

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GENIE DE LA CONSTRUCTION
M. Ing.

PAR
LAFORCE, Serge

CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES
DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES :
CAS DE LA RIVIÈRE DU NORD À LACHUTE

MONTREAL, LE 11 AOÛT 2008

© droits réservés de Serge Laforce

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Robert Leconte, directeur de mémoire
Département de génie de la Construction à l'École de technologie supérieure

M. Pierre Pelletier, co-directeur de mémoire
Département Hydroélectricité et hydraulique, Genivar

M. Robert Hausler, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. François Brissette, membre du jury
Département de génie de la Construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 17 JUILLET 2008

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

**CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES
DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES :
CAS DE LA RIVIÈRE DU NORD À LACHUTE**

LAFORCE, Serge

RÉSUMÉ

La caractérisation de l'évolution des crues de la rivière du Nord a été effectuée avec le modèle hydrologique Hydrotel. Les projections climatiques pour les horizons 2020, 2050 et 2080 ont été obtenues de 3 MCG et de plusieurs scénarios d'émissions de GES. Par rapport à la période 1967-1990, la principale observation pour la période printanière concerne la tendance à une réduction des quantiles des crues de récurrences inférieures à 20 ans. Parallèlement, les quantiles de crues de récurrence supérieure à 20 ans peuvent augmenter. Pour la période hivernale, une augmentation marquée des quantiles de crues est prévue, notamment pour les faibles récurrences.

Un tronçon de la rivière du Nord à la hauteur de Lachute a été modélisé à l'aide du modèle hydraulique unidimensionnel HEC-RAS. Les problématiques d'incertitudes et d'évolution du régime des crues, imputable aux changements climatiques, ont été illustrées à travers la délimitation des zones inondables.

Mots-clés : changements climatiques; hydrologie, crues, cartographie zone inondable

FLOODPLAIN DELINEATION IN A CLIMATE CHANGE CONTEXT : CASE OF THE NORD RIVER AT LACHUTE

LAFORCE, Serge

ABSTRACT

The characterization of the evolution of flood for the Nord River was carried out using the Hydrotel hydrological model. Climate projections were obtained from 3 GCM and several GHG emissions scenarios. Compared with the 1967-1990 period, the main observations arising from this analysis concern the reduction of spring flood quantiles recurrences of less than 20-year. Meanwhile, an increase of quantiles is possible for flood recurrences of more than 20-year. A marked increase in winter flood quantiles is observed, especially for the recurrences under 20-year.

The mapping of flood-prone areas of a section of the Nord River in Lachute was carried out using HEC-RAS, a one-dimensional hydraulic model. Issues related to uncertainties and changes in flood, related to climate change, were illustrated through the delimitation of areas prone to flooding.

Keywords : climate change; hydrology, flood, floodplain.

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS

« Les ingénieurs doivent prendre conscience que le changement climatique affecte les environnements naturels et construits et qu'ils mettront à défi leur aptitude à planifier, concevoir et construire des infrastructures et systèmes qui pourront protéger les personnes des préjudices et maintenir des standards de bien-être économique acceptables. »

Extrait de la déclaration par l'Institut Canadien des ingénieurs, ses dix sociétés membres et les participants à la conférence technologie et changements climatiques, Ottawa, Canada, 9 au 12 mai 2006.

L'accomplissement de ce mémoire a nécessité la collaboration de plusieurs personnes et organismes. Premièrement, je tiens à remercier mes directeurs de recherche, MM. Robert Leconte et Pierre Pelletier qui malgré leurs emplois du temps quelques peu « surchargés » ont su orienter mes recherches à l'aide de précieux conseils. Avec leurs expertises et visions complémentaires ils ont contribué au façonnement de ce travail.

Je tiens également à remercier la direction de l'Expertise et de la gestion des barrages publics du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) et son directeur, M. Pierre Aubé pour son appui en nous fournissant le modèle hydrologique Hydrotel du bassin versant de la rivière du Nord ainsi que le modèle hydraulique de la rivière entre Saint-Jérôme et Lachute. Également du CEHQ, je remercie M. Richard Turcotte pour son enthousiasme devant le projet et son aide lorsque celle-ci était requise. Je tiens également à remercier le consortium

Ouranos et plus particulièrement l'équipe de Mme Diane Chaumont pour avoir fourni les données des différents modèles climatiques globaux.

Outre la collaboration de Pierre Pelletier, je remercie Genivar mon employeur, M. Francis Gauthier Vice-président Énergie, ainsi que Mme Diane Gagné et M. Jean-Marc Tremblay du service de cartographie pour le support technique dans la réalisation de certaines figures de ce mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	iv
AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS	v
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xvii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Système climatique	6
1.2.1 Bilan radiatif	6
1.2.2 Effet de serre et augmentation des gaz à effet de serre.....	7
1.3 Changements climatiques et observations récentes	8
1.3.1 Températures moyennes globales	10
1.3.2 Changement du cycle de l'eau	11
1.3.3 Changements dans la cryosphère	13
1.4 Projections pour le futur.....	13
1.4.1 Scénarios d'émissions de GES.....	16
1.4.2 Températures et précipitations.....	18
1.4.3 Hydrologie des bassins versants	19
1.4.4 Événements extrêmes.....	21
1.5 Modélisation climatique pour les études d'impacts.....	23
1.5.1 Résultats des modèles climatiques globaux	23
1.5.2 Génération de projections régionales locales.....	25
1.5.2.1 Downscaling dynamique.....	25
1.5.2.2 Downscaling statistique	26
1.5.2.3 Méthodes des deltas	26
1.6 Modélisation du cycle hydrologique.....	27
1.6.1 Cycle hydrologique	27
1.6.2 Modélisation hydrologique	28
1.6.2.1 Modèles globaux et distribués	28
1.6.2.2 Modèles conceptuels et empiriques	29
1.6.2.3 Modèles événementiels et continus	30
1.7 Modélisation hydraulique des zones inondables.....	30
1.7.1 Inondations.....	30
1.7.2 Modélisation hydraulique	31
1.7.2.1 Données topographiques.....	32

1.7.2.2	Modèles hydrauliques	33
1.7.3	Cartographie des zones inondables au Québec	34
CHAPITRE 2	Description du bassin versant de la rivière du Nord	37
2.1	Études antérieures	37
2.2	Bassin versant de la rivière du Nord	38
2.2.1	Climatologie du bassin versant	40
2.2.2	Régions physiographiques	42
2.2.3	Utilisation du sol	43
2.2.4	Hydrographie et inondations	45
2.2.5	Barrages	49
2.2.6	Hydrologie du bassin versant	49
2.2.6.1	Données hydrologiques disponibles	49
2.2.6.2	Régime hydrologique	50
2.2.6.3	Caractérisation des crues extrêmes	56
CHAPITRE 3	MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DE LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE	60
3.1	Objectifs de la modélisation	60
3.2	Données météorologiques	61
3.3	Données hydrométriques	61
3.4	Analyse de fréquence et événements extrêmes	62
3.4.1	Principes et problèmes usuels	62
3.4.2	L'échantillonnage	63
3.4.3	Fonctions de distribution	65
3.4.4	Méthodes d'ajustement	65
3.4.5	Tests d'inférence statistique	66
3.5	Analyse de fréquence des crues observées	66
3.6	Modèle hydrologique HYDROTEL	68
3.6.1	Présentation du modèle	69
3.6.1.1	Interpolation des données hydrologiques	69
3.6.1.2	Évolution et fonte du couvert nival	70
3.6.1.3	Évapotranspiration potentielle	70
3.6.1.4	Bilan d'eau vertical	71
3.6.1.5	Écoulement sur la partie terrestre	71
3.6.1.6	Écoulement dans le réseau hydrographique	72
3.6.2	Calibrage du modèle	73
3.6.2.1	Critères d'optimisation	73
3.6.2.2	Processus de calibrage du modèle	73
CHAPITRE 4	MODÉLISATION DES HORIZONS FUTURS	78
4.1	Objectifs de la modélisation	78
4.2	Modèle climatique globaux et scénario d'émissions de GES	78
4.2.1	Habilité des MCG-SEM à reproduire le climat de la période de référence	79
4.2.2	Effet simulé sur le régime hydrologique	82
4.3	Méthode des deltas	87

4.3.1	Approche.....	87
4.3.2	Calcul des incréments.....	89
4.3.2.1	Modèle CGCM3.....	89
4.3.2.2	Modèle ECHAM4.....	90
4.3.2.3	Modèle HadCM3.....	91
4.4	Analyses de fréquence des crues futures.....	92
4.4.1	Analyses de fréquence.....	92
4.4.2	Discussion et analyse des résultats.....	93
4.4.2.1	Influence des MCG.....	93
4.4.2.2	Période printanière.....	94
4.4.2.3	Période été-automne.....	98
4.4.2.4	Période hivernale.....	99
4.4.2.5	Période annuelle.....	101
4.5	Détermination de la plage d'incertitudes.....	102
4.6	Détermination de l'évolution « probable ».....	104
CHAPITRE 5	MODÉLISATION HYDRAULIQUE.....	108
5.1	Objectifs de la modélisation.....	108
5.2	Description et localisation du secteur d'étude.....	108
5.3	Modèle hydraulique.....	110
5.3.1	Description du modèle.....	110
5.3.2	Données d'entrée.....	111
5.3.2.1	Choix et profils des sections.....	111
5.3.2.2	Ponts.....	111
5.3.2.3	Coefficients de rugosité.....	112
5.3.2.4	Conditions aux limites.....	113
5.3.2.5	Calibrage du modèle.....	114
5.4	Modélisation des zones inondables en eaux libres.....	116
5.4.1	Étude hydrologique.....	116
5.4.1.1	Bassin versant.....	116
5.4.1.2	Facteur de pointe.....	116
5.4.1.3	Transposition des débits.....	117
5.4.2	Période de référence (1967-1990).....	117
5.4.2.1	Transposition des débits et conditions aux limites.....	117
5.4.2.2	Profils des écoulements et discussion.....	118
5.4.3	Plage d'incertitude.....	121
5.4.3.1	Transposition des débits et conditions aux limites.....	121
5.4.3.2	Résultats et analyses des simulations.....	121
5.4.4	Évolution « probable ».....	124
5.4.4.1	Transposition des débits et conditions aux limites.....	124
5.4.4.2	Résultats et analyses des simulations.....	125
5.5	Pont de la route 148 (rue principale).....	128
5.5.1	Capacité hydraulique du pont.....	128
5.5.2	Influence du pont sur les niveaux.....	128
5.5.3	Influences des changements climatiques sur les niveaux.....	130
5.5.4	Analyses et discussions.....	132

5.6	Rehaussement des niveaux pour la période hivernale	136
5.6.1	Hypothèses de simulations.....	136
5.6.2	Résultats des simulations.....	137
5.7	Cartographies des zones inondables dans un contexte de changements climatiques	139
CHAPITRE 6	DISCUSSION ET ANALYSE DE LA MÉTHODE.....	141
6.1	Modélisation hydraulique	141
6.1.1	Incertitudes dues aux intrants.....	141
6.1.2	Incertitudes dues à la méthode de modélisation	142
6.2	Modélisation hydrologique	143
6.2.1	Incertitudes dues aux intrants.....	143
6.2.2	Incertitudes dues à la modélisation.....	144
6.3	Modélisation climatique.....	145
6.3.1	Modèles climatiques et scénarios d'émissions	145
6.3.2	Mise à l'échelle spatiale et temporelle	147
CONCLUSION	148
RECOMMANDATIONS	152
ANNEXE 1	Descriptif des stations météorologiques et hydrométriques.....	153
ANNEXE 2	Résultats du calibrage du modèle hydrologique.....	167
ANNEXE 3	Analyses de fréquences des crues de la période de référence	193
ANNEXE 4	Habilité des MCG-SEM à reproduire le climat de la période de référence.....	203
ANNEXE 5	Calcul des deltas.....	208
ANNEXE 6	Analyses de fréquence des crues futures	218
ANNEXE 7	Détermination de l'évolution « Probable »	260
ANNEXE 8	Secteur d'étude et modèle hydraulique	265
ANNEXE 9	Modélisation hydraulique.....	268
BIBLIOGRAPHIE	310

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Synthèse des changements climatiques projetés par rapport à 1961-1990 pour le sud du Québec.....	18
Tableau 2.1	Stations météorologiques sur le bassin versant de la rivière du Nord	40
Tableau 2.2	Températures mensuelles sur le bassin de la rivière du Nord (1966 à 1990)	41
Tableau 2.3	Précipitations mensuelles sur le bassin versant de la rivière du Nord (1966 à 1990)	42
Tableau 2.4	Utilisation des sols sur le bassin versant de la rivière du Nord	44
Tableau 2.5	Caractéristiques des principaux lacs du bassin versant de la rivière du Nord	45
Tableau 2.6	Caractéristiques des tributaires de la rivière du Nord.....	47
Tableau 2.7	Caractéristiques de la station hydrométrique 040110 localisée sur la rivière du Nord	50
Tableau 2.8	Caractéristiques de l'échantillon des débits de crues annuelles à la station 040110 sur la rivière du Nord (1931 à 2000).....	56
Tableau 3.1	Comparaison des échantillons et des quantiles de crues pour la période annuelle sur la rivière du Nord à la station 040110	68
Tableau 3.2	Coefficients de Nash-Sutcliffe pour les différentes années simulées	74
Tableau 3.3	Coefficients de Nash-Sutcliffe pour les différentes périodes printanières.....	75

Tableau 3.4	Comparaison entre les échantillons et les quantiles de crues observés et simulés pour les différentes périodes sur la rivière du Nord à la station 040110 entre 1967 et 1990.....	76
Tableau 4.1	Habilité des MCG à reproduire les caractéristiques du climat de la période de référence sur une base annuelle (12 mois).....	81
Tableau 4.2	Précipitations et températures moyennes observées et générées par les MCG pour les mois de novembre à mars durant la période de référence.....	86
Tableau 4.3	Comparaison entre les échantillons et les quantiles de crues annuelles pour la période de référence simulée et simulée selon par les MCG-SE (m ³ /s).....	87
Tableau 4.4	Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par CGCM3 pour le scénario d'émission A2.....	90
Tableau 4.5	Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par ECHAM4 pour le scénario d'émission A2.....	91
Tableau 4.6	Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par HadCM3 pour le scénario d'émission A2.....	92
Tableau 4.7	Influence des MCG sur les quantiles de crues annuelles de récurrence 100 ans et sur leur évolution dans le temps pour le scénario d'émission A2.....	94
Tableau 4.8	Débits de crues printanières pour les horizons 2020, 2050 et 2080.....	95
Tableau 4.9	Débits de crues été-automne pour les horizons 2020, 2050 et 2080.....	99
Tableau 4.10	Débits de crues hivernales pour les horizons 2020, 2050 et 2080.....	100

Tableau 4.11	Évolution des quantiles de crues hivernales à la station 040110 simulés par HadCM3 selon le scénario d'émission A2	101
Tableau 4.12	Débits de crues annuelles pour les horizons 2020, 2050 et 2080	102
Tableau 4.13	Centiles de crues vicennales et centennales pour les horizons 2020, 2050 et 2080 à la station 040110 sur la rivière du Nord.....	104
Tableau 4.14	Évolution « probable » des crues pour les horizons 2020, 2050 et 2080 à la station 040110 sur la rivière du Nord.....	106
Tableau 5.1	Caractéristiques des ponts enjambant la rivière du Nord à Lachute dans le bief modélisé.....	112
Tableau 5.2	Coefficients de rugosité des berges.....	113
Tableau 5.3	Relation niveau-débit aval du modèle hydraulique	114
Tableau 5.4	Caractéristiques du modèle hydraulique et résultats du calibrage	115
Tableau 5.5	Paramètres de modélisation de la rivière du Nord à Lachute – Période de référence.....	118
Tableau 5.6	Paramètres de modélisation de la rivière du Nord à Lachute – Plage d'incertitude pour la crue centennale pour l'horizon 2080.....	121
Tableau 5.7	Caractéristiques des écoulements simulés pour la plage d'incertitude des débits de récurrence 100 ans pour l'horizon 2080.....	122
Tableau 5.8	Paramètres de modélisation de la rivière du Nord à Lachute – Évolution de la crue centennale probable pour les horizons 2020, 2050 et 2080.....	125
Tableau 5.9	Caractéristiques des écoulements simulés pour l'évolution « probable » des débits de récurrence 100 ans.....	126

Tableau 5.10	Comparaison des niveaux d'eaux dans le bief amont avec la configuration actuelle et rehaussée du soffite du pont de la route 148 pour la période de référence.....	129
Tableau 5.11	Comparaison des niveaux d'eaux dans le bief amont avec la configuration actuelle et rehaussée du soffite du pont de la route 148 pour l'horizon 2050.....	129
Tableau 5.12	Comparaison des niveaux d'eaux dans le bief amont avec la configuration actuelle et rehaussée du soffite du pont de la route 148 pour l'horizon 2080.....	130
Tableau 5.13	Rehaussements des niveaux dans le bief amont causés par les changements climatiques pour l'horizon 2050	131
Tableau 5.14	Rehaussements des niveaux dans le bief amont causés par les changements climatiques pour l'horizon 2080	131
Tableau 5.15	Impact du rehaussement du soffite du pont de la route 148 sur les niveaux au droit du pont par rapport à la période de référence (m).....	133
Tableau 5.16	Paramètres de modélisation de la rivière du Nord à Lachute pour les débits annuels de récurrence 20 ans pour la période de référence et les crues de récurrence 10 ans pour la période hivernale des horizons futurs	137

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1a	Variations des températures globales annuelles observées et modélisées avec contributions naturelles et anthropiques15
Figure 1.1b	Variations des températures globales annuelles observées et modélisées avec contributions naturelles seulement.....16
Figure 1.2	Émissions et concentrations de CO ₂ pour divers scénarios d'émissions17
Figure 1.3	Impact d'une hausse en moyenne des températures sur les extrêmes22
Figure 2.1	Bassin versant de la rivière du Nord39
Figure 2.2	Profil en long de la rivière du Nord48
Figure 2.3	Courbes enveloppes des débits de la rivière du Nord à la station 040110 (1954 à 2000)51
Figure 2.4	Évolution des débits moyens annuels sur la rivière du Nord à la station 040110 (1954 à 2000)54
Figure 2.5	Évolution des débits moyens hivernaux sur la rivière du Nord à la station 040110 (1954 à 1999)55
Figure 2.6	Évolution des crues annuelles sur la rivière du Nord à la station 040110 (1931 à 2000)58
Figure 2.7	Évolution de la crue de février 1981 sur le bassin versant de la rivière du Nord59
Figure 4.1	Impact des MCG sur l'hydrogramme printanier de 196783

