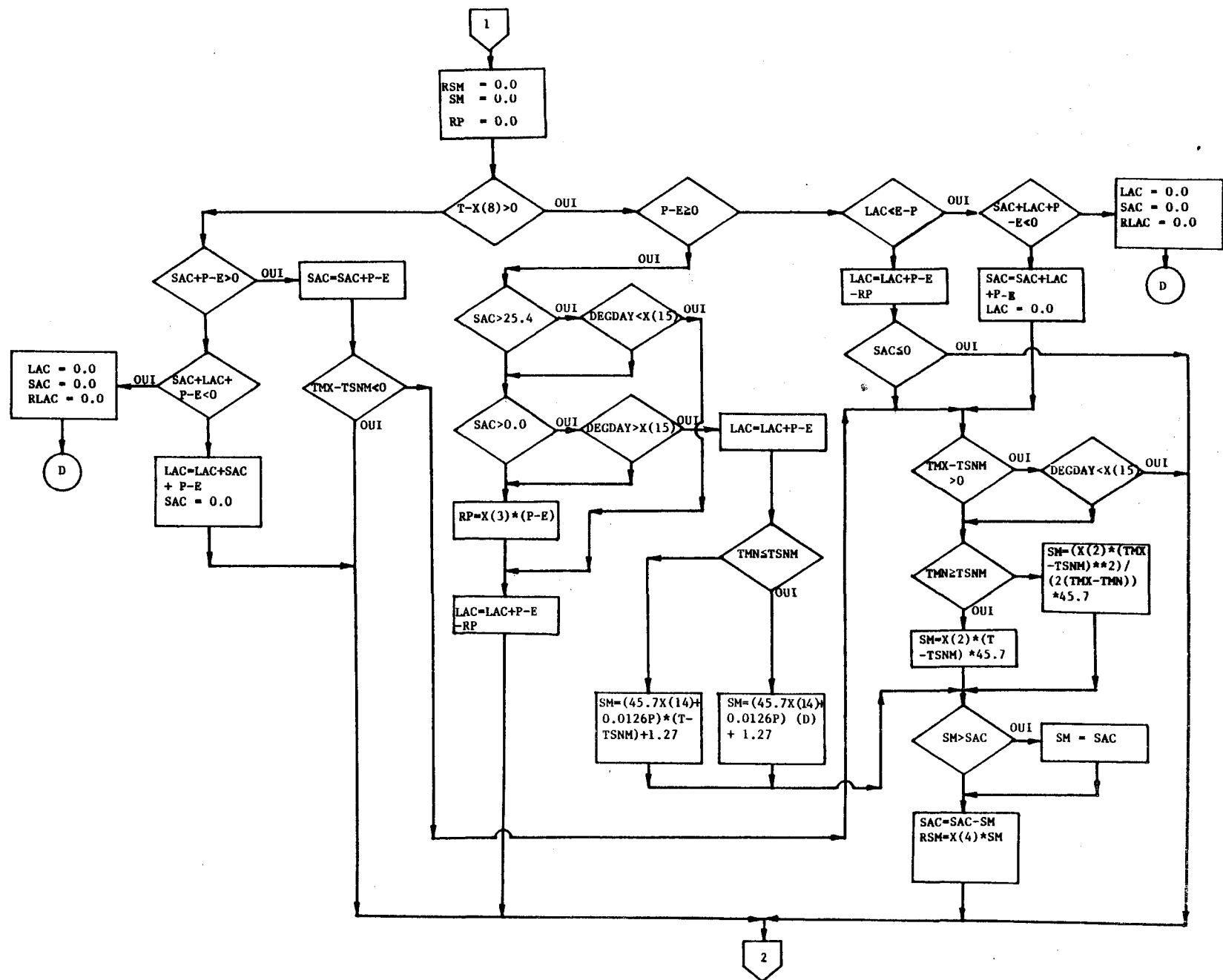
Information requirements for improving hydropower. Journal of the Water Resources Planning and Management Division, American Society of Civil Engineers, vol. 104, no WR1, Novembre, p. 139 à 156.