Figure 4.2	Impact des MCG sur l'hydrogramme printanier de 1976.....	84
Figure 4.3	Évolution de l'hydrogramme moyen pour les périodes hivernale et printanière simulées sous CGCM3 pour un scénario d'émission A2.....	97
Figure 4.4	Plage d'incertitude à l'horizon 2080 illustrée par les hydrogrammes annuels des débits moyens.....	103
Figure 4.5	Évolution probable de l'hydrogramme annuel des débits moyens.....	107
Figure 5.1	Localisation du secteur d'étude	109
Figure 5.2	Profils des écoulements de la rivière du Nord à Lachute pour la période de référence.....	120
Figure 5.3	Profil des écoulements de la rivière du Nord à Lachute - Plage d'incertitude - Horizon 2080 - Débit de récurrence 100 ans.....	123
Figure 5.4	Profil de l'écoulement de la rivière du Nord à Lachute - Évolution probable de la crue de récurrence 100 ans.....	127
Figure 5.5	Profil de l'écoulement de la rivière du Nord à Lachute - Influence du rehaussement du tablier du pont pour les crues de récurrence 20 ans	134
Figure 5.6	Profil de l'écoulement de la rivière du Nord à Lachute - Influence du rehaussement du tablier du pont pour les crues de récurrence 100 ans	135
Figure 5.7	Comparaison entre les crues hivernales de récurrence 10 ans avec couvert de glace et la crue annuelle de récurrence 20 ans de la période de référence.....	138

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CRIACC	Centre de Ressources en Impact et Adaptation au Climat et à ses Changements
DRAME	Développement et Recherche Appliquée en Modélisation de l'Eau et de l'Environnement
GES	Gaz à effets de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPS	Global Positioning System
INRS-ETE	Institut national de recherche scientifique eau, terre et environnement
LiDAR	Light Detection and Ranging
MCG	Modèle Climatique Global ou Modèle de Circulation Générale
MDDEP	Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs
MNT	Modèle numérique de terrain
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
SE	Scénario d'émission (de GES)
USACE	United State Army Corps of Engineers

INTRODUCTION

Il y a quelques décennies, une frange de la communauté scientifique a commencé à soulever certaines inquiétudes sur les répercussions des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) sur le climat. C'est ainsi qu'en 1988, le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) voit le jour et publie en 1990 son premier rapport dans lequel il concluait à la forte probabilité d'un changement climatique en raison de l'accumulation des GES dans l'atmosphère. En 2007, des milliers d'observations à l'échelle de la planète et trois rapports plus tard, le GIEC affirme qu'un réchauffement climatique global est observé et que les émissions humaines de GES en sont *très probablement* la cause.

Si les différents climats terrestres ont façonné en partie la surface terrestre, ceux-ci ont également influencé le développement des sociétés. À l'échelle humaine le climat influence, entre autres, l'alimentation, l'habillement et les comportements humains. À l'échelle sociétale, il influence l'offre et la demande, peut causer l'instabilité sociale ou des crises financières.

Dans la gestion des ressources en eau, le climat a une influence fondamentale puisqu'il régit en partie le cycle hydrologique en influençant notamment les précipitations et l'évaporation. S'appuyant sur une certaine variabilité historique du climat, et par le fait même hydrologique, les gestionnaires et concepteurs du domaine de l'eau ont ainsi aménagé centrales hydroélectriques, barrages, usines de production d'eau potable etc. Parallèlement, beaucoup de collectivités se sont implantées à proximité des cours d'eau.

Toutefois, dans un contexte de changements climatiques, cette variabilité historique n'est plus représentative de l'avenir. L'augmentation de cette variabilité impliquera vraisemblablement l'augmentation des phénomènes extrêmes tels que sécheresses et inondations ainsi que la modification des régimes hydrologiques des cours d'eau. Par conséquent, de nouvelles façons de faire doivent être mises de l'avant afin d'anticiper les conséquences sur la gestion des ressources hydriques et de mieux définir les risques potentiels pour les populations humaines et les écosystèmes.

La présente étude aborde l'une des facettes de la gestion du domaine hydrique soit la cartographie des zones inondables. En regard aux conséquences appréhendées, l'idée d'une révision des plans de zonage des rives et des plaines d'inondation est déjà lancée, notamment par le consortium Ouranos (Ouranos, 2004). Par ailleurs, « beaucoup de gens sont préoccupés par le fait que les cartes (du risque d'inondation) ne sont plus à jour en raison des changements dans l'utilisation des sols [...], de la variabilité et des changements climatiques » (Kumar *et al.*, 2001).

Toutefois, toute étude hydrologique dans un contexte de changements climatiques voit poindre plusieurs incertitudes et les régimes hydrologiques sont sujets à évoluer dans le temps et dans l'espace. Dans ce contexte, les objectifs de ce mémoire sont les suivants :

1. puisque la cartographie des zones inondables s'effectue en considérant les crues annuelles, quantifier les impacts possibles des changements climatiques sur l'ampleur de celles-ci;
2. quantifier les impacts possibles des changements climatiques sur les crues des périodes printanière, d'été/automne et hivernale;
3. démontrer l'impact des incertitudes induites par l'étude des changements climatiques sur la cartographie des zones inondables;
4. enfin, démontrer l'impact de l'évolution du régime hydrologique sur la cartographie des zones inondables en cernant une évolution « probable » des crues.

Dans un cadre plus large, cette étude se veut également une réflexion sur la méthodologie à suivre afin de mener une étude hydrologique dans un cadre de changements climatiques. Ainsi, dans un proche avenir, la gestion et la conception des ouvrages hydrauliques et la réalisation d'études d'impacts pourraient s'en inspirer en fonction des objectifs à atteindre.

L'approche utilisée dans ce mémoire repose premièrement sur l'utilisation d'un modèle hydrologique calibré en continu sur le bassin versant de la rivière du Nord en utilisant les

données météorologiques et hydrométriques relevées entre 1966 et 1990. L'objectif premier du calibrage du modèle est de reproduire l'intensité et la fréquence des crues observées.

La seconde étape vise à produire des séries de débits futurs pour les horizons 2020, 2050 et 2080, desquelles les échantillons des crues extrêmes sont extraits afin d'analyser l'intensité et la fréquence. À cet effet, les « deltas » de températures et de précipitations caractérisant différentes évolutions possibles du climat sont ajoutés aux données météorologiques historiques. Ces deltas sont calculés à partir des projections de différents modèles climatiques et scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Les séries climatiques résultantes servent d'intrants à un modèle hydrologique pour simuler les débits d'un climat futur.

La troisième étape consiste à la modélisation hydraulique de la plaine d'inondation à l'aide d'un modèle hydraulique unidimensionnel. Puisque les changements climatiques impliquent plusieurs d'incertitudes et une évolution du climat, de nouvelles problématiques surgissent quant à la cartographie de zones inondables. Les différentes problématiques observées sont analysées et cartographiées.

Le mémoire est divisé en six chapitres. Premièrement une revue de littérature est effectuée et s'attarde sur l'évolution des connaissances relatives aux changements climatiques. Par la suite, une revue des méthodes de modélisation climatique, hydrologique et hydraulique est effectuée. Le second chapitre présente le bassin versant de la rivière du Nord avec ses caractéristiques et les principales études effectuées sur celui-ci. Le troisième chapitre consiste à la présentation et au calibrage du modèle hydrologique employé. Le quatrième chapitre aborde la simulation des différents horizons futurs et les analyses de fréquence des crues extrêmes. Il présente également la préparation des projections de changements climatiques. Le chapitre 5 effectue la description du modèle hydraulique unidimensionnel ainsi que la zone d'étude. Par la suite, les simulations des différentes conditions et problématiques induites par les changements climatiques sont effectuées. Enfin, le chapitre

6 est une analyse de la méthode et met en lumière les différentes incertitudes et limites de l'approche préconisée dans le cadre de cette étude.

Cette étude nécessite l'emploi de plusieurs intrants et modèles. Mené au sein du laboratoire de Développement et Recherche Appliquée à la Modélisation de l'Eau et de l'Environnement (DRAME) à l'École de technologie supérieure (ÉTS), ce projet de recherche repose également sur les contributions d'Ouranos (Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques) et du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ).

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

La délimitation d'une zone inondable repose sur la connaissance de l'hydrologie et de l'hydraulique des cours d'eau. Suivant la caractérisation hydrologique d'une rivière dans laquelle un secteur est sujet aux inondations, les débits caractéristiques peuvent être établis par l'emploi de modèles déterministes ou par analyse probabiliste. Cette étape est suivie par une modélisation hydraulique du secteur de rivière à l'étude.

Cette méthodologie éprouvée repose sur l'hypothèse de base que les conditions historiques seront représentatives des conditions futures. Or, le réchauffement global anticipé de l'atmosphère terrestre provoquera des changements climatiques qui perturberont le cycle hydrologique. Par conséquent, l'hypothèse de base sous tendant les analyses hydrologiques n'est plus valide. Par ailleurs, anticiper le réchauffement global de l'atmosphère est une chose, mais de prévoir son évolution en est une autre.

La modélisation hydraulique des cours d'eau est une science bien établie. La modélisation hydrologique est également bien connue mais comporte toutefois un lot d'incertitudes. Enfin, la modélisation climatique qui découle de la science du climat est également entachée d'incertitudes puisque les interactions qui régissent l'atmosphère et la variabilité spatio-temporelle des variables climatiques sont très complexes. Cette situation s'explique en partie par la technologie disponible car la puissance de calcul exigée par les modèles climatiques est considérable.

Dans un premier temps, la revue de littérature a pour objectif de décrire brièvement le système climatique et de situer l'état des connaissances sur les changements anticipés. Par la suite, les méthodes servant à la modélisation de projections climatiques dans le cadre

d'étude d'impact sont abordées. Dans un troisième temps, le cycle hydrologique et sa modélisation sont étudiés. Enfin, la modélisation des plaines inondables est abordée.

1.2 Système climatique

1.2.1 Bilan radiatif

Pour prévoir l'évolution possible du climat en réponse aux causes naturelles et anthropiques, il est important de comprendre ce qu'il advient de l'énergie solaire à laquelle la température est associée.

Comme tout corps naturel dont la température est différente du zéro absolu, la terre émet du rayonnement vers l'espace, ce qui a pour effet de la refroidir. Le climat est donc le résultat de l'équilibre entre l'énergie solaire absorbée (réchauffement) et l'énergie infrarouge émise (refroidissement). Cet équilibre s'exprime sous la forme du bilan radiatif qui est l'élément central du bilan énergétique total de la terre.

La perturbation du bilan radiatif peut par exemple résulter du changement du rayonnement émis par le soleil, de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ou des aérosols résultant d'une éruption volcanique.

Le rétablissement de l'équilibre peut se produire de plusieurs manières. Parmi celles-ci, une variation de la température de la terre, un changement de la couverture nuageuse globale ou encore une autre réponse naturelle du système, telle une modification des surfaces enneigées. Une perturbation de l'énergie reçue ou perdue par le système, quelle qu'elle soit, enclenche une série de réponses complexes et de rétroactions qui interagissent pour créer ce nouvel équilibre (Le Treut et Gautier, 2007).

1.2.2 Effet de serre et augmentation des gaz à effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel de rétention de la chaleur dans l'atmosphère par les gaz qui la composent (Villeneuve et Richard, 2005). Ainsi, les gaz à effet de serre (GES) sont présents naturellement dans l'atmosphère et contribuent à maintenir des conditions favorables à la vie sur terre. Si la vapeur d'eau est le principal GES présent dans l'atmosphère terrestre, d'autres gaz à effet de serre d'origine anthropique ont connu une forte augmentation depuis le début de l'ère industrielle soit environ vers 1750.

Depuis le début de cette époque, la concentration moyenne de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère est passée de 280 à 379 ppm en 2005. Cette concentration dépasse de loin les concentrations naturelles observées durant les 650 000 dernières années, celles-ci variant entre 180 et 300 ppm (Solomon *et al.*, 2007). L'augmentation des concentrations de CO_2 est responsable d'un forçage radiatif de $1,66 \pm 0,17 \text{ W/m}^2$, une contribution qui domine tous les autres agents de forçage radiatif (Solomon *et al.*, 2007). À ce jour, environ la moitié de l'augmentation de l'effet de serre peut être attribué au CO_2 et la seconde moitié aux autres gaz. Cette augmentation est principalement due à l'utilisation des combustibles fossiles et au changement d'utilisation des terres, notamment la déforestation.

La concentration de méthane (CH_4) a également connue une augmentation importante depuis l'ère préindustrielle. Ainsi, entre 1750 et 2005, la concentration moyenne globale de méthane dans l'atmosphère est passée de 715 à 1774 ppb soit une augmentation d'environ 150% et a conduit à un forçage radiatif de $0,48 \pm 0,05 \text{ W/m}^2$. Tout comme pour le CO_2 , ce taux dépasse largement les concentrations observées au cours des 650 000 dernières années, celles-ci variant entre 320 et 790 ppb (Solomon *et al.*, 2007). L'augmentation de la concentration de méthane dans l'atmosphère est liée aux activités humaines incluant l'utilisation des combustibles fossiles, le bétail, la culture du riz et les dépotoirs.

Sur cette même période, l'oxyde nitreux (N_2O) a augmenté de 18% passant de 270 à 319 ppb. Cette augmentation contribue actuellement à un forçage radiatif de $0,16 \pm 0,02 \text{ W/m}^2$

(Solomon *et al.*, 2007). Son augmentation est principalement reliée aux activités agricoles et aux changements d'affectation des sols correspondants. Au cours des dernières décennies son augmentation s'est effectuée linéairement à un taux d'environ 0,8 ppb par année.

Enfin, les chlorofluorocarbures (CFC) et hydrochlorofluorocarbures (HCFC) sont des gaz à effet de serre d'origine purement anthropique. Les émissions de ces gaz ont diminué en raison de leur interdiction progressive depuis l'application du Protocole de Montréal en 1987 et les concentrations atmosphériques de CFC-11 et CFC-13 diminuent en raison des processus d'élimination naturels. Les gaz listés au Protocole de Montréal ont contribué à un forçage radiatif de $0,32 \pm 0,03 \text{ W/m}^2$ en 2005, le CFC-12 restant le troisième plus important agent de forçage radiatif à longue durée de vie (Solomon *et al.*, 2007).

Les concentrations de gaz industriels fluorés concernés par le Protocole de Kyoto, les hydrofluorocarbures (HFC), les perfluorocarbures (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF_6) sont relativement faibles, mais augmentent rapidement. Leur forçage radiatif total en 2005 était de $0,017 \text{ W/m}^2$ (Solomon *et al.*, 2007).

L'ozone troposphérique est un GES à courte durée de vie produit par les réactions chimiques à partir de certains agents précurseurs dans l'atmosphère et la concentration de ce GES possède une grande variabilité spatiale et temporelle. Les mesures testées et la modélisation ont permis de progresser dans la compréhension des précurseurs chimiques qui mènent à la formation d'ozone troposphérique, principalement le monoxyde de carbone, des oxydes d'azote et le formaldéhyde. Le forçage radiatif de l'ozone troposphérique est estimé à $0,35 (0,25 \text{ à } 0,65) \text{ W/m}^2$ mais son évaluation comporte toutefois certaines incertitudes (Solomon *et al.*, 2007).

1.3 Changements climatiques et observations récentes

Si plusieurs définitions sont proposées pour définir le changement climatique, celle proposée par Hengeveld le définit comme suit :

« Il s'agit d'une transformation ou l'altération à long terme du climat d'un lieu spécifique, d'une région ou de la planète entière. Cette transformation est mesurée par des changements qui se produisent dans certaines ou la totalité des caractéristiques associées au temps moyen, comme la température, le vent et les précipitations. Une variabilité différente du climat constitue également un changement climatique, même si les conditions météorologiques moyennes demeurent les mêmes. » (Hengeveld *et al.* 2002, p.1).

Fondé en 1988 par l'organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a pour mission l'évaluation de l'information de nature scientifique, technique et socio-économique, laquelle est nécessaire à une meilleure compréhension des fondements scientifiques et des risques liés aux changements climatiques d'origine humaine. Les travaux du GIEC visent également à cerner les conséquences possibles de ces changements et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation.

À cet effet, l'une des principales activités du GIEC consiste à procéder à intervalles réguliers à une évaluation de l'état des connaissances relatives aux changements climatiques. C'est ainsi qu'en 1990, 1995, 2001 et 2007, le GIEC a produit des rapports d'évaluation sur l'état des connaissances sur les changements climatiques. Ces rapports font la synthèse des informations les plus pertinentes sur le problème des changements climatiques. Dans ces rapports, le terme « changements climatiques » est employé pour désigner les transformations observables dans le temps, qu'elles soient causées par l'activité humaine ou par la variabilité naturelle du climat. Par ailleurs, dans la convention cadre sur les changements climatiques élaborée par l'organisation des Nations Unies (ONU), le terme « changements climatiques » renvoie uniquement aux changements attribuables directement ou indirectement aux activités humaines qui modifient la composition de l'atmosphère et qui ajoutent à la variabilité naturelle.

1.3.1 Températures moyennes globales

À l'échelle planétaire, les années 2005 et 1998 furent les deux années les plus chaudes depuis le début de la période de mesures instrumentalisée de la température de surface de l'air, ce qui remonte à 1850 (Solomon *et al.*, 2007). Ainsi, onze des douze dernières années soit sur la période 1995 à 2006, l'exception étant 1996, sont parmi les plus chaudes depuis le début de la série de mesures. La température superficielle moyenne globale a augmenté, particulièrement depuis 1950 environ. La tendance sur 100 ans (1906 à 2005), de $0,74\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,18\text{ }^{\circ}\text{C}$, est plus grande que la tendance de réchauffement sur 100 ans au moment du troisième rapport d'évaluation (1901-2000) de $0,6\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, à cause de ces années chaudes supplémentaires. L'augmentation totale de la température de 1850-1899 à 2001-2005 est de $0,76\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,19\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le taux de réchauffement moyenné pendant les cinquante dernières années ($0,13\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$ par décennie) est presque deux fois supérieur à celui des cent dernières années (Solomon *et al.*, 2007).

Les températures de surface des régions continentales ont augmenté plus rapidement que sur les océans dans les deux hémisphères. Les relevés disponibles sur de longues périodes présentent un taux significativement plus élevé de réchauffement sur les terres que sur les océans pendant les deux décennies passées (respectivement de $0,27\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ par décennie) (Solomon *et al.*, 2007).

Le réchauffement des trente dernières années s'étend sur l'ensemble du globe mais il est plus important aux hautes latitudes du nord. Le plus fort réchauffement apparaît pendant l'hiver de l'hémisphère nord (décembre à février) et au printemps (mars à mai) (Solomon *et al.*, 2007).

Au Canada, le réchauffement sur les 50 dernières années est de $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pour le Québec, un rapport produit par le consortium Ouranos et le Ministère du développement durable de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) indique que le réchauffement du climat est une réalité dans le Québec méridional (Yagouti *et al.*, 2006). Ce réchauffement est plus marqué

dans l'ouest et le centre du Québec et les températures annuelles moyennes ont enregistré une augmentation se situant entre 0,5 et 1,2 °C. Dans l'est de la province, le réchauffement du climat se produit à un rythme moins prononcé puisqu'il est inférieur à 0,5 °C. Par ailleurs, le réchauffement est plus marqué pour les températures nocturnes que pour les températures de jour. Enfin, les périodes hivernale et estivale sont celles ayant connu le réchauffement le plus marqué (Yagouti *et al.*, 2006).

Dans les régions nordiques, où la température de l'air a augmenté le plus, la température du pergélisol a notablement augmenté, plus spécifiquement de près de 2°C dans l'est de l'arctique canadien et le nord du Québec (Ouranos, 2007).

1.3.2 Changement du cycle de l'eau

La vapeur d'eau troposphérique augmente et l'humidité spécifique superficielle a généralement augmenté notamment depuis 1976 en relation avec les températures plus élevées tant sur la terre que sur l'océan. La quantité de vapeur d'eau totale a augmenté sur les principaux océans de $1,2 \pm 0,3$ % par décennie de 1988 à 2004 (Solomon *et al.*, 2007). La vapeur d'eau atmosphérique supplémentaire implique une disponibilité d'humidité accrue pour les précipitations (Solomon *et al.*, 2007).

Des tendances à long terme des précipitations de 1900 à 2005 ont été observées sur beaucoup de grandes régions. Une augmentation significative des précipitations a été observée dans l'est de l'Amérique du nord et du sud, en Europe du nord et en Asie du nord et centrale (Solomon *et al.*, 2007). Parallèlement, des augmentations substantielles d'événements de fortes précipitations ont été observées. Ces augmentations sont notables dans beaucoup de régions de la terre depuis environ 1950, même dans les régions qui ont vécu une réduction de la quantité des précipitations totales. Les observations mettent en évidence une augmentation de l'activité des cyclones tropicaux intenses dans l'Atlantique du nord depuis environ 1970 (Solomon *et al.*, 2007).

Bien que les précipitations aient augmenté dans beaucoup d'endroits sur la terre, les endroits souffrant de sécheresses plus longues et plus intenses ont également augmenté. Tandis que des sécheresses régionales ont eu lieu dans le passé, l'importante extension spatiale des sécheresses actuelles est relativement conforme aux changements attendus dans le cycle hydrologique en cours de réchauffement (Solomon *et al.*, 2007). La vapeur d'eau augmente avec l'augmentation des températures globales, à cause d'une augmentation de l'évaporation là où l'humidité de surface est disponible et cela tend à provoquer des précipitations. Cependant, des températures continentales en augmentation sont censées amener une plus grande évaporation et un plus grand assèchement, ce qui est particulièrement important dans les régions sèches où l'humidité de surface est limitée. Les changements dans la couche de neige et dans les schémas de circulation atmosphérique et dans le trajet des tempêtes peuvent également réduire l'humidité saisonnière disponible et contribuer à la sécheresse.

Au Québec, sur la période entre 1901 et 2005, les précipitations annuelles ont augmenté entre 6 et 8%, surtout pour les régions des hautes latitudes (30°N) et l'est de l'Amérique du Nord est devenu significativement plus humide. Cependant, sur une base saisonnière, il y a des indications moyennées sur l'ensemble du pays, de sécheresses estivales plus marquées au cours des années 40 et 50. Les conditions redeviennent généralement humides pendant les années 1960 à 1995, mais des conditions plus sèches sont encore observées après 1995 (Ouranos, 2007).

Enfin, plusieurs caractéristiques hydro-climatiques se sont modifiées durant les dernières décennies dont certaines sont associées au rythme de l'oscillation Nord-Atlantique (NAO). Ce phénomène est perçu comme un indicateur représentatif d'une certaine variabilité climatique, car des tendances au niveau des précipitations, des débits des rivières, de l'intensité et des trajectoires de dépressions et de l'ennuage sont observées. Toutefois, ce ne sont pas toutes les caractéristiques qui sont reliées aux changements climatiques (Ouranos, 2007 ; Solomon *et al.*, 2007).

1.3.3 Changements dans la cryosphère

La cryosphère stocke environ 75 % de l'eau douce mondiale. À l'échelle régionale, des variations dans la couverture neigeuse en montagne, les glaciers et des petites calottes glaciaires jouent un rôle important dans la disponibilité d'eau douce. Puisque la transformation de la glace en eau a lieu à des températures spécifiques, la glace est une composante du système climatique qui pourrait être soumise à un changement brusque après un réchauffement suffisant (Solomon *et al.*, 2007).

Les observations et les analyses de changements de la glace se sont élargies et se sont améliorées depuis le troisième rapport d'évaluation (GIEC, 2001). Ces observations concernent le rétrécissement du volume des glaciers de montagne, les diminutions de la couverture neigeuse, les changements du permafrost, les sols gelés, des réductions des sols saisonnièrement gelés et le couvert de glace des rivières et des lacs. La couverture de neige a diminué dans la plupart des régions, particulièrement au printemps. Dans l'hémisphère nord, la couverture neigeuse observée au cours de la période 1966 à 2005 a diminué pour chaque mois, sauf en novembre et décembre, avec une baisse annuelle de 5% en moyenne à la fin des années 1980 (Solomon *et al.*, 2007).

1.4 Projections pour le futur

Les changements climatiques ne se limitent pas à un simple réchauffement. De la même façon que la fièvre est un symptôme de la maladie, c'est une caractéristique parmi d'autres, insuffisante pour décrire ces changements de façon détaillée. Dans le cas du réchauffement climatique, il faut prévoir l'évolution des précipitations, des tempêtes et tous les autres aspects importants du climat. Pour y parvenir, des simulateurs numériques du système climatique sont développés et sont constamment améliorés. Ces modèles sont connus sous l'acronyme MCG pour modèle climatiques globaux ou encore modèles de circulation générale.

Ces modèles ont été développés de façon à tenir compte des propriétés les plus importantes du système climatique qui inclut l'atmosphère, les océans, les surfaces continentales, les neiges et les glaces. En pratique, un MCG est un simulateur intégrant l'essentiel des connaissances du système climatique à travers des équations qui décrivent les liens existants entre les paramètres telles que la température, les vents, les courants océaniques et les concentrations de GES. Ces simulateurs sont utilisés afin de caractériser le climat en réponse à différents scénarios de forçage.

Comme bien d'autres sciences, celle du climat est incomplète sur certains points et sujette à des incertitudes. Ainsi, certains processus qui déterminent la sensibilité du climat vis-à-vis des gaz à effet de serre incluent plusieurs processus complexes et encore mal compris. Parmi ceux-ci, les interactions entre les nuages et le rayonnement devront faire l'objet de recherche (Le Treut et Gauthier, 2007). Les autres points critiques concernent les interactions entre les océans et l'atmosphère, la stabilité des grandes calottes glaciaires et certains des aspects liés au rôle climatique des aérosols (Le Treut et Gauthier, 2007).

Malgré ces incertitudes, tout indique que ces modèles ont désormais atteint un stade de développement tel que leur capacité à simuler de nombreux aspects du fonctionnement du système climatique nous rend de plus en plus confiants dans les projections de l'évolution du climat. Ainsi, les modélisateurs viennent de réaliser, à l'aide de différents MCG, des simulations du climat du XX^e siècle en utilisant différentes combinaisons de forçages naturels et de ceux liés aux activités humaines. Les résultats de ces recherches confirment que les modèles prenant en compte l'ensemble des forçages naturels (activité solaire et éruptions volcaniques) et anthropiques (effet de serre et aérosols liés aux activités humaines) conduisent aux simulations les plus réalistes de cette évolution (figure 1.1a) (Solomon *et al.*, 2007). Les modèles ne prenant en compte que les forçages naturels ou seulement les forçages anthropiques ne simulent pas adéquatement l'évolution du climat (Figure 1.1b).

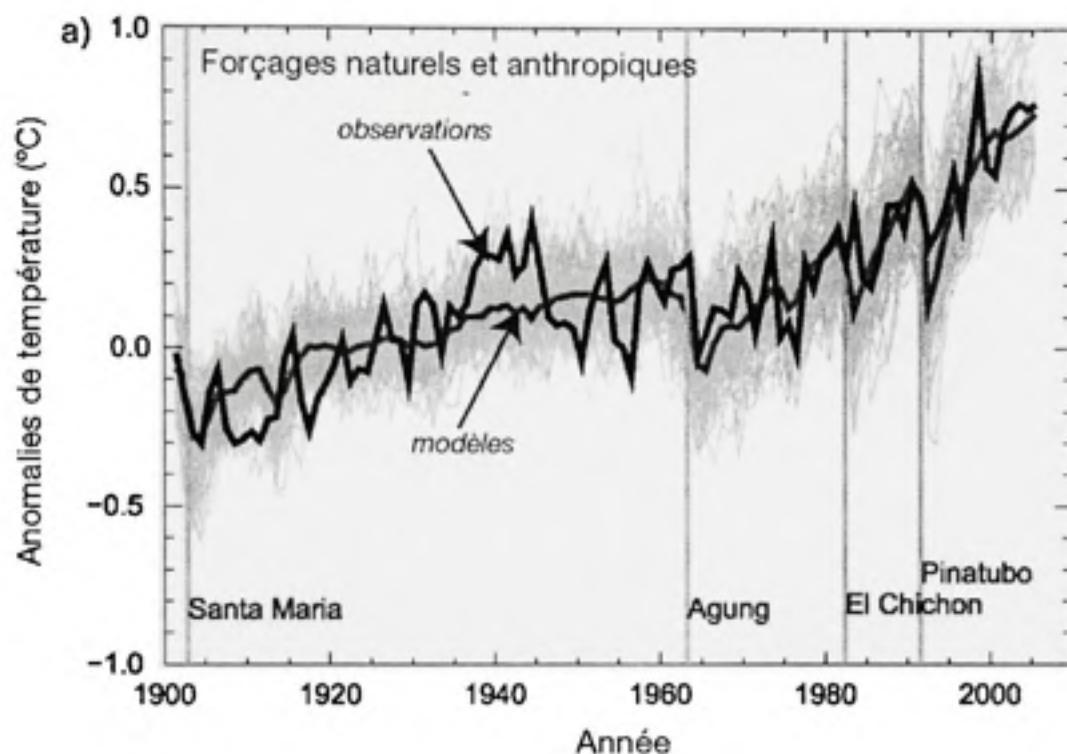


Figure 1.1a Variations des températures globales annuelles observées et modélisées avec contributions naturelles et anthropiques.

(Tiré de Solomon et al., 2007)

Source : Cette figure a été tirée du document de Solomon *et al.*, Résumé technique. Bilan 2007 des changements climatiques 2007: *Les bases scientifiques. Contribution du groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques*, p.64.

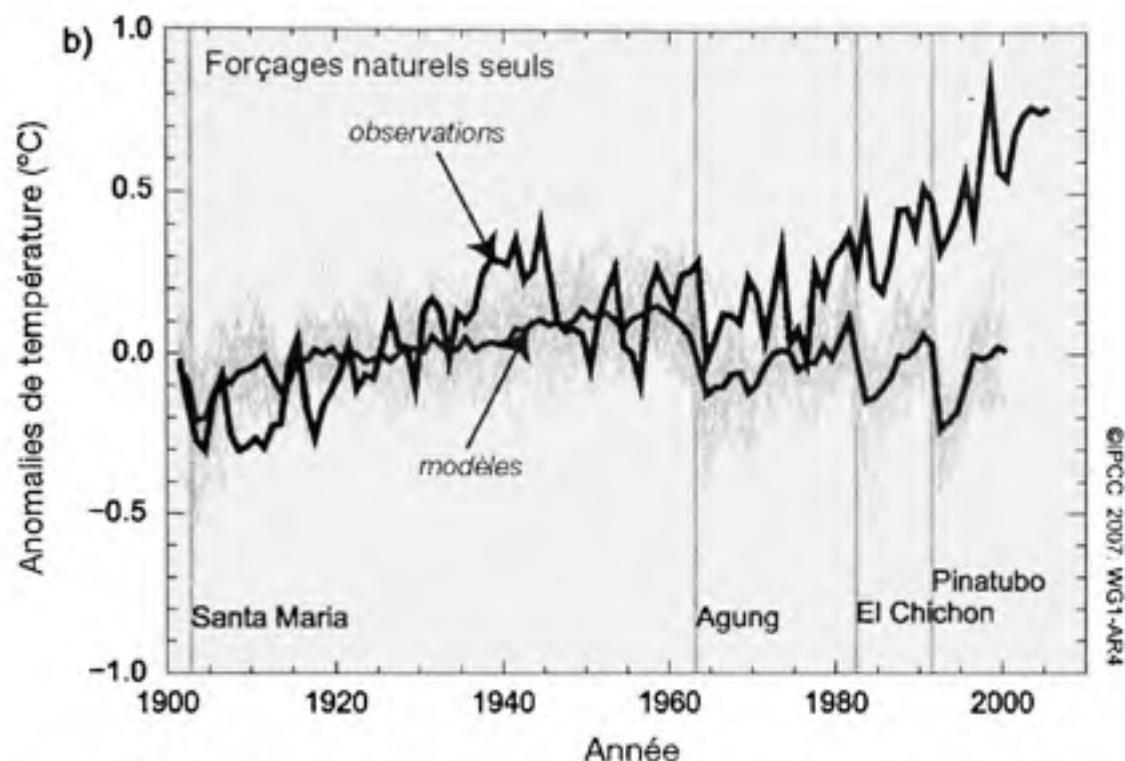


Figure 1.1b Variations des températures globales annuelles observées et modélisées avec contributions naturelles seulement.

(Tiré de Solomon *et al.*, 2007)

Source : Cette figure a été tirée du document de Solomon *et al.*, Résumé technique. Bilan 2007 des changements climatiques 2007: *Les bases scientifiques. Contribution du groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques*, p.64.

1.4.1 Scénarios d'émissions de GES

Afin d'évaluer différentes progressions possibles d'émissions de GES, le GIEC a modélisé un nombre restreint de scénarios d'émission de GES d'ici la fin du 21^e siècle. Ces scénarios sont fondés sur certaines hypothèses de croissance de la population, de croissance économique, de développement technologique et d'utilisation des énergies fossiles. Le détail de ces scénarios est représenté dans le *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) publié en 2000 par le Groupe de travail III du GIEC. Ces scénarios se divisent en quatre familles : A1, A2, B1 et B2.

En fonction des scénarios, les émissions de CO₂ (principal GES) varient différemment. La figure 1.2 présente les quantités et concentrations de CO₂ en fonction des scénarios d'émissions.

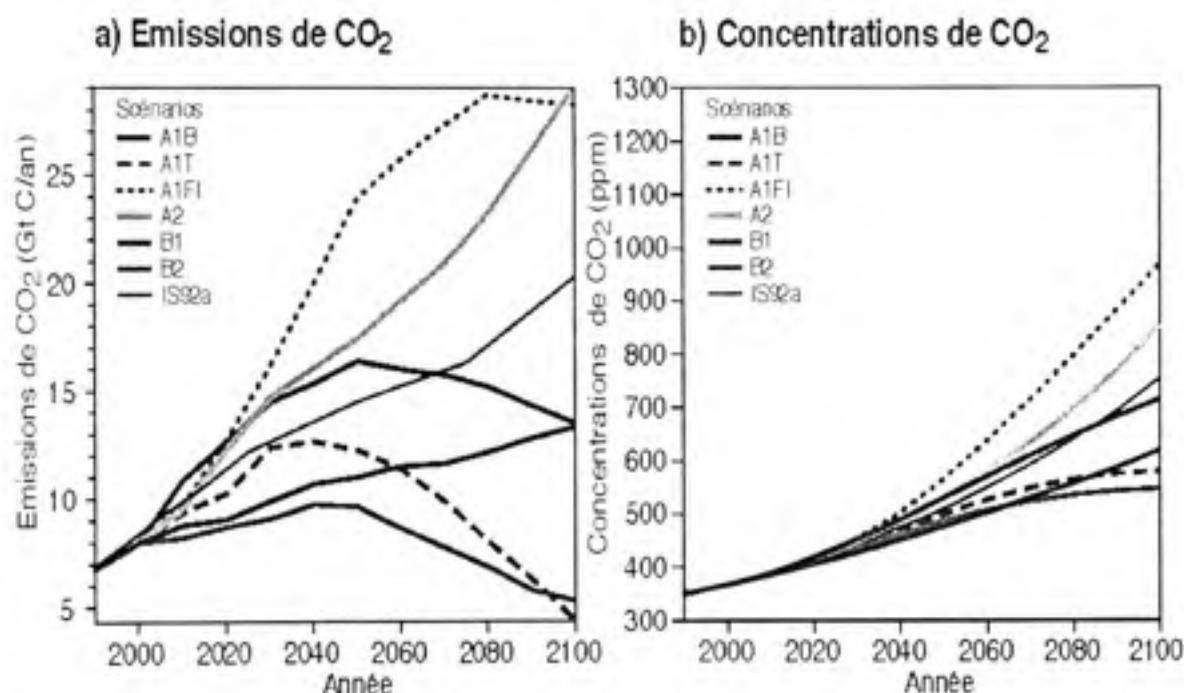


Figure 1.2 *Émissions et concentrations de CO₂ pour divers scénarios d'émissions.*
(Tiré de Ouranos, 2004)

Source : Cette figure est tirée du rapport du document *S'adapter aux changements climatiques* publié par Ouranos, 2004, p.7.