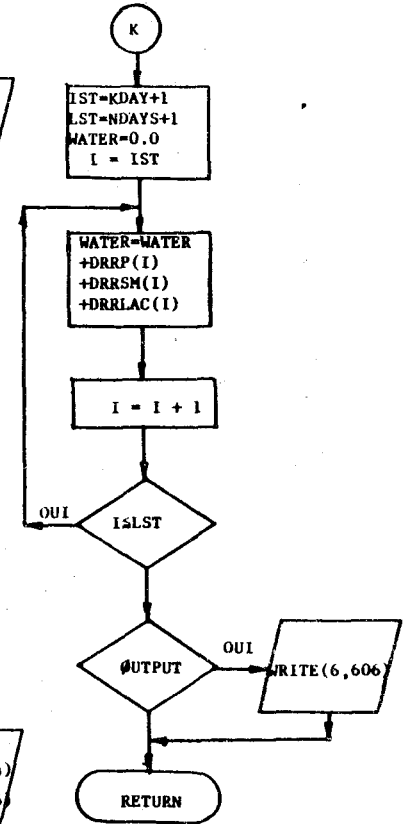
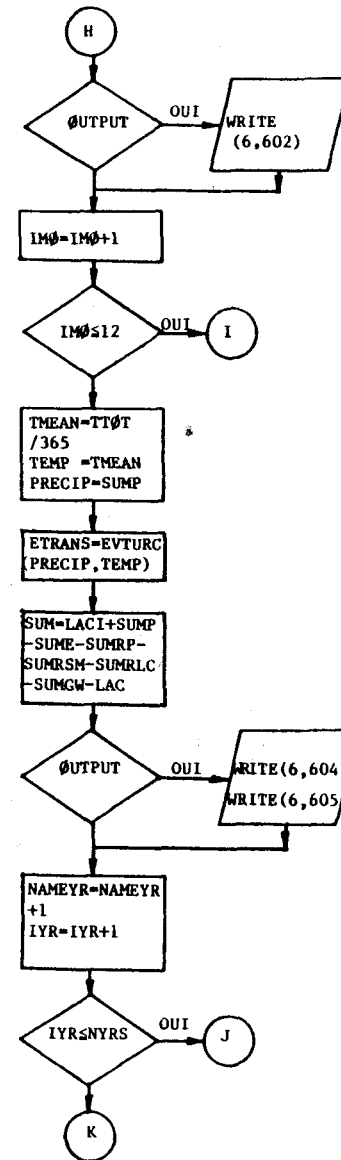
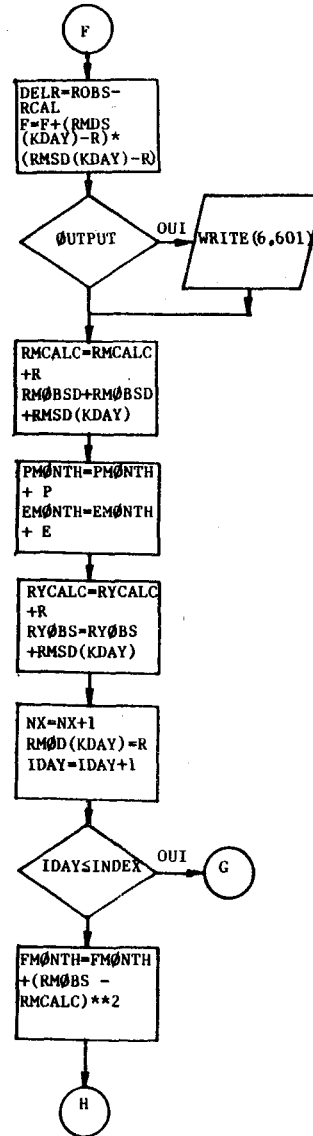
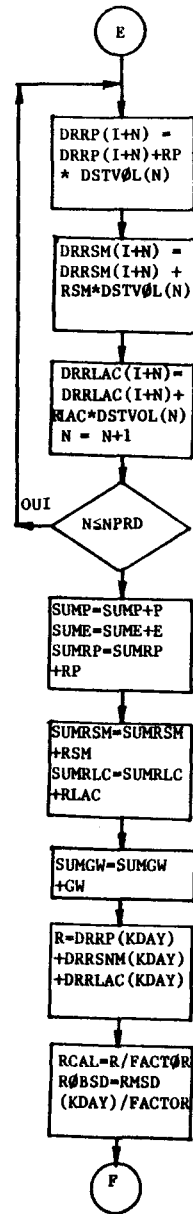
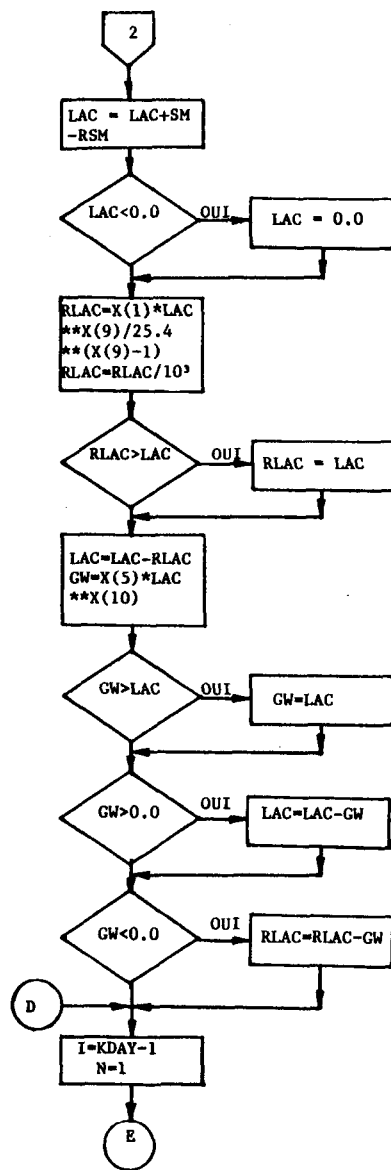
ANNEXE I