En regard aux projections climatiques du futur, ces scénarios d'émissions doivent être considérés comme équiprobables car selon le GIEC « il n'y a pas de scénario unique qui soit le plus vraisemblable ou le plus « plus central », ou qui exprime la meilleure intuition que ce soit parmi les scénarios SRES ou dans la documentation sous-jacente sur les scénarios » (GIEC, 2000). Par conséquent, lorsque des projections climatiques sont effectuées pour un horizon futur défini, plusieurs résultats sont obtenus en fonction des scénarios d'émissions employés.

1.4.2 Températures et précipitations

Selon l'ensemble des scénarios et des MCG, la température moyenne globale augmenterait de 1,1 à 6,4°C au cours du siècle. Sous les latitudes les plus nordiques, les hausses pourraient être supérieures d'environ 40% à la moyenne hémisphérique. De plus, sous les latitudes nordiques moyennes et élevées, les précipitations devraient s'accroître au cours de la deuxième moitié du XXI^e siècle, accompagnées de variations annuelles plus importantes.

Pour le sud du Québec (au sud du 50° N), les modèles climatiques suggèrent pour la fin du siècle un scénario moyen d'augmentation des températures en été de 2,5 à 6 °C avec des précipitations variant entre une diminution de 11% et une augmentation de 15%. En hiver, les températures seraient plus élevées de 3,5 à 8 °C avec une augmentation des précipitations variant entre 1 et 43% (Ouranos, 2007). Le tableau 1 présente les variations des températures et des précipitations pour le sud du Québec pour les horizons 2020, 2050 et 2080.

Tableau 1.1

Synthèse des changements climatiques projetés par rapport à 1961-1990
pour le sud du Québec
(Tiré de Ouranos, 2007)

Horizon		2020	2050	2080
Hiver	Température	1 à 2,5°C	2 à 5°C	3,5 à 8°C
	Précipitations	-5 à 19%	0 à 32%	1 à 43%
Été	Température	1 à 2°C	2,5 à 4°C	2,5 à 6°C
	Précipitations	-5 à 10%	-7 à 14%	-11 à 15%

Source : Ce tableau est tiré du site web Ouranos, 2007, «4e rapport du GIEC». En ligne. 7p. <http://www.ouranos.ca/intro/IPCC2007_f.html>. Consulté le 30 octobre 2007.

1.4.3 Hydrologie des bassins versants

Depuis la mise en perspective des changements prévus au climat par la communauté scientifique, les gouvernements et la population se sont de plus en plus intéressés aux conséquences possibles du réchauffement climatique. Au Québec comme ailleurs, de nombreux secteurs d'activités sont susceptibles de subir les contrecoups des changements climatiques. Dans le seul secteur de l'eau on peut nommer la gestion de l'eau (eaux potables et eaux usées), le transport maritime et la production hydroélectrique.

Au Canada, d'après l'étude pancanadienne de 1997 (Environnement Canada, 1997), la température et les précipitations annuelles vont augmenter dans la plupart des régions du pays incluant le Québec. Selon les régions, les débits fluviaux varieront à la hausse ou à la baisse mais la fonte de la neige devrait être plus hâtive partout. Les températures plus élevées se traduiront aussi par une hausse de l'évapotranspiration. Cette hausse pourrait se traduire par une diminution de l'humidité du sol, du niveau des nappes souterraines et des lacs. Par conséquent, une diminution de la qualité des eaux est possible. Finalement, la variabilité hydrologique pourrait également augmenter, ce qui se traduirait par une hausse des événements extrêmes tel que les inondations et des sécheresses plus longues (Hoffman *et al.*, 1998).

Pour la période hivernale, on prévoit une augmentation des débits car un adoucissement des températures hivernales augmenteraient la fréquence des dégels et des épisodes de pluie sur neige en hiver. Cette tendance s'observe déjà dans le cours supérieur de la rivière Saint-Jean au Nouveau-Brunswick (Beltaos, 1997). Les débits élevés et les embâcles qui en résulteraient augmenteraient le risque d'inondations hivernales dans plusieurs régions (Prowse, 2002). Ainsi, sur la rivière Grand, dans le sud de l'Ontario, la hausse des températures et l'accroissement des précipitations augmentent le risque d'inondations majeures en janvier et en février (Bellamy *et al.*, 2002). Parallèlement, le risque de formation d'embâcles pourrait diminuer, notamment pour les rivières plus au sud, puisque

l'augmentation appréciable des températures durant l'hiver pourrait faire en sorte que le couvert de glace ne se forme pas.

Pour la période printanière, puisqu'il s'accumulera moins de neige en raison de la fréquence des épisodes de fonte hivernale, l'amplitude des crues printanières pourrait diminuer. Cette tendance est prévue pour les cours d'eau alimentés par la fonte des neiges dans une bonne partie du sud du Canada.

En 1992, Morin et Slivitsky utilisaient les résultats du modèle de circulation générale du centre canadien de modélisation et d'analyse du climat (CCMAC, 1990) pour estimer les répercussions des changements climatiques sur le régime hydrologique de la rivière Moisie sur la Côte-Nord. De cette étude, une diminution de 5% du ruissellement annuel et une diminution de 35% des débits estivaux était prévue. Par ailleurs, les débits hivernaux seraient plus soutenus.

Sur le bassin de la rivière des Outaouais, quatre projections provenant des modèles canadiens CGCM2 et HadCM3 ont été étudiés en tenant compte de différentes évolutions possibles (Guay *et al.*, 2004). Les résultats pour le réservoir Baskatong montrent en particulier une diminution des apports en avril et mai pour le scénario chaud et sec. La diminution des précipitations neigeuses associées à des températures plus chaudes expliquent les résultats de ce scénario.

Sur le bassin versant de la rivière Châteauguay au sud-ouest de Montréal, une étude portant sur les crues extrêmes a été effectuée à l'aide des projections issues pour un seul scénario d'émissions de GES mais avec trois MCG différents (Mareuil, 2005). Pour le modèle prévoyant les températures les plus chaudes, une diminution de 35% des débits de pointe des crues printanières est envisagée. Par rapport à la période de référence, le devancement des crues varient entre 2 et 5 semaines. Pour les crues estivales, une hausse de 3,5% des débits de pointe est prévue pour un MCG alors qu'une diminution de 10% est prévue pour un autre MCG.

Une étude a été menée pour les lacs Saint-François et Aylmer et visait à développer une méthodologie pour évaluer le potentiel d'adaptation qu'offrent les plans de gestion des barrages aux changements climatiques (Fortin *et al.*, 2007). Les simulations hydrologiques faites à partir de plusieurs scénarios climatiques indiquent des modifications des apports, variant d'une augmentation de 13% à une baisse de 30%. Parallèlement, le devancement des crues de printemps et une augmentation de la sévérité des étiages étaient notés pour tous les scénarios. La simulation du plan de gestion actuel montre que certains scénarios de changements climatiques entraîneront un changement dans la gestion actuelle des barrages. Une adaptation du plan de gestion du barrage est envisageable, mais une solution unique pour l'ensemble des scénarios possibles de changements climatiques n'est pas possible.

1.4.4 Évènements extrêmes

L'impact le plus important sera vraisemblablement lié à la variation des événements extrêmes. Plusieurs études se sont portées sur la fréquence et l'amplitude des extrêmes à la suite d'un réchauffement climatique et elles indiquent que la variation de la moyenne sera fort probablement accompagnée d'une variation dans les extrêmes. Ces changements dans les extrêmes de températures mensuelles devraient être caractérisés par des extrêmes de températures chaudes plus élevés et des extrêmes de température plus froide moins sévères qu'aujourd'hui. Pour ce qui est des extrêmes de précipitations mensuelles, l'incertitude est plus grande que pour les températures, les résultats variant fortement entre les différents modèles.

Dans une distribution normale ou gaussienne, les extrêmes d'une variable météorologique se regroupent dans ce qu'on appelle communément la queue de la distribution. De ce principe, une faible variation dans la moyenne peut engendrer des changements importants dans les extrêmes. La figure 1.3 démontre ce principe pour les températures.

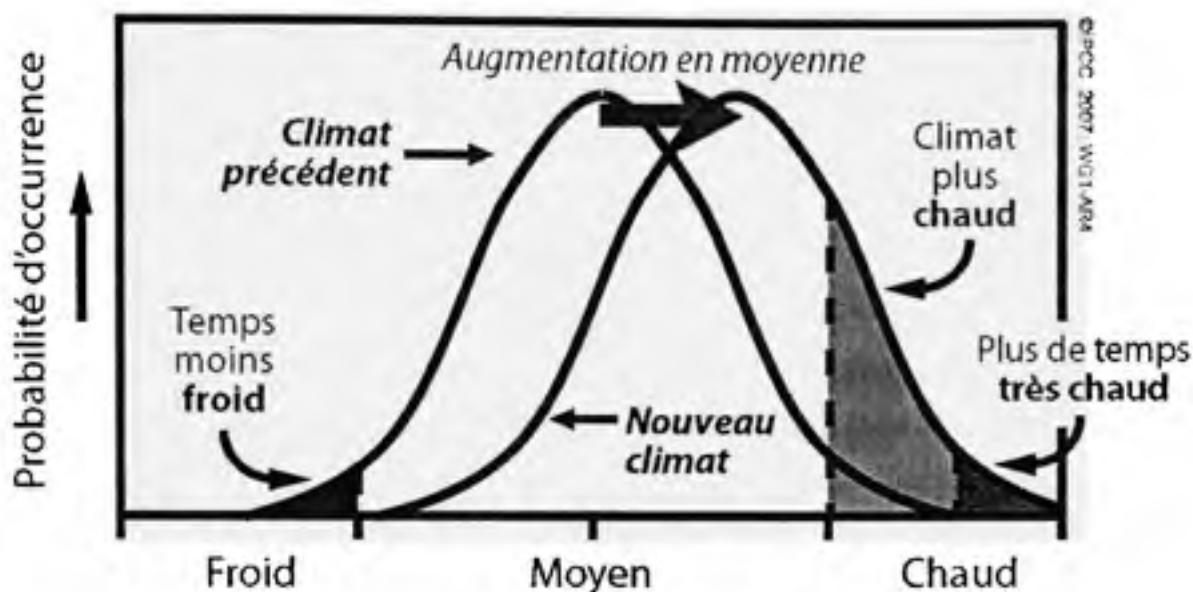


Figure 1.3 *Impact d'une hausse en moyenne des températures sur les extrêmes.*
(Tiré de Solomon *et al.*, 2007)

Source : Cette figure a été tirée du document de Solomon *et al.*, Résumé technique. Bilan 2007 des changements climatiques 2007: *Les bases scientifiques. Contribution du groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques*, p.54.

Le phénomène est plus complexe pour les précipitations qui suivent une distribution différente et il est difficile de prédire comment évoluera la variabilité naturelle du phénomène. Toutefois, l'analyse de fréquence des crues repose sur l'hypothèse de base que les tendances ou les cycles climatiques n'influent pas sur les débits de crue (Environnement Canada, 2004). Or il appert que cette hypothèse est erronée (Gosnold *et al.*, 2000) et que même de légers changements climatiques peuvent modifier considérablement l'ampleur des crues (Knox, 1993).

Considérant que plusieurs municipalités du sud québécois vivent à proximité de cours d'eau et d'ouvrages hydrauliques, il est nécessaire d'effectuer une surveillance particulière de l'évolution de cette problématique. Par conséquent, il est important d'établir des scénarios climatiques pouvant être utilisés dans des études d'impacts hydrologiques à petites et moyennes échelles.

1.5 Modélisation climatique pour les études d'impacts

Les études des impacts hydrologiques à l'échelle de bassins versants sont peu nombreuses au Québec. Cette situation s'explique par la difficulté d'obtenir des scénarios de changements climatiques fiables à l'échelle de bassin versant et ceci est d'autant plus vrai pour l'étude des phénomènes extrêmes. L'emploi des données provenant des MCG lors d'une étude d'impacts nécessite une bonne connaissance de la provenance des scénarios. L'évaluation du degré de confiance de ces scénarios permet d'optimiser leur utilisation dans le cadre d'une étude régionale et d'interpréter les résultats obtenus.

1.5.1 Résultats des modèles climatiques globaux

Si les MCG sont largement utilisés pour évaluer les répercussions possibles des changements climatiques futurs, l'emploi de leurs résultats comporte des limites qu'il est important de connaître. Premièrement, chaque modèle climatique possède sa propre formulation mathématique de certains processus physiques régissant le système climatique. Par exemple, la gamme des températures calculées pour un doublement de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère s'étend encore de 2 à 5 °C entre les modèles, cet écart provenant principalement de différences entre l'effet des nuages simulés par chaque modèle (Le Treut et Gauthier, 2007).

Le second facteur limitant l'emploi direct des résultats des MCG est la faible résolution horizontale des modèles, laquelle varie entre 200 et 400 km. Cette situation explique la difficulté d'employer les résultats des modèles dans l'étude des phénomènes extrêmes puisque ceux-ci sont influencés par des conditions locales. Par ailleurs, les résultats des MCG sont peu fiables pour des échelles de temps inférieures à un mois (Kilsby *et al.*, 1999; Prudhomme *et al.*, 2000). Par conséquent, il est difficile d'étudier les phénomènes extrêmes avec un modèle hydrologique fonctionnant à un pas de temps journalier ou horaire.

Toutefois, il est possible de convertir les résultats des scénarios de changements climatiques mensuels et de les utiliser avec des séries chronologiques journalières de températures et de précipitations. Les différentes méthodes sont présentées à la section suivante.

Enfin, un dernier problème quant à la simulation des phénomènes extrêmes par les MCG se pose par rapport à l'estimation de la variabilité. Les extrêmes se présentent aux limites de la variabilité simulée par les modèles alors que ceux-ci estiment avec difficulté la variabilité observée (Bell *et al.*, 2000). Une étude menée par Zwiers et Kharin en 1998 sur le modèle global canadien MCG2, démontre que les répercussions d'un doublement de CO₂ sont plus difficiles à analyser pour les extrêmes de précipitations que de températures, puisque les précipitations varient beaucoup plus spatialement et sur de plus petites échelles. L'effet global des conséquences de l'augmentation des concentrations de CO₂ est alors masqué, ce dernier étant relativement faible avec une légère augmentation de 4% des précipitations quotidiennes moyennes. Parallèlement, une analyse fréquentielle des résultats démontre une hausse relative plus importante pour les extrêmes que les précipitations moyennes. Le modèle climatique global canadien suggère une augmentation des extrêmes de précipitations quotidiennes au Canada de 14% des valeurs maximales pour une période de retour de 20 ans par rapport aux valeurs actuelles. Considérant que ces événements peuvent se produire dans des zones plus petites que les mailles du modèle, on peut s'attendre à une hausse plus importante que celle prévues par les modèles (Kharin et Zwiers, 2000; Zwiers et Kharin, 1998).

Enfin, si plusieurs modèles ont été développés à travers le monde, le GIEC recommande que les modèles répondent à quelques exigences pour que leurs résultats soient appliqués dans le cadre d'étude d'impact :

- Être entièrement couplés atmosphère-océan en 3 dimensions;
- Avoir été publiés dans une revue scientifique faisant l'objet d'un examen par les pairs;
- Avoir réalisé une simulation de contrôle sur plusieurs siècles afin d'en vérifier la stabilité;

- Avoir participé au Projet d'inter-comparaison des modèles (CMIP);
- Avoir une résolution d'au moins 4° en latitude.

1.5.2 Génération de projections régionales locales

Afin de prévoir l'effet des changements sur les régimes hydrologiques, le principe est d'intégrer les prévisions des MCG comme donnée d'entrée d'un modèle hydrologique. Toutefois, la principale difficulté concerne l'écart entre l'échelle spatiale puisque le modèle hydrologique nécessite comme intrants des variables météorologiques locales (température et précipitations).

Actuellement, trois méthodes sont disponibles pour générer des scénarios qui soient en adéquation avec la taille des bassins versants présents dans le sud du Québec : la mise à l'échelle ou downscaling dynamique, le downscaling statistique et la méthode des deltas. Par ailleurs, il est important de noter qu'à l'heure actuelle il n'existe pas de méthode admise universellement comme meilleure que les autres en toutes circonstances (Diaz-Netro et Wilby, 2005 et 2006).

1.5.2.1 Downscaling dynamique

Le downscaling dynamique est basé sur l'utilisation de modèles régionaux climatiques (MRC) alimentés par les MCG (Bergström *et al.*, 2001). Le principe de fonctionnement de ces modèles est similaire à celui des MCG, la principale différence se situant au niveau de l'échelle spatiale laquelle correspond à environ 0,5° x 0,5° au lieu de 3° x 4° pour les MCG. Les conditions aux limites de ces modèles sont fixées par les points de grille des MCG et ces modèles contiennent beaucoup plus d'informations physiographiques de la région à l'étude. Au Québec, le Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) (Laprise *et al.*, 2003 ; Frigon *et al.*, 2002 ; Caya et Laprise, 1999) correspond à cette approche. Le principal inconvénient de cette méthode est l'important temps de calcul nécessaire pour produire des projections climatiques.

1.5.2.2 Downscaling statistique

Wilby and Wigley en 1997 ont classé les méthodes de downscaling statistique en trois groupes: les méthodes de régression, les générateurs de climat et les approches de typage météorologique (weather pattern). Les méthodes de downscaling statistique sont plus accessibles et consistent en la détermination d'une relation statistique entre les variables climatiques à l'échelle globale prédite par les MCG et les variables météorologiques locales. Comparativement au downscaling dynamique, les méthodes de mise à l'échelle statistique nécessitent des capacités de calcul moins importantes. Par ailleurs elles sont plus adaptées pour une utilisation avec un modèle hydrologique car elle permettent notamment la prise en compte d'une certaine variabilité climatique (Wilby *et al.*, 2000; Wood et Maurer, 2002 ; Wood *et al.*, 2004).