ORDINOGRAMME DÉTAILLÉ DU MODÈLE HYDROLOGIQUE MC1 ET LISTE DES VARIABLES



* UNTHYD est la sous-routine qui calcule les ordonnées et la durée de l'hydrogramme unitaire synthétique (type linéaire-exponentiel) à partir des paramètres X_{19} le débit maximal et X_{18} le temps de montée (Bouchard et Salesse, 1983)





LISTE DES VARIABLES DE MC1

ALPHA	paramètre du sous-programme UNTHYD
DAYSMO	longueur du mois en jours
DAYSyr	est égal à NDAYS
DEGDAY	valeur des degrés Celcius-jours cumulés
DELr	différence entre les apports non contrôlés observés et simulés
DRRLAC	ruissellement dQ à l'accumulation liquide ajusté d'après DSTVOL
DRRP	ruissellement dQ à la précipitation nette ajusté d'après DSTVOL
DRRSM	ruissellement dQ à la fonte de la neige ajusté d'après DSTVOL
DSTV	voir DSTVOL
DSTVOL	rapports de distribution des volumes journaliers de ruissellement provenant de UNTHYD
E	évapotranspiration calculée en mm sur l'aire du bassin pour un jour
EMONTH	évapotranspiration mensuelle calculée en mm à partir de E
ETRANS	évapotranspiration annuelle calculée à partir du sous-programme EVTURC
EVTURC	sous-programme qui calcule l'évapotranspiration annuelle avec l'équation de TURC
F	valeur de la fonction objective pour l'optimisation
FACTOR	facteur pour transformer les m ³ /s en mm/aire du bassin en km
FMONTH	valeur cumulée mensuelle de la fonction objective
GW	quantité d'eau provenant du ruissellement souterrain en mm
I	variable indicée pour DSTVOL
ID	vecteur contenant les dates pour la durée de la simulation
IDAY	variable indicée pour les jours
IDBV	identification du bassin versant considéré
IJK	variable indicée pour le changement du coefficient de ruissellement à chaque saison
IMO	variable indicée pour les mois
INDEX	voir DAYSMO
IST	dernier jour de la simulation +1
ITITLE	titre d'identification du bassin versant
IYR	variable indicée du nombre d'années
KDAY	variable indicée pour les jours
LAC	accumulation liquide du bassin en mm
LACI	valeur de l'accumulation liquide en mm du bassin versant au début de la simulation
LACLST	voir LAC
LST	NDAYS+1
N	variable indicée pour le nombre de périodes de UNTHYD
NAMEMO	nom du mois
NAMEYR	année de la simulation pour déterminer si c'est bisextile
NDAYS	nombre de jours pour la durée de la simulation
NN	nombre de jours avec les données d'apports non contrôlés
NPRD	nombre de périodes ou temps de base en jours
NVAR	nombre de paramètres dans le modèle
NX	variable indicée du nombre de jours
NY	nombre de jours avec des données météorologiques
NYRS	nombre d'années pour la durée de la simulation
OUTPUT	contrôle de l'impression des sorties vrai = impression
P	précipitation totale journalière en mm sur l'aire du bassin
PMONTH	précipitation totale mensuelle en mm

LISTE DES VARIABLES (SUITE)

PRECIP	précipitation annuelle en mm
R	ruissellement calculé par le modèle pour le bassin considéré en mm
RCAL	ruissellement total calculé par le modèle pour le bassin considéré en m ³ /s
RLAC	ruissellement dû à l'accumulation liquide en mm
RMCALC	valeur mensuelle des ruissellements calculés en mm/aire du bassin
RMOBSD	valeur mensuelle des apports non contrôlés observés en mm/aire du bassin
RMOD	vecteur des apports non contrôlés simulé par le modèle en mm/aire du bassin
RMSD	vecteur des apports non contrôlés journaliers observés en mm/aire du bassin
ROBS	vecteur des apports non contrôlés journaliers observés en m ³ /s
RP	ruissellement dû à la précipitation nette en mm
RSM	ruissellement dû à la fonte de la neige en mm
RYCALC	valeur annuelle cumulée des apports non contrôlés simulés en mm
RYOBSD	valeur annuelle cumulée des apports non contrôlés observés en mm
SAC	accumulation solide (neige au sol) en équivalent d'eau en mm sur l'aire du bassin
SACLST	voir SAC
SM	quantité d'eau résultant de la fonte de la neige en mm
SP	vecteur des précipitations totales journalières pour le bassin en mm
ST	vecteur des températures moyennes journalières pour le bassin en °C
SUM	bilan hydrologique sur l'ensemble des sources de ruissellement
SUME	sommation de l'évapotranspiration calculée
SUMGW	sommation de l'eau souterraine
SUMP	sommation de la précipitation totale
SUMRLC	sommation du ruissellement dû à l'accumulation liquide
SUMRP	sommation du ruissellement dû à la précipitation nette
SUMRSM	sommation du ruissellement dû à la fonte de la neige
T	température journalière moyenne en degré Celcius
TEMP	température moyenne annuelle en °C
TM	voir T
TMAX	vecteur des températures maximales journalières pour le bassin en °C
TMEAN	température moyenne annuelle en °C
TMIN	vecteur des températures minimales journalières pour le bassin en °C
TMN	température minimale pour un jour donné en °C
TMX	température maximale pour un jour donné en °C
TSNM	valeur de la température de base pour le cumul des degrés-jours
TTOT	valeur annuelle cumulée des températures moyennes journalières
UNTHYD	sous-programme de l'hydrogramme unitaire
WATER	quantité d'eau qui reste après le jour où la simulation est terminée
X	vecteur contenant les 19 paramètres du modèle hydrologique
X1SAVE	coefficient de ruissellement initial pour débiter la simulation

ANNEXE 2

DESCRIPTION DES CRITÈRES NUMÉRIQUES UTILISÉS DANS LA COMPARAISON DES RÉSULTATS

SYMBOLE	DÉFINITION	INTERPRÉTATION	ÉQUATION	UNITE
CCR	coefficient de correlation simple	CCR = 1 si les apports non contrôlés observés et simulés sont égaux	$CCR = \sqrt{\frac{1 - \frac{(N-1)}{(N-2)} \frac{\sum_{i=1}^N (QOBS_i - QSIM_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QOBS_i - \overline{QOBS})^2}}{1}}$	
F	fonction critère	Plus la valeur de F est petite, meilleurs sont les résultats.	$F = \frac{\sum_{i=1}^N (QOBS_i - QSIM_i)^2}{N}$	mm sur l'aire du bassin
S	erreur type d'estimation	Plus la valeur de S est petite, meilleurs sont les résultats	$S = \sqrt{\frac{F}{N}}$	mm sur l'aire du bassin
CNA	Critère de NASH: il mesure la qualité générale des résultats du modèle pour toute la période analysée	Pour une reproduction parfaite CNA = 1; la valeur de CNA diminue avec la qualité des résultats. Si CNA est plus petit que 0.60, il y a trop d'imprécision	$CNA = \frac{\sum_{i=1}^N (QOBS_i - \overline{QOBS})^2 - \sum_{i=1}^N (QOBS_i - QSIM_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QOBS_i - \overline{QOBS})^2}$	mm sur l'aire du bassin