Le laboratoire DRAME (Développement et Recherche Appliquée en Modélisation de l'Eau et de l'Environnement) de l'École de technologie supérieure a procédé à l'élaboration d'un générateur stochastique de climat uni-site nommé WeaGETS. Ce modèle permet de générer des séries chronologiques de température et de précipitations journalières au niveau local, soit de la station météorologique, pour un climat actuel et un climat futur (Caron, 2006). La seconde génération de ce type de générateur de climat est dite multi-site et se base sur le concept d'auto-corrélation spatiale. Ces générateurs ont pour objectif de produire des séries chronologiques de variables climatiques géographiquement corrélées contrairement aux générateurs de type uni-site (Khalili, 2007).

1.5.2.3 Méthodes des deltas

Plus simple que les deux méthodes précédentes, la méthode des deltas est encore répandue dans la littérature récente portant sur les impacts hydrologiques des changements climatiques (IPCC-TGCI, 1999; Wilby *et al.* 2004; Dooty *et al.* 2005). La méthode des deltas ou méthode incrémentale consiste à évaluer le changement d'une variable dans le futur par rapport au climat actuel : les simulations de la période de référence (1961-1990)

sont soustraites de celles de la période, par exemple 2010-2039. Cette étape élimine en partie les biais systématiques des MCG. Des moyennes mensuelles sur 30 ans sont utilisées (par exemple, la moyenne des hausses de température de 30 mois de mars). Ce changement est ensuite additionné aux mesures de la variable étudiée prises durant la période de référence à une station météorologique donnée. Les résultats sont ainsi ramenés à une échelle spatio-temporelle plus fine.

L'approche des deltas permet de fournir au projet plusieurs futurs équiprobables issus de plusieurs MCG. Compte tenu de l'incertitude inhérente aux modèles, la fiabilité des résultats en est augmentée puisque le véritable futur a davantage de chances de se trouver à l'intérieur de la fourchette générée.

Le principal inconvénient de la méthode des deltas est de générer une série future possédant la même variabilité que les observations passées, ce qui est peu probable. Une autre faiblesse de la méthode réside dans l'hypothèse que les biais des MCG sont les mêmes dans les simulations du futur que dans celles de la période de référence, or cette supposition n'est pas vérifiable.

1.6 Modélisation du cycle hydrologique

1.6.1 Cycle hydrologique

Si l'hydrologie est une très vieille science, son évolution a toutefois été très lente dans l'histoire de l'humanité. Déjà dans l'antiquité, Aristote (384-322 av. J.-C.) étudia certains phénomènes météorologiques et hydrologiques. Mais l'hydrologie a connu son véritable essor dans les années 1930 avec le développement agricole, industriel et social et la croissance démographique, accompagnés d'une amélioration du niveau de vie, ont obligé les ingénieurs et les planificateurs à penser sérieusement à l'éventualité d'une pénurie d'eau à plus ou moins long terme. La naissance de nouveaux besoins exigeait des volumes d'eau de plus en plus grands et la pollution industrielle apparaissant, les disponibilités de la ressource

hydrique diminuaient. Les gens ont compris que l'étude approfondie de cette ressource était indispensable afin de planifier son utilisation de manière optimale et rationnelle pour les années à venir.

Le cycle hydrologique englobe les différents phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre. Cette définition implique que les mécanismes régissant le cycle hydrologique ne surviennent pas les uns à la suite des autres, mais sont également concomitants. Par conséquent, le cycle de l'eau n'a ni commencement, ni fin. Ainsi les précipitations, l'évaporation, la transpiration des végétaux, l'interception, le ruissellement, l'infiltration, la percolation, l'emmagasinement et les écoulements souterrains composent les principaux processus du cycle hydrologique. Ces divers mécanismes sont rendus possibles par un élément, le soleil, véritable moteur du cycle hydrologique.

1.6.2 Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique est employée à plusieurs fins. Outre l'aspect de la prévision des crues, la modélisation hydrologique peut servir entre autres à la gestion des barrages et à la conception d'ouvrages hydrauliques. Plusieurs types de modèles hydrologiques existent. La description des processus conduit à trois classifications pour discriminer les modèles selon les processus d'écoulement dans la partie continentale, le domaine spatial et le domaine temporel.

1.6.2.1 Modèles globaux et distribués

Un modèle global implique qu'aucune discrétisation spatiale n'est utilisée. Le bassin versant ou un sous-bassin est considéré comme un tout et les conditions (précipitations, températures, occupation du sol, etc.) sont uniformes sur l'ensemble de cette entité. Le principal avantage de ces modèles est que le traitement de calcul est court comparativement à celui des modèles distribués. Le désavantage est que les conditions d'un bassin versant ne

sont jamais uniformes et par conséquent ces modèles ne peuvent pas traiter cette hétérogénéité.

Un modèle distribué permet une discrétisation du bassin versant en plusieurs sous-unités dans lesquelles les conditions sont considérées comme uniformes. Les modèles distribués sont en principe plus performants que les modèles globaux s'ils sont supportés par une base de données adéquate. Le principal désavantage de ces modèles réside dans leur dépendance à l'égard de données parfois non disponibles et la mise en œuvre de ces modèles s'avère fastidieuse.

1.6.2.2 Modèles conceptuels et empiriques

Comparativement à un modèle physique, un modèle conceptuel impose des simplifications dans la formulation mathématique des processus physiques d'écoulement, afin de tenir compte de la disponibilité des données ou pour accélérer le temps de calcul. La classe des modèles conceptuels inclut plusieurs solutions selon le degré de simplification apportée à la formulation mathématique. Si les simplifications sont mineures, le modèle conceptuel s'approche du modèle physique. Si les simplifications sont importantes, il s'approche plus du modèle empirique.

Les modèles empiriques ne tentent pas de décrire les processus physiques d'écoulement, mais proposent une formulation mathématique de la réaction à une action à partir de comportements ou de patrons présents dans la base de données. La méthode rationnelle et la méthode de l'hydrogramme unitaire correspondent à ce type de modèle. Ces modèles empiriques sont utilisés pour les applications simples ou pour des études préliminaires sur de petits bassins versants.

1.6.2.3 Modèles événementiels et continus

Les modèles événementiels ont pour objectif de reproduire des événements particuliers un à la fois éliminant ainsi le besoin de décrire les cheminements lents qui soutiennent les écoulements entre les précipitations. Ces modèles sont souvent employés pour reproduire des événements extrêmes, comme les crues. Le succès de ces modèles repose sur la définition des conditions initiales et antécédentes du bassin versant à l'étude.

Les modèles continus ont pour but de fournir des valeurs de débits sans arrêt d'un pas de temps à l'autre. Suivant la définition des conditions initiales du modèle, celui-ci peut fournir des sorties (débits) tant qu'il est alimenté par des données d'entrée (ex. précipitations et températures).

1.7 Modélisation hydraulique des zones inondables

1.7.1 Inondations

Les causes d'inondations sont nombreuses à l'échelle du Canada. La rupture de poches glaciaires dans les glaciers en Colombie-Britannique, les ouragans en Nouvelle-Écosse et les inondations côtières dans certaines régions riveraines des Grands Lacs en Ontario, les inondations présentent des caractéristiques bien régionales (CNRC, 1990). Mais le Canada est un pays nordique et la principale cause d'inondations est la fonte des neiges au printemps mais peut également être une combinaison d'embâcles de glace et de précipitations pluviales. Les inondations dues aux embâcles de glace peuvent survenir suite à un dégel printanier hâtif, en février par exemple, lorsque le couvert de glace est encore solide. Lors des périodes estivale et automnale, les averses de convection ou les pluies de longue durée peuvent aussi entraîner le débordement des cours d'eau, tel que le déluge du Saguenay en 1996.

Si les inondations sont des phénomènes naturels, leur amplitude peut toutefois s'accroître en raison des activités humaines. C'est ainsi que l'urbanisation a eu comme répercussion de réduire les temps de réponse, d'accroître les pointes de crue et d'un point de vue statistique, ces changements produisent des séries de données de crue enregistrées non stationnaires. L'urbanisation a aussi eu pour effet d'augmenter l'importance relative des crues dues aux pluies par rapport à celles provoquées par la fonte des neiges, en raison d'une augmentation du volume de ruissellement et d'une diminution de temps de réponse (Cook et Dickinson, 1986).

Dans le sud du Québec, pour les grands bassins versants, la principale cause d'inondations résulte de la fonte des neiges au printemps et se caractérise par un grand volume d'eau et généralement une pointe unique. Le ruissellement dû à la fonte des neiges peut durer de 1 à 2 mois et est généralement à l'origine du débit annuel maximal pour les bassins versants dont la superficie est supérieure à 500 km² (CNRC, 1990). Dans le sud de la province, dans la région de Montréal et des Cantons de l'est, les crues printanières débutent vers la fin mars et culminent vers la fin du mois d'avril. Ces crues comptent pour 30 à 50 % des débits annuels. Pour les bassins d'une superficie inférieure à 500 km², le maximum annuel est parfois le résultat d'un violent orage ou d'une pluie de longue durée en été ou en automne (CNRC, 1990).

1.7.2 Modélisation hydraulique

Bien que l'hydraulique soit une vieille science, le début de l'hydraulique « moderne » date de 1768, alors que l'ingénieur français Antoine Chézy développait la première équation pour le calcul des vitesses dans un canal pour un régime d'écoulement uniforme. Chézy était alors responsable de la conception des canaux pour alimenter en eau la ville de Paris. Plus de 100 ans plus tard, l'irlandais Robert Manning modifie l'équation de Chézy et définit les quatre principales équations (continuité, énergie, moment et Manning) pour l'analyse hydraulique des cours d'eau.

Si les équations étaient connues, le calcul manuel était toutefois fastidieux et le calcul d'une courbe de remous pouvait prendre de quelques jours à quelques semaines pour les ingénieurs de l'époque. Ce n'est que dans les années 1960, avec l'avènement de l'informatique, que les premières méthodes de calcul automatisées voient le jour.

1.7.2.1 Données topographiques

Peu importe le modèle employé pour définir le profil de la surface d'écoulement, le facteur le plus critique quant à la qualité des résultats repose sur les données topographiques du lit de la rivière et de la plaine d'inondation (Nicholas et Walling, 1997; Horritt et Bates, 2001; Casas *et al.*, 2006). Ces données influencent à la fois le calcul des vitesses d'écoulement, des niveaux atteints et par conséquent de l'étendue de la zone inondée. Il faut donc être vigilant quant à la façon d'acquérir ces données (relevés terrestres ou aéroportés, résolution, précision, etc.). Le choix de la méthode repose notamment sur la résolution recherchée, le temps de calcul et les coûts d'acquisition et de traitement de ces données.

Par ailleurs, des travaux visant à établir les résolutions optimales pour les modèles hydrauliques unidimensionnels (Gueudet, 2004; Casas *et al.*, 2006) et bidimensionnels (Bates *et al.*, 2003) ont été effectués. Les travaux de Gueudet et Casas démontrent l'importance de la précision des données topographiques.

Par ailleurs, Casas *et al.* (2006) mettent en évidence l'importance de la source altimétrique employée afin de déterminer une zone inondable. Leur approche a consisté à tester 7 MNT sur un tronçon de cours d'eau de 2 km à l'aide du modèle hydraulique soit HEC-RAS (USACE, 2005). Les MNT sont générés à partir de trois sources altimétriques : relevés topographiques et bathymétriques à l'aide d'un système GPS (Global Positioning System); relevés laser aéroportés LiDAR (Light Detection and Ranging) et par une cartographie vectorielle à l'échelle 1 :5 000. En fonction de la topographie utilisée, l'extension spatiale de la crue et la hauteur moyenne de la surface libre varient passablement. Les meilleurs résultats sont obtenus à l'aide de la topographie générée à l'aide du LiDAR, de la

bathymétrie et de relevés GPS. Les pires résultats sont obtenus à l'aide de la cartographie vectorielle employée seule.

Par ailleurs, si la qualité des données topographiques est importante, le relevé des contrôles hydrauliques l'est tout autant. Enfin, la qualité des jaugeages est également nécessaire à une bonne simulation des écoulements.

1.7.2.2 Modèles hydrauliques

L'emploi des modèles hydrauliques est intimement lié aux données topographiques disponibles car celles-ci forment la structure géométrique du modèle. Dans le cas d'une rivière, les écoulements lors de débordement se font à la fois sur les lits mineur et majeur. Les caractéristiques de l'écoulement soit la vitesse, la profondeur d'eau et la rugosité varient significativement d'un lit à l'autre. La berge (l'interface entre les lits) est importante car elle est la source de la majorité des incertitudes pour la simulation des écoulements débordant. Geoffroy (2007) identifie trois types de pertes de charges dans cette zone et à l'interface entre le fond de la rivière et du fluide. Le premier type (1) sont les pertes par frottement causées par les micro-turbulences au fond du cours d'eau, le second (2) type est dû aux macro-turbulences issues de la différence entre les vitesses entre les lits et enfin le troisième (3) est causé par le transfert des quantités de mouvement entre les lits.

La majorité des modèles unidimensionnels (1D) à lits composés comme HEC-RAS (USACE, 1995) et Mike 11 (DHI, 1993) traitent les pertes d'énergie de type 1, tandis que des modèles plus développés tentent de prendre en compte les trois types. Toutefois, la principale caractéristique des modèles 1D est qu'ils moyennent la hauteur d'eau (et pour certains la vitesse) sur chaque profil perpendiculaire aux lits mineur et majeur. Cette situation provient de leur structure et des équations qui les régissent (Saint-Venant 1D) puisqu'ils sont constitués d'un ensemble de sections perpendiculaires à l'écoulement. Cette situation constitue la principale faiblesse de ces modèles car les surfaces libres lors de crues

ne sont pas horizontales et les champs de vitesses ne sont pas uniformes pour une section donnée (Geoffroy, 2007).

Les modèles bidimensionnels tentent de reproduire ces variations, car ils sont construits sur un réseau maillé permettant de calculer les vitesses et hauteur d'eau pour chaque maille du modèle. Les équations de ces modèles (Saint-Venant 2D) sont intégrées sur la verticale et donnent des champs de vitesses pouvant varier dans le plan mais pas sur la hauteur. Si ces modèles sont très intéressants, le temps de calcul demeure toutefois important et le calibrage de ces modèles demeure plus exigeant. Enfin, ces modèles utilisent différentes hypothèses pour simuler la turbulence.

Les modèles tridimensionnels (3D) ne sont employés actuellement que pour des zones d'études très restreintes de l'ordre de quelques dizaines de mètres de cours d'eau. Puisqu'ils intègrent les équations complètes de Navier-Stokes, ces modèles peuvent calculer les écoulements dans le plan et sur la verticale. Mais les temps de calcul de ces modèles sont très longs, limitant ainsi leurs utilisations à des problématiques très spécifiques où les caractéristiques des écoulements varient significativement dans les trois dimensions.

1.7.3 Cartographie des zones inondables au Québec

Bien que le phénomène des inondations soit problématique depuis longtemps, la modélisation des crues et la cartographies des plaines inondables sont des disciplines relativement récentes. Au Québec, les premières cartes du risque d'inondation pour certaines rivières ont été publiées en 1978 à la suite d'une convention Canada-Québec. Suite aux inondations majeures survenues au cours des années 1974 et 1976 dans plusieurs régions du Québec, les gouvernements québécois et canadien ont signé une entente sur les politiques à adopter afin de réduire les dommages causés par les inondations. Ce programme a été en vigueur de 1976 à 2001 et a permis de réaliser la cartographie officielle des zones inondables sur le territoire d'environ 245 municipalités. Plus de 500 cartes du risque

d'inondation ont alors été produites lesquelles représentent l'étendue des zones inondées par des crues de récurrence de 20 ans et de 100 ans (CEHQ, 2008a).

En juillet 1996, le Québec a connu des pluies diluviennes qui ont causé des crues exceptionnelles dans les régions du Saguenay-Lac-Saint-Jean, de la Capitale-Nationale, de la Mauricie et de la Côte-Nord. Suite à ces événements, le gouvernement du Québec a mis sur pied la Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages. En janvier 1997, la Commission publie son rapport (Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages, 1997) dans lequel elle formule diverses recommandations, dont plusieurs vise à éviter ou à limiter les dommages lors d'inondation. Pour donner suite à ces recommandations, le ministère de l'Environnement du Québec lançait en août 1998 le programme de détermination des cotes de crues (PDCC) de récurrence de 2, 20 et 100 ans, lequel visait 155 nouveaux secteurs de lacs et de rivières (CEHQ, 2008a). La zone touchée par la crue 20 ans est communément appelée la « zone de fort courant » alors que la zone localisée entre les crues 20 et 100 ans est appelée « zone de faible courant ».

Les cartes issues de ces programmes ne donnent pas d'information relative à la réglementation applicable dans les zones inondables qu'elles représentent. La Loi sur l'aménagement et l'urbanisme prévoit que les municipalités régionales de comté (MRC) et les municipalités locales sont responsables de déterminer les zones à risque d'inondation sur leur territoire et de les réglementer. À cette fin, les MRC et les municipalités peuvent elles-mêmes réaliser leur propre cartographie des zones inondables (CEHQ, 2008a).

Jusqu'à présent, la production de ces cartes a reposée sur l'emploi de modèles hydrauliques unidimensionnels. L'assemblage et le calage des modèles sont effectués à l'aide de jaugeages, de relevés topographiques et bathymétriques. Toutes les cartes des zones inondables produites correspondent à des niveaux pouvant être atteints en eau libre. Par conséquent, les niveaux d'eau pouvant se présenter lors de la présence d'embâcles de glace n'ont pas fait l'objet d'une cartographie.

Enfin, la collecte de nouvelles données et l'amélioration des technologies permettent aujourd'hui de mettre à jour les zones inondables de secteurs déjà cartographiés. Ainsi, les rivières des Prairies, des Mille-Îles, des Outaouais, Chaudière et Richelieu ont fait l'objet de nouvelles études de révision des cotes de crues. D'autres secteurs pourraient s'ajouter au cours des prochaines années (CEHQ, 2008a).

CHAPITRE 2

Description du bassin versant de la rivière du Nord

2.1 Études antérieures

De nombreuses études ont été réalisées sur le bassin versant de la rivière du Nord. Les premières études ont été réalisées par la Commission des eaux courantes, entre les années 1918 jusqu'à sa fermeture vers 1950. Ces études avaient pour but d'établir les caractéristiques du bassin versant, notamment pour la régularisation des eaux de la rivière. Depuis, d'autres études ont été réalisées afin de mieux connaître les différents aspects du bassin versant : géologie, géomorphologie, pédologie, climatologie, hydrographie et démographie. Bon nombre de ces études ont servi directement ou indirectement au projet actuel que ce soit pour la description du bassin versant ou encore pour l'élaboration du modèle hydrologique.

En 1960, la première étude publiée par le Ministère de l'Agriculture du Canada présente les résultats portant sur les sols des comtés d'Argenteuil, Deux-Montagnes et de Terrebonne (Lajoie, 1960). En 1978, dans le cadre du « programme de reconnaissances intégrées des ressources en eaux », le service des Relevés du ministère des Richesses naturelles a entrepris l'étude physique et humaine du bassin hydrographique de la rivière du Nord. Dans ce rapport, Desmeules et Gélinas (1978) fournissent les caractéristiques du bassin versant ainsi que de son réseau hydrographique.

En 2006, l'Agence de bassin versant de la rivière du Nord (Abrinord) publie *Portrait diagnostique du Bassin versant de la rivière du Nord* (Abrinord, 2006). Réalisé dans la foulée de la *Politique nationale de l'Eau* publié en 2002, ce document comprend une caractérisation du territoire ainsi qu'un diagnostic sur la qualité de l'eau et les systèmes aquatiques et dresse les principaux enjeux liés à l'eau sur le territoire ainsi que des pistes de solution.

Le problème des inondations a également fait l'objet d'études et de nombreux secteurs de la rivière jugés problématiques ont fait l'objet d'une cartographie officielle. Les premiers rapports s'inscrivent dans le cadre de la Convention entre le gouvernement du Canada et le gouvernement du Québec relative à la cartographie et à la protection des plaines inondables. Dans le cadre de ce programme, les secteurs de la rivière du Nord localisés entre Lachute et Saint-Jérôme (1989) et à Piedmont (1991) furent cartographiés. Plus récemment, soit en 2003 et 2004, d'autres secteurs de la rivière du Nord furent cartographiés dans le cadre du Programme de détermination des cotes de crues 20 ans et 100 ans (PDCC). Ce programme était l'initiative du ministère de l'Environnement du Québec.

2.2 Bassin versant de la rivière du Nord

La rivière du Nord (figure 2.1) est un tributaire de la rivière des Outaouais et possède un bassin versant de 2 214 km². Elle s'écoule du nord vers le sud sur une distance de 141 km jusqu'à la rivière des Outaouais, à Carillon. Le bassin versant est compris entre les latitudes 45° 31' et 46° 14' d'une part et les longitudes 73° 56' et 74° 34' d'autre part. Le bassin versant est borné à l'ouest et au nord par celui de la rivière Rouge. Il est borné à l'est et au nord-est par celui de la rivière l'Assomption et au sud-est par les bassins des rivières Mascouche, du Chicot et du Chêne.

2.2.1 Climatologie du bassin versant

Deux régions physiographiques sont rencontrées dans le bassin versant du Nord, lesquelles sont décrites ultérieurement. Ainsi, sur sa partie septentrionale, sur le plateau laurentien, le climat est de type subpolaire. Dans la région des basses terres au sud, le climat est de type continental subhumide de type tempéré.

Afin de caractériser le climat actuel des deux régions, certaines stations ont été utilisées (Tableau 2.1). Ainsi, les stations de Sainte-Agathe-des-Monts, Saint-Hyppolite et de Harrington sont utilisées pour le plateau laurentien. Pour la région des basses terres, les stations de Saint-Jérôme et de Lachute sont utilisées.

Tableau 2.1

Stations météorologiques sur le bassin versant de la rivière du Nord

Région	Plateau laurentien			Basses terres	
Localisation	Ste-Agathe-des-Monts	Saint-Hippolyte	Harrington	Saint-Jérôme	Lachute
# station	7036762	7037310	7032997	7037400	7033650
Latitude	46,05 N	45,98 N	45,85 N	45,80 N	45,65 N
Longitude	74,28 O	74,0 O	74,63 O	74,05 O	74,33 O
Altitude (m)	395	366	183	169	91

Pour les deux régions physiographiques, le mois de janvier est le plus froid et celui de juillet, le plus chaud. En termes de précipitations totales annuelles (pluie et neige), les deux régions reçoivent essentiellement la même quantité. La principale différence se situe au niveau des précipitations solides (neige) lesquelles sont supérieures sur le plateau laurentien (307 cm vs. 222 cm).

Les tableaux 2.2 et 2.3 présentent respectivement les températures et précipitations moyennes mensuelles pour chacune des régions physiographiques.

Tableau 2.2

Températures mensuelles sur le bassin de la rivière du Nord (1966 à 1990)

Mois	Plateau Laurentien			Basses terres		
	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmoy (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmoy (°C)
Janvier	-7,8	-18,6	-13,2	-6,6	-16,5	-11,5
Février	-5,3	-16,9	-11,1	-4,3	-14,7	-9,5
Mars	0,8	-10,5	-4,8	1,5	-8,3	-3,4
Avril	8,5	-2,1	3,2	10,1	-0,3	4,9
Mai	17,2	4,9	11,1	18,6	6,6	12,6
Juin	21,4	9,8	15,6	23,3	11,6	17,5
Juillet	23,9	12,4	18,1	25,7	14,2	20,0
Août	22,4	11,4	16,9	24,2	13,2	18,7
Septembre	16,8	6,6	11,7	18,7	8,2	13,4
Octobre	10,0	1,1	5,5	11,7	2,4	7,0
Novembre	2,3	-5,2	-1,4	3,9	-3,4	0,3
Décembre	-4,9	-14,6	-9,7	-3,4	-12,1	-7,7
Annuel	8,8	-1,8	3,5	10,3	0,1	5,2

Tableau 2.3

Précipitations mensuelles sur le bassin versant de la rivière du Nord (1966 à 1990)

Période	Plateau laurentien			Basses terres		
	Pluie (mm)	Neige (cm)	Total (mm)	Pluie (mm)	Neige (cm)	Total (mm)
Janvier	19,2	69,5	88,8	29,5	56,2	85,7
Février	15,9	58,5	74,4	22,1	44,5	66,6
Mars	34,0	45,5	79,5	39,5	36,6	76,0
Avril	60,5	16,3	76,8	76,8	7,1	83,9
Mai	90,7	1,8	92,5	92,5	0,2	92,7
Juin	114,7	0,0	114,7	108,1	0,0	108,1
Juillet	102,2	0,0	102,2	99,3	0,0	99,3
Août	108,6	0,0	108,6	99,3	0,0	99,3
Septembre	102,2	0,2	102,4	101,9	0,0	101,9
Octobre	94,8	5,1	99,9	96,4	1,5	97,9
Novembre	62,0	33,9	95,9	79,3	20,4	99,7
Décembre	27,0	75,7	102,7	31,4	56,1	87,4
Annuel	831,8	306,6	1138,4	875,9	222,4	1098,2

2.2.2 Régions physiographiques

Tel que mentionné précédemment, le bassin versant de la rivière du Nord comporte deux régions physiographiques distinctes: le plateau laurentien dans sa portion amont et les basses terres du Saint-Laurent en aval.

La description de ces régions est effectuée par Lajoie (1960) et se lit comme suit :

« Le plateau laurentien, domine les basses terres et est bien séparé de celles-ci par un escarpement bien défini au pied duquel coule un tronçon de la rivière du Nord. Cet escarpement, appelé laurentien passe par Ogdensburg (Brownsburg-Chatham), Lachute et Saint-Jérôme. Le plateau, qui fait partie du Bouclier Canadien, présente un relief varié, allant de vallonné, au sud, à montagneux au nord. Quelques sommets atteignent au-delà de 610 m et sont

concentrés sur la limite nord du bassin. En général, la topographie de cette région suit de près le relief inégal des assises précambriennes sous-jacentes. Certaines vallées fortement encaissées serpentent dans la région accidentée. [...].

Les dépôts de till glaciaires couvrent la majeure partie du plateau. Ils consistent en un mélange de matériaux hétérogènes dont la grosseur varie depuis l'argile, le limon et le sable, jusqu'au gravier et aux grosses pierres. Les tills proviennent de l'assise rocheuse locale sous-jacente. La profondeur des dépôts de till sur l'assise rocheuse varie entre quelques centimètres jusqu'à plus de 13 m dans certaines parties de la région élevée [...].

Par ailleurs, environ 75 % des précipitations annuelles totales ruissellent dans la région du plateau Laurentien. Un ruissellement de cette importance influe sur la formation des sols par le délavement, l'érosion superficielle et la resédimentation des matériaux érodés. [...].

Le relief des basses terres du Saint-Laurent est pratiquement inexistant, exception faite des collines de Saint-André, au nombre de deux, qui s'élèvent à des altitudes d'environ 110 et 125 m. C'est une plaine parsemée de faibles ondulations. Cette plaine est caractérisée par des dépôts fluvio-glaciaires, de texture fine, reposant sur une forte épaisseur de sédiments marins argileux. Ces argiles sont généralement massives et très uniformes. Leur profondeur dépasse souvent 30 m et dans certains cas des puits artésiens sont forés dans 60 m d'argile [...].

La région des basses terres offre deux particularités notables; des escarpements abrupts et de profonds ravins attribuables à l'action des cours d'eau sur l'argile facile à éroder. Les escarpements représentent les anciennes berges de la rivière des Outaouais. Ces berges courent généralement de l'ouest vers l'est, bien qu'à certains endroits la direction puisse être modifiée par la présence de matériaux moins sujets à l'érosion, comme le till ou l'assise rocheuse. » (Lajoie, 1960)

2.2.3 Utilisation du sol

L'analyse du bassin versant démontre que le territoire forestier occupe la plus grande partie du bassin versant et est principalement de propriété privée. La superficie forestière couvre plus de 1 600 km², soit environ 73% du territoire. La prépondérance de la forêt privée à l'intérieur du bassin versant contraste fortement avec la situation observée à l'échelle régionale des Laurentides où la plus grande partie de la forêt (plus de 70 %) se situe en terre

publique (AFPL 2001; MAPAQ 1998). Les terres agricoles constituent la deuxième forme d'occupation du sol en importance avec 13 % du territoire couvert par le bassin versant (incluant les pâturages et les terres en friche). Les zones urbanisées occupent environ 6% du bassin versant.

Le bassin versant de la rivière du Nord compte environ 1140 lacs, lesquels couvrent une superficie de 108 km² soit environ 5% de la superficie du bassin versant (MRNFP, 2004). Toutefois, seulement 40 lacs possèdent une superficie de plus de 0,5 km² et la majorité (745) possèdent une superficie inférieure à 0,05 km². Par ailleurs, la très grande majorité des lacs se trouvent dans la région du plateau Laurentien. Selon l'analyse des cartes écoforestières, les milieux humides couvrent près de 55 km² (2 %) du bassin versant de la rivière du Nord (MRNFP, 1998). Les tableaux 2.4 et 2.5 présentent respectivement l'utilisation des sols et les caractéristiques des principaux lacs du bassin versant de la rivière du Nord.

Tableau 2.4

Utilisation des sols sur le bassin versant de la rivière du Nord
(Tiré d'Abrinord, 2006)

Utilisation	Superficie (km ²)	Occupation (%)
Forêt privée	1506	68
Forêt publique	112	5
Terres agricoles	288	13
Eau et milieux humides	132	6
Urbain	132	6
Récréo-touristique	22	1
Non-classifié	22	1
Total	2 214	100

Source : Les superficies indiquées dans ce tableau sont tirées du document d'Abrinord, *Portrait et diagnostic du Bassin versant de la rivière du Nord – Version complète*, p.6.

Tableau 2.5

Caractéristiques des principaux lacs du bassin versant de la rivière du Nord
(Tiré d'Abrinord, 2006)

Lac	Superficie (km ²)	Bassin versant à l'exutoire (km ²)	Rapport longueur/largeur
Montagne Noire	2,83	13,3	1,73
Brûlé	2,13	160	2,42
Manitou	4,11	24,0	2,60
Des Sables	2,97	38,9	3,89
Masson	2,50	35,2	1,31
Louisa	4,42	21,3	1,92

Source : Les superficies indiquées dans ce tableau sont tirées du document d'Abrinord, *Portrait et diagnostic du Bassin versant de la rivière du Nord – Version complète*, p.23.

2.2.4 Hydrographie et inondations

La rivière du Nord prend sa source dans le lac de la Montagne-Noire et dans une chaîne de lacs dont le lac Brûlé est le plus important. Les principaux tributaires de la rivière du Nord sur sa rive droite (ouest) sont de l'amont vers l'aval, le ruisseau Noir, les rivières aux Mulets, à Simon, la Bellefeuille, la Bonniebrook, le ruisseau Williams et la rivière de l'Ouest. Sur sa rive gauche (est) elle reçoit les eaux des rivières Doncaster et Saint-André.

Le réseau hydrographique du plateau laurentien diffère en plusieurs aspects du réseau hydrographique des basses terres du Saint-Laurent. En moyenne, la rivière du Nord possède une pente de 3,1 m/km, pour une dénivellation de 430 m entre la source et l'exutoire. Dans la région du plateau Laurentien, en amont de Saint-Jérôme, la rivière possède une pente de 4,3 m/km. À la hauteur de Saint-Jérôme, la rivière quitte le plateau laurentien pour la région des basses terres et bifurque vers l'ouest où elle longe l'escarpement Laurentien. Dans cette région, la pente moyenne de la rivière est beaucoup plus faible et se chiffre à 1 m/km. Cette

différence de pente explique en bonne partie les inondations récurrentes à chaque printemps dans ce secteur de la rivière.

Ainsi, à chaque printemps, des inondations ont lieu dans la région métropolitaine de Saint-Jérôme de même que sur le tronçon de la rivière du Nord entre Mirabel et Lachute affectant principalement les terres agricoles. Dans la zone urbaine de Saint-Jérôme, le contrôle des débits de la rivière réalisé à l'aide du barrage de l'ancienne usine Woodbridge permet de limiter tout dommage important. La formation occasionnelle d'embâcles de glace dans le centre-ville de Saint-Jérôme demande un suivi continu au cours de la période de la fonte des neiges (Abrinord, 2006). Toutefois, bien que certains secteurs soient reconnus plus à risques que d'autres, la situation du bassin versant dans son ensemble n'est pas considérée particulièrement préoccupante en regard des risques pour la sécurité civile (Abrinord, 2006).

Les caractéristiques des principaux sous-bassins versant et le profil en long de la rivière du Nord sont présentés respectivement au tableau 2.6 et la figure 2.2

Tableau 2.6

Caractéristiques des tributaires de la rivière du Nord
(Tiré de Desmeules et Gélinas, 1978)

Sous-bassin	Superficie (km ²)	Longueur du cours d'eau km	Pente moyenne du bassin versant m/km	Pente moyenne du cours d'eau m/km
Ruisseau Noir	144,1	24,4	7,6	4,6
Aux Mulets	141,9	30,8	n/d	n/d
Doncaster	220,7	50,5	9,3	3,5
Simon	163,1	34,8	11,5	6,9
De l'Ouest	370,5	50,1	9,2	7,3
Saint-André	147,6	22,5	2,2	1,7
Du Nord	2214	141,1	3,6	3,1

Source : Les données de ce tableau sont tirées du document de Desmeules et Gélinas, *Caractéristiques physiques et démographiques : bassin versant de la rivière du Nord*. Les tableaux IV, VI et VII respectivement situés aux pages 25, 30 et 37 ont servi à l'élaboration de ce tableau.

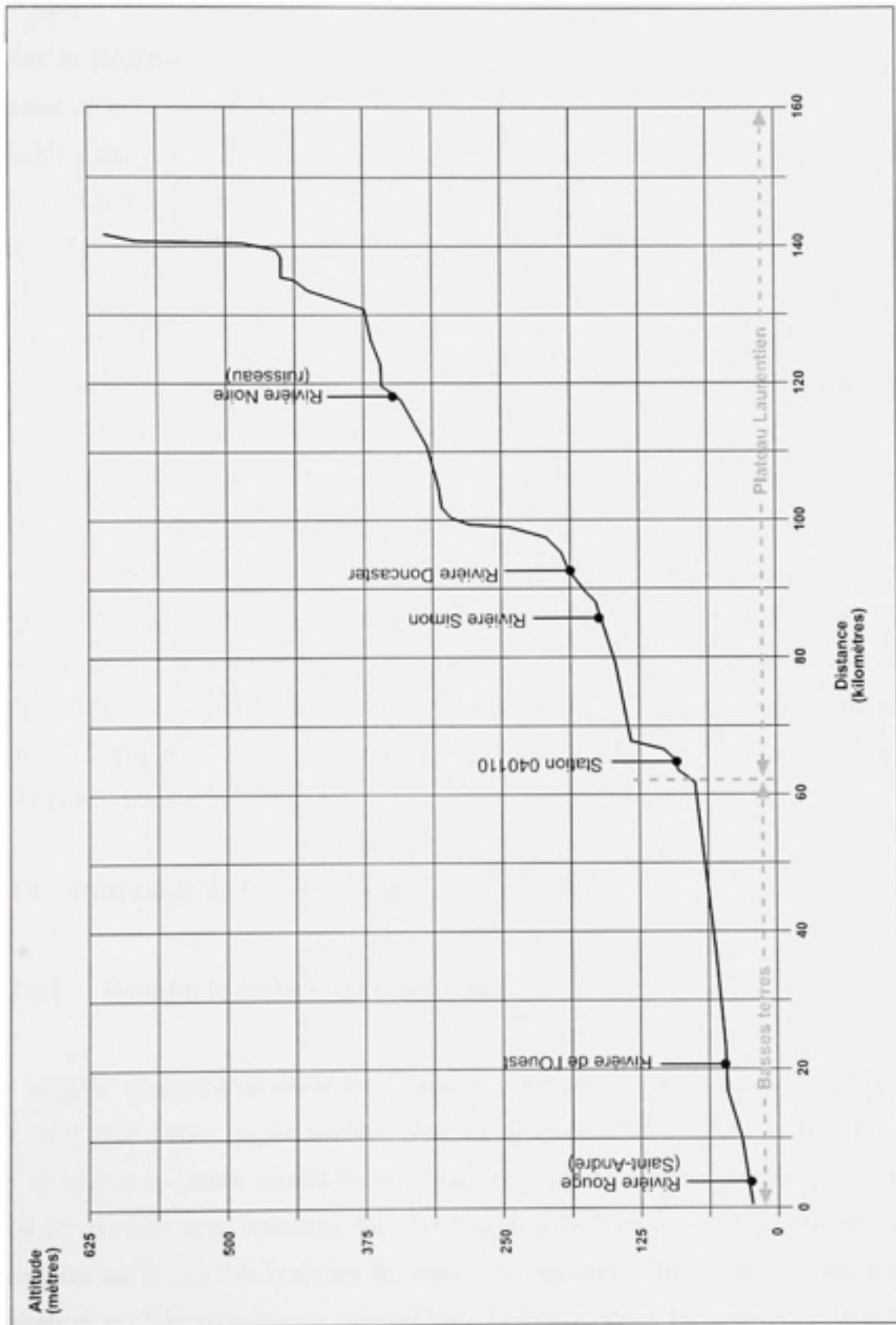


Figure 2.2 Profil en long de la rivière du Nord.
(tiré de Desmarais et Gélinas, 1975)

2.2.5 Barrages

Selon le Répertoire des barrages du CEHQ, 370 barrages sont présents dans le bassin versant de la rivière du Nord (CEHQ, 2008b). La moitié de ces barrages (50,5 %) sont de « faible contenance », le tiers (28,6%) est de « forte contenance » et les autres (20,8 %) sont des « petits barrages ». Les termes « faible contenance », « forte contenance » et « petits barrages » sont définis par Loi sur la sécurité des barrages (Québec, 2008).