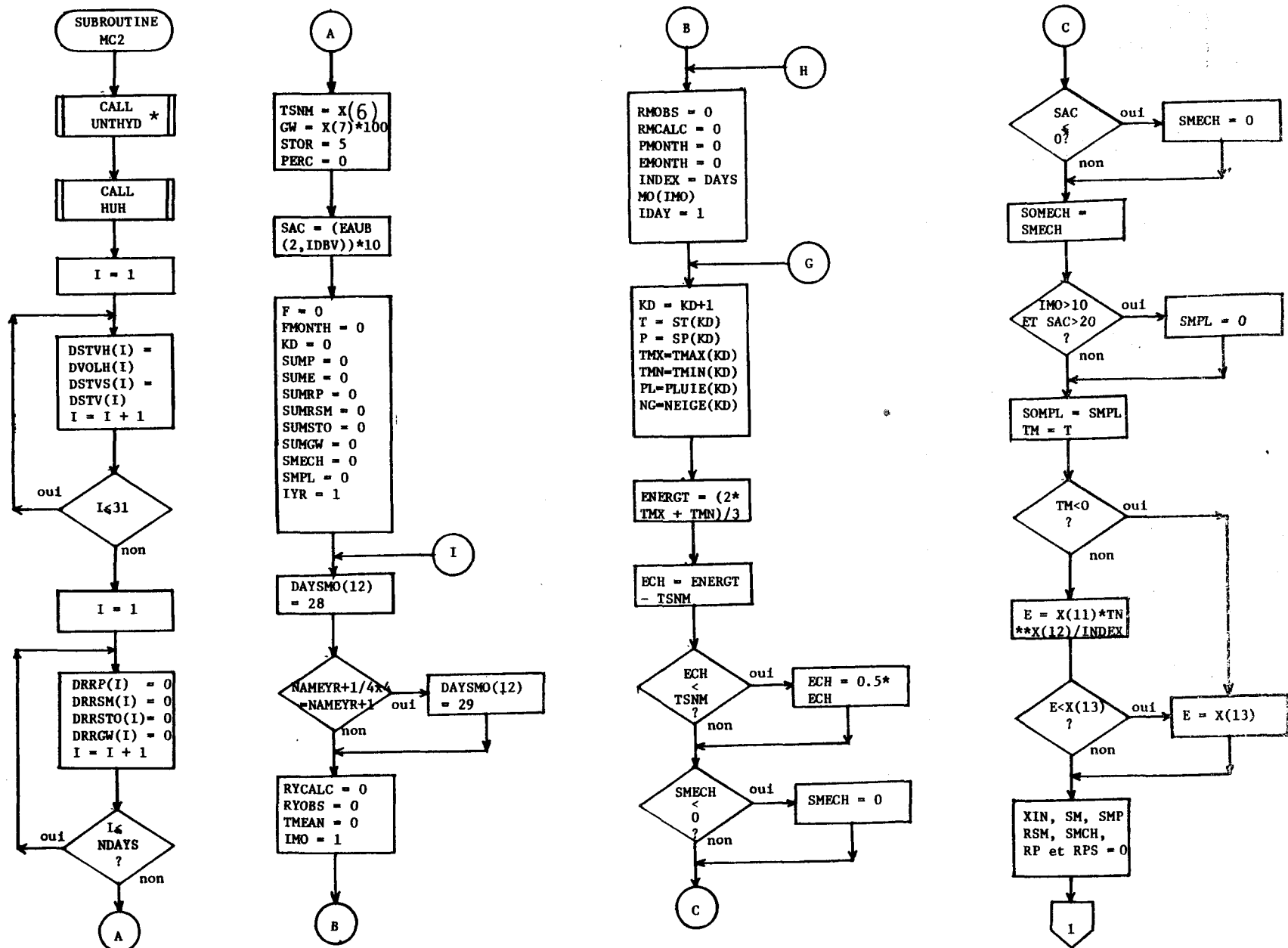
SYMBOLE	DÉFINITION	INTERPRÉTATION	ÉQUATION	UNITÉ
CV CVCRU	critère de volume: il mesure la qualité de la reproduction du bilan hydrologique pour l'année (CV) ou pour la crue printanière (CVCRU)	CV ou CVCRU = 0 si les ap- ports non contrôlés obser- vés et simulés sont égaux	$CV = \frac{\sum_{i=1}^N (QOBS_i - QSIM_i) \Delta T}{QOBS_{max} T}$ ou CVCRU	
CPCRU	critère de pointe: il mesure la qualité de la reproduction de de l'hydrogramme de crue printanière	CPCRU = 0 si les apports non contrôlés de pointe (supérieurs à 2000 m ³ /s pour le bassin étudié) observés et simulés sont égaux	$CPCRU = \frac{\left[\sum_{i=1}^P ((QOBS_i - QSIM_i)^2 * QOBS_i^2) \right]}{\left[\sum_{i=1}^P (QOBS_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$	mm sur l'aire du bassin
CF	critère final: il fournit une appréciation globale de la qualité du modèle	CF = 0 parfait 0 < CF < 0.5 excellent 0.5 < CF < 1,25 acceptable CF > 1,25 inacceptable	$CF = (1 - CNA) + (2 * CPCRU) + CV$	