La majorité de ces barrages (72%) sont employés à des fins de villégiature et récréatives alors que 11% d'entres eux servent à la régularisation des débits. Enfin, seulement 3% de ces barrages servent au contrôle des inondations et la même proportion sert à la production hydroélectrique. Sur les 370 barrages, seulement 13 sont localisés directement sur le cours de la rivière du Nord.

La construction des barrages s'est effectuée tout au long du 20^e siècle mais la majorité (58,9 %) a été aménagée entre les années 1950 et 1969. Avant 1949, 64 barrages (17,3 %) ont été construits et depuis 1990 seulement 11 barrages (3 %) ont été aménagés dans le bassin versant. Enfin, pour 35 de ces barrages (9,5 %) les informations de sont pas disponibles (Abrinord, 2006).

2.2.6 Hydrologie du bassin versant

2.2.6.1 Données hydrologiques disponibles

Le MDDEP dispose d'un réseau de stations hydrométriques gérées par le CEHQ permettant de suivre les débits et les niveaux pour de nombreux cours d'eau et lacs à travers la province. Sur le bassin versant de la rivière du Nord, 23 stations ont été opérées et de ce total 12 sont encore en opération. Pour les fins du travail actuel, seules les stations de débits localisées sur le cours de la rivière du Nord sont employées. Ainsi 3 stations ont déjà été en opération et 2 le sont encore aujourd'hui. Toutefois, dans la perspective d'établir une

cartographie des zones inondables dans le secteur de Lachute, seule la station 040110 localisée à Saint-Jérôme est utilisée. Cette station présente l'avantage de présenter une longue période d'enregistrements. Le tableau 2.7 présente les caractéristiques de cette station.

Tableau 2.7

Caractéristiques de la station hydrométrique 040110 localisée sur la rivière du Nord

# Station	040110
Localisation	Saint-Jérôme
Latitude	45° 47' 35'' N
Longitude	74° 0' 46'' O
Années d'opération	1930 – aujourd'hui
Bassin versant (km ²)	1170

2.2.6.2 Régime hydrologique

La période utilisée pour définir les débits moyens mensuels débute en 1954, car les années précédentes les débits n'étaient pas enregistrés de façon systématique.

La rivière du Nord présente une importante variation saisonnière des débits. À la station de Saint-Jérôme, le débit moyen annuel est de 23,8 m³/s. La moyenne maximale mensuelle est atteinte au mois d'avril lors de la crue printanière, celle-ci s'établissant à 78,6 m³/s. Par la suite, les étiages estivaux culminent au mois d'août avec un débit moyen de 10,7 m³/s. La seconde saison des crues, beaucoup moins importante que la période printanière, s'amorce au mois d'octobre alors que les pluies automnales débutent avant le début des étiages hivernaux. La figure 2.3 indique les hydrogrammes minimum, moyen et maximum des débits de la rivière du Nord à la station 040110.

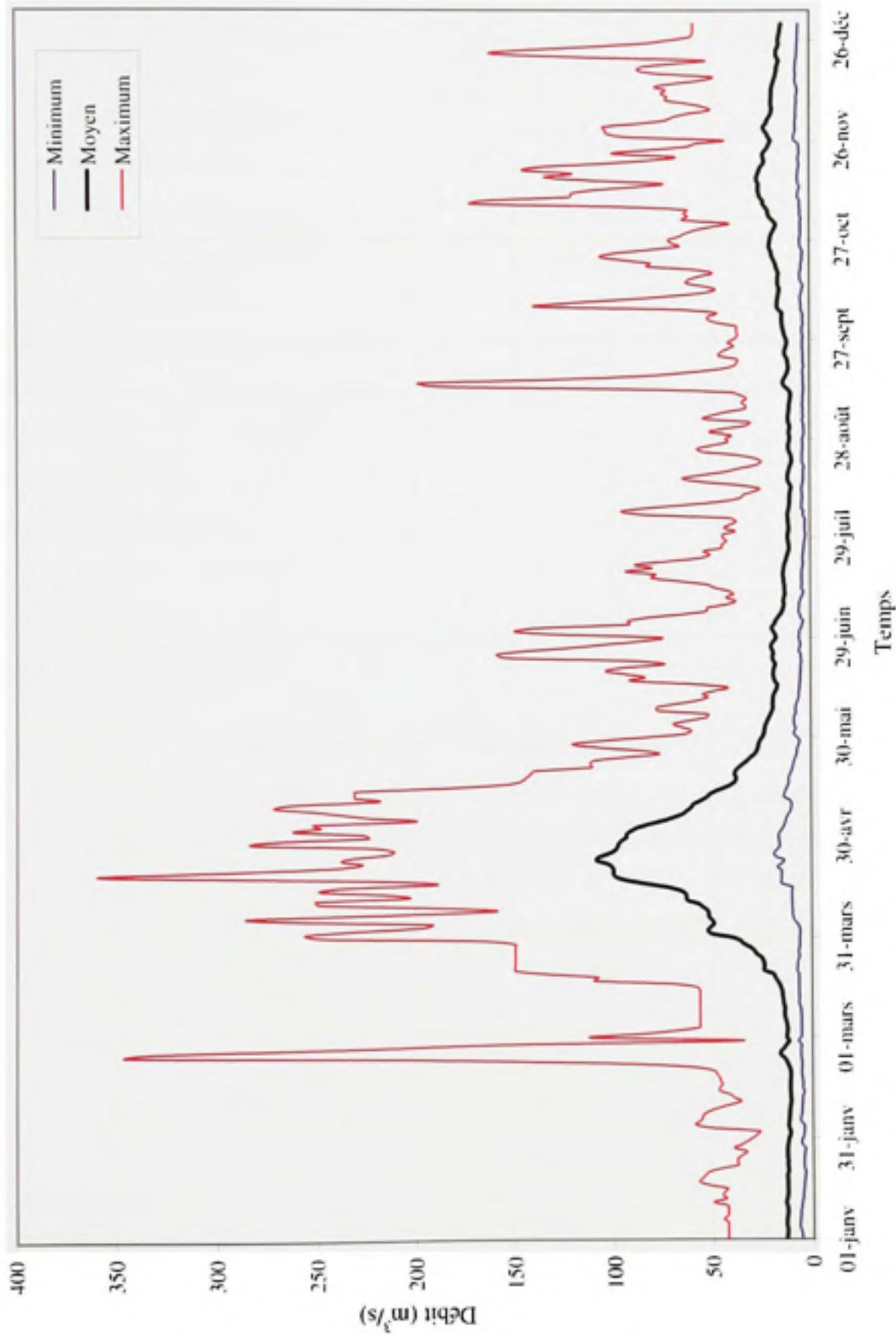


Figure 2.3 Courbes enveloppes des débits journaliers de la rivière du Nord à la station 040110 (1954 à 2000).

Dans un contexte de changements climatiques, le régime hydrologique est sujet à modification. Dans cette perspective, l'évolution des débits moyens annuels et mensuels à la station 040110 a été caractérisée.

La figure 2.4 présente l'évolution des débits moyens annuels pour la période de 1954 à 2000 et des précipitations pour la période de 1966 à 1990. De manière générale, sur la période 1954 à 2000 le ruissellement a tendance à augmenter avec toutefois une certaine variabilité interannuelle. Cette situation peut s'expliquer par la hausse des précipitations observée pour l'est de l'Amérique du Nord notamment pour la période entre 1960 et 1995 (Ouranos, 2007). Cette explication est plausible car il y a une corrélation significative entre les précipitations et le ruissellement annuel pour la période de 1966 à 1990 ($R^2=0,85$).

Même si une hausse des précipitations est observée, celle-ci ne se traduit pas nécessairement en une hausse significative du ruissellement pour toutes les différentes périodes annuelles. Ainsi, la hausse des débits est principalement observée pour les périodes automnale et hivernale (octobre à mars). La hausse des débits pour la période automnale peut être attribuée à la hausse générale des précipitations.

Pour la période hivernale, la hausse des débits est à la fois influencée par la hausse des précipitations mais également par la hausse des températures, laquelle entraîne des épisodes de redoux et des précipitations liquides plus fréquemment. Les précipitations liquides et les débits pour cette période sont fortement corrélés ($R^2=0,90$). La figure 2.5 présente l'évolution des débits moyens pour la période hivernale ainsi que l'évolution des précipitations liquides.

Pour la période printanière, une faible hausse des débits est observée pour le mois d'avril alors qu'une baisse notable est observée pour le mois de mai. Le mois d'avril se caractérise par ses forts débits, puisque les pointes de crues printanières sont généralement atteintes durant ce mois. Ainsi, même si une hausse des débits hivernaux est observée, les débits de ce mois semblent se maintenir. Pour le mois de mai, les débits sont principalement

alimentés par la décrue. Des crues plus hâtives au mois d'avril pourraient expliquer cette baisse du ruissellement durant ce mois.

Pour le mois de juin, une hausse des débits est observée. La hausse des précipitations peut expliquer cette situation, alors que la hausse des températures n'est pas encore assez importante pour favoriser l'évapotranspiration.

Enfin, pour les mois de juillet, août et septembre une tendance à la baisse du ruissellement est observée. L'augmentation des températures favorisant l'évapotranspiration peut expliquer cette situation.

En somme, il appert qu'un changement dans la réponse hydrologique est en train de s'opérer conséquemment à un changement de régime climatique. Les figures A1.1 à A1.12 de l'annexe 1 présentent l'évolution des débits moyens pour les différents mois de l'année.

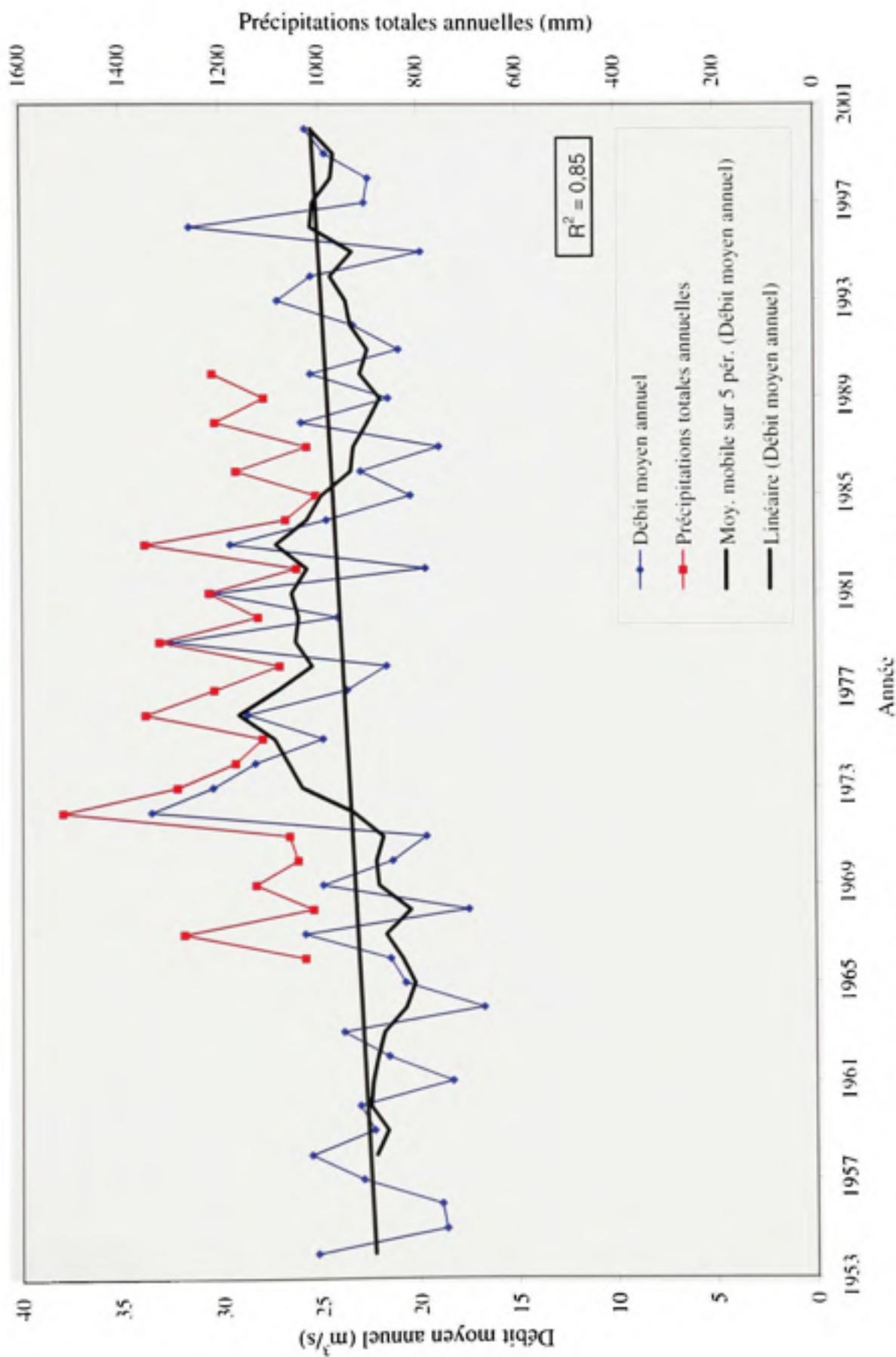


Figure 2.4 Évolution des débits moyens annuels sur la rivière du Nord à la station 040110 (1954 à 2000).

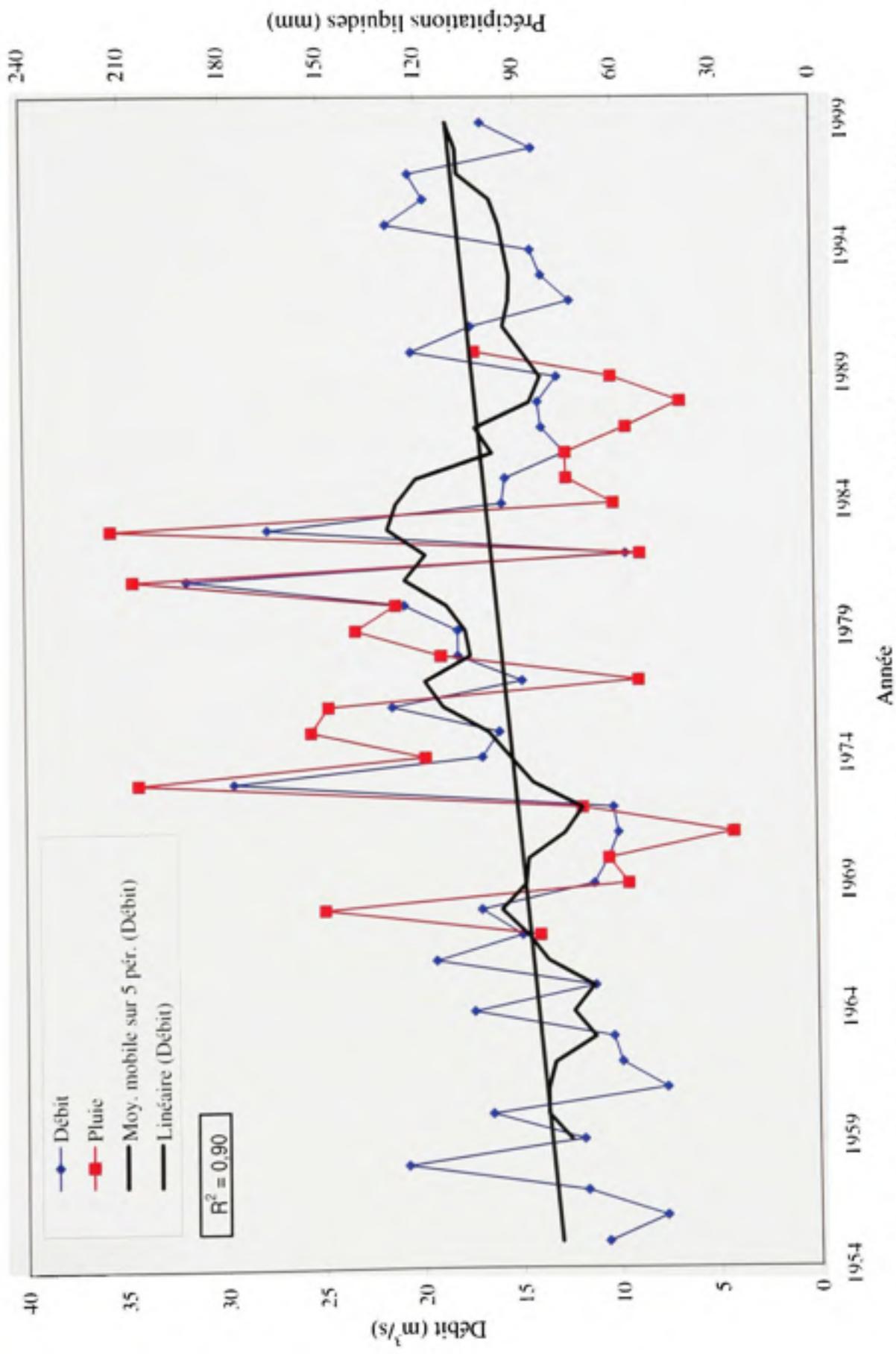


Figure 2.5 Évolution des débits moyens hivernaux sur la rivière du Nord à la station 040110 (1954 à 1999).