où

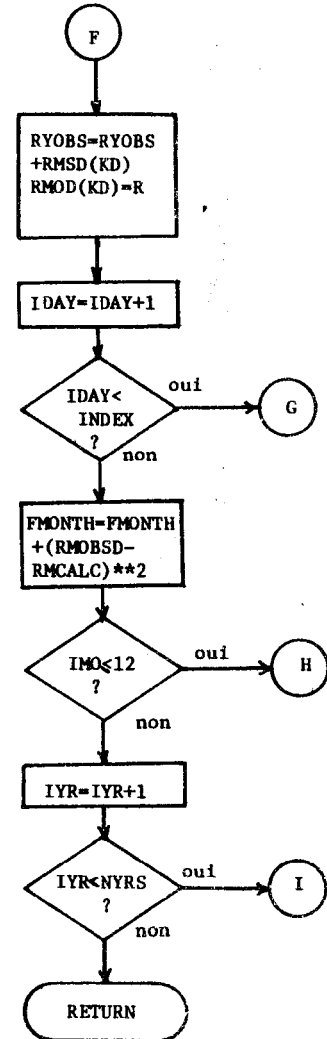
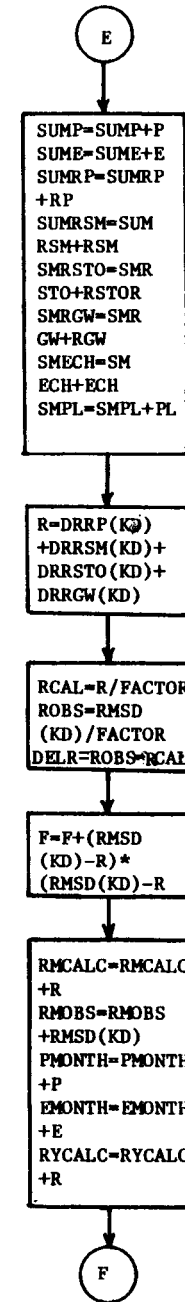
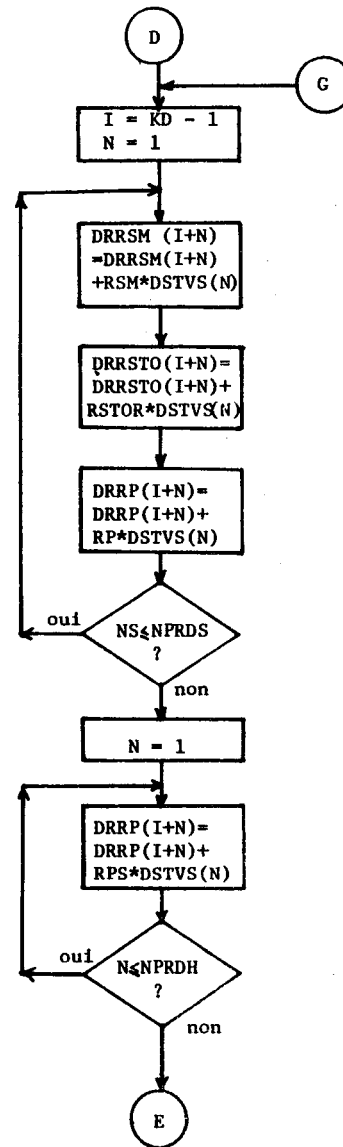
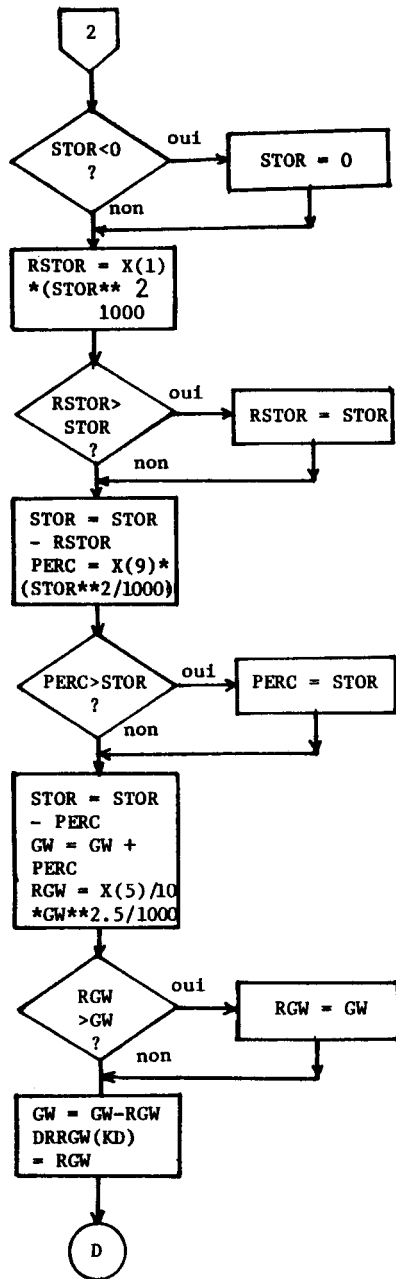
- N = nombre de jours pour la période évaluée
- QOBS = apports non contrôlés observés
- \overline{QOBS} = moyenne des apports non contrôlés observés pour la période
- QSIM = apports non contrôlés simulés par le modèle
- ΔT = intervalle de temps entre chaque lecture soit 1 jour
- T = durée de la période évaluée en jour
- P = nombre de jours où les apports non contrôlés sont supérieurs au seuil de pointe (fixé arbitrairement au tiers du débit de pointe moyen observé)

ANNEXE 3

ORDINOGRAMME DÉTAILLÉ DU MODÈLE HYDROLOGIQUE MC2



* UNTHYD est la sous-routine qui calcule les ordonnées et la durée de l'hydrogramme unitaire synthétique (type linéaire exponentiel) à partir des paramètres X_{19} le débit maximal et X_{18} le temps de montée (Bouchard et Salesse, 1983)



ANNEXE 4

**PRÉVISIONS HYDROLOGIQUES PAR PÉRIODE
DE ¼ DE MOIS POUR PREVIS (MC2)
ET TFN POUR LA PÉRIODE DU 1/01/80 AU 31/12/82**

FICHIER DES DONNEES HYDROMETEOROLOGIQUES HEBDOMADAIRES
DU SYSTEME DE PREVISION DU 1/1/80 AU 31/12/82 - BASSIN DU LAC ST-JEAN
APPORTS NON CONTROLES PAR PERIODE DE QUART DE MOIS EN m³/s

+	DATES	OBSERVE	TFN	PREVIS (MC2)
1	10180- 70180	419.	493.	492.
2	80180-150180	425.	378.	368.
3	160180-220180	393.	384.	472.
4	230180-310180	394.	369.	371.
5	10280- 70280	333.	348.	330.
6	80280-150280	267.	306.	172.
7	160280-220280	252.	260.	301.
8	230280-290280	245.	233.	193.
9	10380- 70380	199.	259.	237.
10	80380-150380	187.	211.	210.
11	160380-220380	173.	178.	194.
12	230380-310380	276.	239.	283.
13	10480- 70480	372.	329.	306.
14	80480-150480	1045.	481.	596.
15	160480-220480	1814.	4731.	1983.
16	230480-300480	2578.	2341.	2059.
17	10580- 70580	3739.	2836.	2878.
18	80580-150580	3026.	3637.	3249.
19	160580-220580	2010.	3327.	2296.
20	230580-310580	1111.	2065.	1273.
21	10680- 70680	1021.	1057.	1044.
22	80680-150680	832.	1030.	1152.
23	160680-220680	742.	780.	898.
24	230680-300680	1017.	772.	597.
25	10780- 70780	1205.	925.	1035.
26	80780-150780	1643.	1330.	1318.
27	160780-220780	1943.	1453.	1904.
28	230780-310780	918.	1332.	1214.
29	10880- 70880	1131.	1016.	747.
30	80880-150880	1872.	1000.	1047.
31	160880-220880	2201.	2378.	2309.
32	230880-310880	908.	1198.	1044.
33	10980- 70980	601.	816.	681.
34	80980-150980	499.	745.	530.
35	160980-220980	803.	649.	478.
36	230980-300980	1618.	1157.	1283.
37	11080- 71080	2382.	1525.	1573.
38	81080-151080	1904.	2145.	2056.
39	161080-221080	1695.	1628.	1424.
40	231080-311080	1734.	1364.	1613.
41	11180- 71180	1314.	1608.	1411.
42	81180-151180	982.	1083.	915.
43	161180-221180	701.	795.	845.
44	231180-301180	616.	654.	762.
45	11280- 71280	522.	560.	577.
46	81280-151280	521.	475.	481.
47	161280-221280	348.	468.	600.
48	231280-311280	362.	379.	430.

FICHER DES DONNEES HYDROMETEOROLOGIQUES HEBDOMADAIRES
DU SYSTEME DE PREVISION DU 1/1/80 AU 31/12/82 - BASSIN DU LAC ST-JEAN
APPORTS NON CONTROLES PAR PERIODE DE QUART DE MOIS EN m³/s

†	DATES	OBSERVE	TFN	PREVIS (MC2)
49	10181- 70181	337.	370.	338.
50	80181-150181	275.	320.	302.
51	160181-220181	288.	285.	297.
52	230181-310181	280.	291.	285.
53	10281- 70281	274.	265.	225.
54	80281-150281	266.	266.	246.
55	160281-220281	557.	292.	253.
56	230281-280281	1438.	3160.	1354.
57	10381- 70381	1154.	929.	1058.
58	80381-150381	702.	561.	866.
59	160381-220381	523.	464.	520.
60	230381-310381	558.	463.	469.
61	10481- 70481	1248.	599.	1314.
62	80481-150481	2851.	1748.	2274.
63	160481-220481	2092.	2484.	2442.
64	230481-300481	1807.	2488.	1803.
65	10581- 70581	2690.	2678.	2808.
66	80581-150581	4359.	2615.	2565.
67	160581-220581	5419.	4738.	4512.
68	230581-310581	2977.	3674.	3227.
69	10681- 70681	2141.	2491.	2430.
70	80681-150681	1730.	1696.	1748.
71	160681-220681	1759.	1607.	1493.
72	230681-300681	1988.	1786.	2904.
73	10781- 70781	1279.	1500.	983.
74	80781-150781	1006.	1092.	833.
75	160781-220781	825.	958.	780.
76	230781-310781	1078.	1037.	1136.
77	10881- 70881	676.	998.	351.
78	80881-150881	506.	700.	387.
79	160881-220881	598.	571.	610.
80	230881-310881	350.	551.	384.
81	10981- 70981	295.	426.	447.
82	80981-150981	509.	484.	641.
83	160981-220981	583.	760.	240.
84	230981-300981	670.	735.	374.
85	11081- 71081	482.	809.	259.
86	81081-151081	1062.	723.	994.
87	161081-221081	785.	922.	1065.
88	231081-311081	707.	749.	856.
89	11181- 71181	804.	670.	824.
90	81181-151181	1007.	798.	1238.
91	161181-221181	861.	762.	748.
92	231181-301181	511.	711.	767.
93	11281- 71281	539.	488.	463.
94	81281-151281	468.	493.	554.
95	161281-221281	434.	437.	494.
96	231281-311281	400.	428.	377.

FICHER DES DONNEES HYDROMETEOROLOGIQUES HERDOMADAIRES
DU SYSTEME DE PREVISION DU 1/1/80 AU 31/12/82 - BASSIN DU LAC ST-JEAN
APPORTS NON CONTROLES PAR PERIODE DE QUART DE MOIS EN m³/s

#	DATES	OBSERVE	TEN	PREVIS (MC2)
97	10182- 70182	402.	388.	349.
98	80182-150182	323.	356.	367.
99	160182-220182	311.	312.	303.
100	230182-310182	277.	309.	241.
101	10282- 70282	314.	267.	338.
102	80282-150282	259.	288.	236.
103	160282-220282	224.	249.	208.
104	230282-280282	219.	208.	256.
105	10382- 70382	245.	237.	173.
106	80382-150382	162.	234.	179.
107	160382-220382	158.	179.	146.
108	230382-310382	226.	195.	142.
109	10482- 70482	202.	301.	319.
110	80482-150482	273.	312.	208.
111	160482-220482	668.	656.	669.
112	230482-300482	1853.	1946.	1105.
113	10582- 70582	3280.	2605.	3080.
114	80582-150582	6406.	3611.	6864.
115	160582-220582	4647.	4967.	4870.
116	230582-310582	2679.	3428.	2429.
117	10682- 70682	2351.	2099.	1971.
118	80682-150682	1217.	1819.	1541.
119	160682-220682	1782.	1222.	1462.
120	230682-300682	1948.	1704.	1875.
121	10782- 70782	1323.	1464.	1463.
122	80782-150782	1336.	1300.	1353.
123	160782-220782	1468.	1138.	1172.
124	230782-310782	998.	1236.	1233.
125	10882- 70882	701.	1058.	753.
126	80882-150882	562.	653.	587.
127	160882-220882	527.	633.	608.
128	230882-310882	764.	604.	590.
129	10982- 70982	953.	919.	641.
130	80982-150982	964.	964.	875.
131	160982-220982	1014.	951.	1163.
132	230982-300982	866.	1115.	722.
133	11082- 71082	668.	973.	940.
134	81082-151082	714.	752.	555.
135	161082-221082	870.	902.	925.
136	231082-311082	1077.	874.	903.
137	11182- 71182	1297.	835.	947.
138	81182-151182	1497.	1549.	1331.
139	161182-221182	1188.	1144.	1168.
140	231182-301182	914.	1013.	1326.
141	11282- 71282	1154.	712.	749.
142	81282-151282	872.	2027.	1358.
143	161282-221282	652.	618.	743.
144	231282-311282	640.	527.	559.