2.2.6.3 Caractérisation des crues extrêmes

Les crues de la rivière du Nord sont essentiellement printanières. Depuis le début des enregistrements à la station 040110 en 1930 jusqu'en 2000, 66 maximums annuels sur 71 ont été atteints durant la période printanière soit entre mars et mai. La date d'occurrence moyenne de la crue printanière est le 20 avril. La plus forte crue observée est de $360 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1960 alors que la plus faible est de $75,4 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1995. Le tableau 2.8 présente les caractéristiques de l'échantillon des crues annuelles à la station 040110.

Tableau 2.8

Caractéristiques de l'échantillon des débits de crues annuelles à la station 040110 sur la rivière du Nord (1931-2000)

Caractéristiques	Valeur
Taille de l'échantillon	70 observations
Débit de crue annuelle moyen	$190 \text{ m}^3/\text{s}$
Écart-type	$55,1 \text{ m}^3/\text{s}$
Coefficient de variation	0,290
Coefficient d'asymétrie	0,550
Crue annuelle minimale	$75,4 \text{ m}^3/\text{s}$
Crue annuelle maximale	$360 \text{ m}^3/\text{s}$

L'analyse de l'évolution des débits moyens annuels et des crues annuelles à l'aide de la moyenne mobile sur 10 ans permet d'établir un lien entre les débits moyens et les crues ($R^2=0,76$) sur la période entre les années 1954 à 2000. Par conséquent, si le lien entre les précipitations moyennes annuelles et les débits moyens annuels est établi, celui entre l'augmentation des précipitations et des crues peut être établi de façon indirecte. Toutefois, cette relation indirecte risque de disparaître sous des conditions de changements climatiques, puisque la hausse des températures va induire des redoux hivernaux, donc potentiellement moins de volume au printemps et possiblement une pointe plus faible. La figure 2.6 représente les tendances observées pour les crues durant cette période.

Une des crues maximales annuelles qui n'a pas été atteinte lors de la période printanière est particulièrement intéressante en regard à son ampleur et à sa date d'occurrence. En effet, la crue de 1981, la seconde en importance de tout l'échantillon à $345 \text{ m}^3/\text{s}$ est exceptionnelle puisque celle-ci s'est produite le 25 février. Ce redoux est d'ailleurs considéré comme l'un des faits climatiques du siècle au Québec par le Centre de ressources en impact et adaptation au climat et à ses changements (CRIACC). En regard aux changements climatiques, cette crue est particulièrement intéressante car elle représente un événement extrême dont la probabilité d'occurrence est plus grande. Cette probabilité s'explique si on considère une augmentation des précipitations et des températures hivernales dans le futur.

Bien que la pointe de la crue fût atteinte le 25 février, l'amorce de cette crue a débuté environ le 11 février par des températures douces et par des précipitations importantes. La figure 2.7 illustre l'évolution de cette crue en indiquant les précipitations liquides enregistrées à la station météorologique 7036762 localisée à Sainte-Agathe-des-Monts ainsi que les débits mesurés à la station 040110 sur la rivière du Nord à Saint-Jérôme.

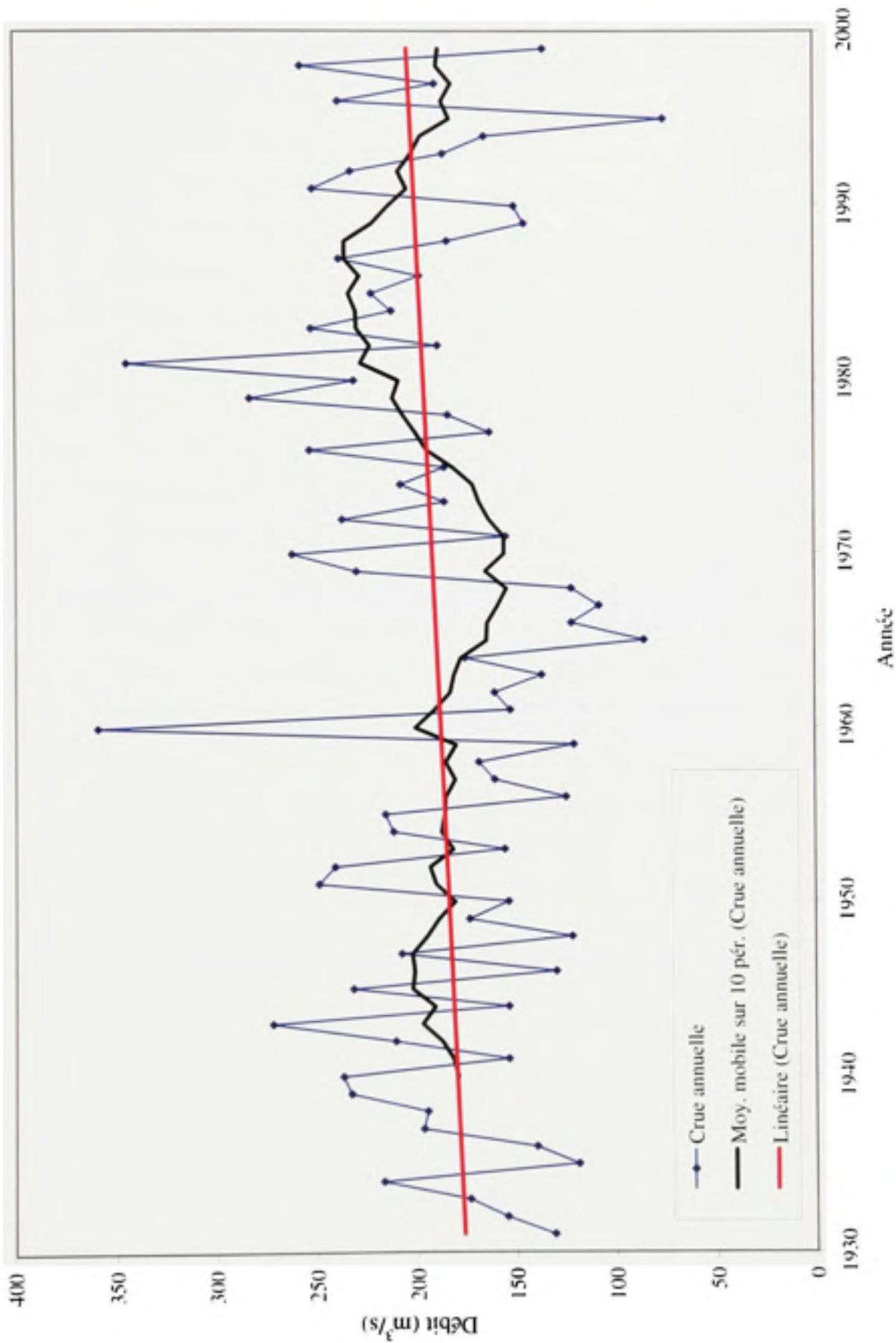


Figure 2.6 Évolution des crues annuelles sur la rivière du Nord à la station 040110 (1931 à 2000).

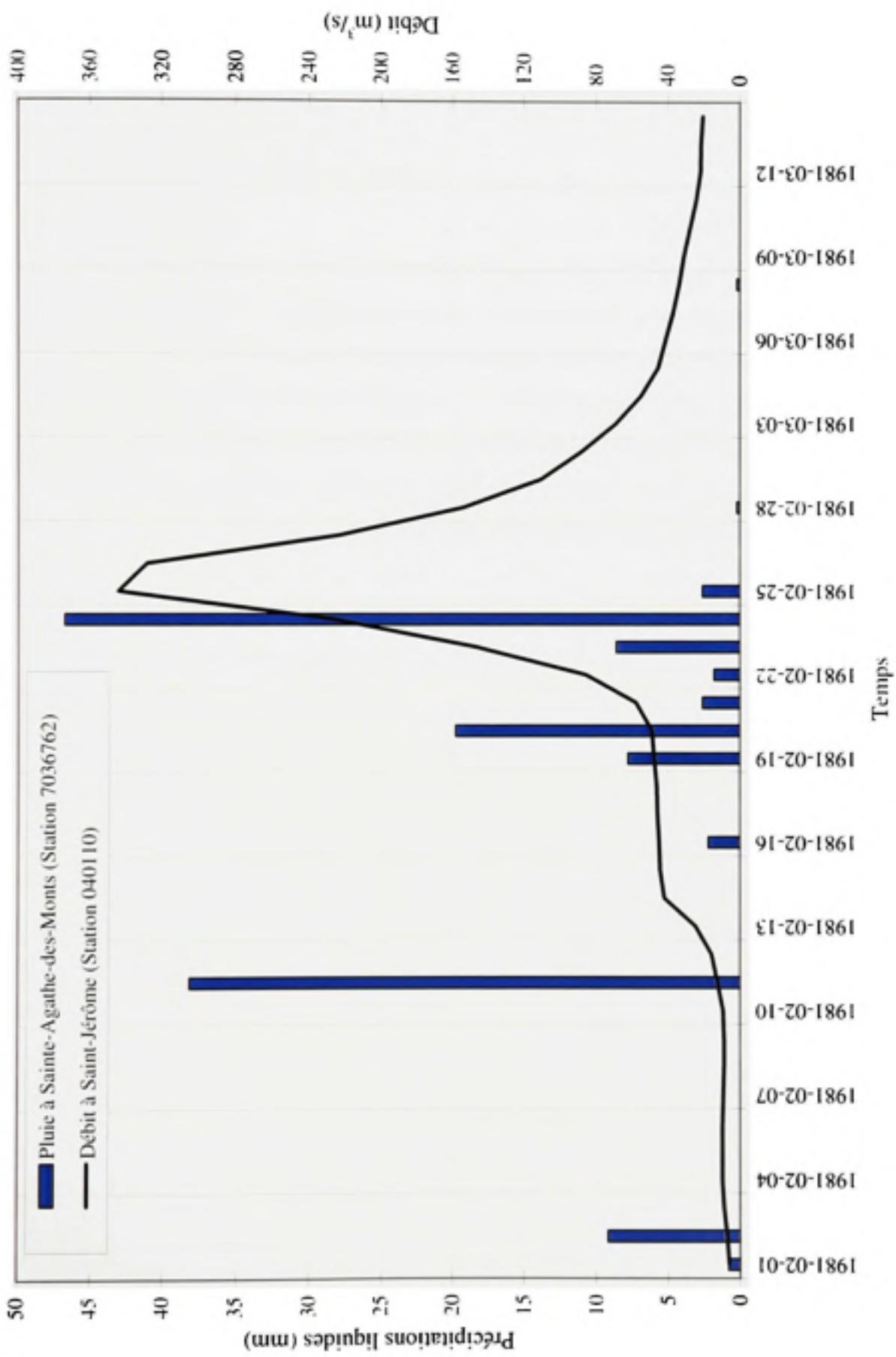


Figure 2.7 Évolution de la crue de février 1981 sur le bassin versant de la rivière du Nord.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DE LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE

3.1 Objectifs de la modélisation

Le principal objectif de la modélisation hydrologique de la période 1967-1990 est de reproduire l'intensité et la fréquence des crues observées, pour des récurrences de 2 à 100 ans et ainsi établir un état de référence. Jusqu'à présent, toute la cartographie des zones inondables produite repose sur l'analyse de fréquence des crues annuelles mais celles-ci sont très largement printanières. Par conséquent, le calibrage du modèle hydrologique vise principalement à reproduire les débits extrêmes printaniers même si cela implique de moins bien reproduire les débits plus faibles et même les volumes de ruissellement.

Si le calibrage vise principalement les crues printanières, les crues estivales et hivernales sont également analysées. Afin d'atteindre cet objectif, le modèle Hydrotel (Fortin *et al.*, 1995, 2001) développé par l'INRS-ETE permet de faire une modélisation en continu et ainsi reproduire l'évolution du couvert neigeux et de l'humidité des sols.

Enfin, même si des stations hydrométriques sont présentes sur la rivière du Nord depuis les années 1930, la modélisation hydrologique ne pouvait reproduire cette période pour deux raisons. La première et principale est reliée au fait que les données météorologiques ne sont pas disponibles sur l'ensemble du bassin versant pour cette période. La seconde raison a été expliquée précédemment et implique les séries de la station hydrométrique de référence (040110) localisée sur la rivière du Nord. Jusqu'en 1954, les débits n'étaient pas enregistrés de façon automatique et cette situation faisait en sorte, notamment durant la période hivernale, que le même débit pouvait apparaître durant un mois entier. Par conséquent, le calibrage d'un modèle hydrologique dans ces conditions n'est pas envisageable.

3.2 Données météorologiques

La qualité du calibrage d'un modèle hydrologique repose en bonne partie sur la qualité des données météorologiques employées. À cet effet, les données météorologiques utilisées dans cette étude proviennent du site web d'Environnement Canada (Environnement Canada, 2008) assurant ainsi une certaine fiabilité des données climatiques. Le traitement de ces données exige cependant une grande attention et demeure un travail relativement long.

Pour reproduire les débits sur une longue période, il est préférable que les stations météorologiques aient fonctionné sur une période commune. En procédant de cette façon on minimise l'introduction, pour de longues périodes de temps, de données calculées à partir des autres stations météorologiques situées à proximité. Par ailleurs, la localisation des stations météorologiques est également importante puisqu'elle témoigne de la variabilité des précipitations et des températures à l'intérieur du bassin versant.

À l'intérieur du bassin versant de la rivière du Nord ou sur sa périphérie, plusieurs stations météorologiques ont été opérées mais seulement quelques unes sont encore en fonction. C'est ainsi que 11 stations ont été inventoriées, mais seulement 5 seront utilisées pour le calibrage du modèle (Tableau 2.1 et Annexe 1) car celles-ci fournissent une couverture de 25 années consécutives soit de 1966 à 1990. Toutefois, l'année hydrologique 1966 a été sacrifiée car les débits de la crue printanière de cette année n'auraient pu être recréés de façon satisfaisante, puisque les mois d'octobre, novembre et décembre 1965 n'étaient pas disponibles. Par conséquent, les simulations débutent en juillet 1966 et la période de référence hydrologique débute en 1967 et s'échelonne jusqu'en 1990 soit pendant 24 années.

3.3 Données hydrométriques

Tel que mentionné à la section 2.2.6.2, plusieurs stations hydrométriques sont présentes dans le bassin versant de la rivière du Nord. Toutefois, seulement quelques unes sont

localisées directement sur le cours de la rivière. Dans l'objectif de modéliser les zones inondables à Lachute, la station 040110 localisée à Saint-Jérôme est employée.

3.4 Analyse de fréquence et événements extrêmes

L'objectif de l'analyse de fréquence est d'interpréter les données historiques relatives à des événements hydrologiques pour voir si des événements de même nature sont susceptibles de se reproduire. Dans cet objectif, il faut élaborer un échantillon, établir une distribution de probabilité théorique qui représente l'échantillon et faire des inférences concernant la population, afin de générer une série infinie hypothétique de données à partir de la distribution (CNRC, 1990).

3.4.1 Principes et problèmes usuels

Pour que ce genre d'analyse soit valable, les données doivent toutefois être aléatoires, indépendantes, stationnaires et homogènes. Dans le domaine de l'hydrologie, la notion aléatoire indique que la variable étudiée fluctue en raison de causes naturelles. Les débits de crue pouvant être affectés sensiblement par l'exploitation d'un réservoir ne sont pas aléatoires, sauf si la série est reconstituée au préalable.

Par ailleurs, même si les événements d'une série sont aléatoires, ils ne sont pas nécessairement indépendants. Par exemple, les grands réservoirs naturels peuvent entraîner de forts débits à la suite de forts débits et de faibles débits à la suite de faibles débits. La dépendance varie en fonction de l'intervalle entre les éléments successifs de la série. La dépendance pour les valeurs de débit quotidien tend à s'accroître, tandis que celle relative aux valeurs maximales annuelles est plutôt faible. Pour les grands plans d'eau comme les Grands Lacs, il arrive qu'il y ait une forte dépendance des diverses valeurs maximales annuelles. Pour déterminer si une série est indépendante, le test de Wald et Wolfowitz (Wald et Wolfowitz, 1943) est employé dans cette étude.

La stationnarité signifie que la série de données est invariante dans le temps, à l'exception des fluctuations aléatoires. Comme type de non-stationnarité, il y a les tendances, les sauts et les cycles. Les sauts sont habituellement dus à une modification soudaine à l'hydraulique d'un cours d'eau par la construction d'un barrage par exemple. Les tendances peuvent être dues à des modifications graduelles d'occupation du sol. Idéalement, une étude devrait être effectuée afin de vérifier l'évolution des facteurs susceptibles de modifier le régime des eaux. Enfin, les cycles sont reliés aux fluctuations climatiques à long terme. Afin de vérifier la stationnarité des données, le test de Kendall (McCuen, 2003) est employé.

Enfin, l'homogénéité signifie que tous les éléments de la série de données proviennent d'une seule population. Une série qui contient des crues à la fonte des neiges et des crues pluviales peut ne pas être homogène mais selon les résultats d'un test, on peut parfois traiter la série comme si elle l'était. Le test de Wilcoxon (Wilcoxon, 1945) est employé afin de déterminer l'homogénéité des séries.

3.4.2 L'échantillonnage

Pour réaliser une analyse de fréquences des crues, deux méthodes peuvent être utilisées afin de constituer un échantillon de valeurs extrêmes. La première est la méthode des séries complètes (MSC) et se compose d'événements d'ampleur maximale qui sont survenus au cours de chacun des intervalles de temps constants constituant la période d'enregistrements. Cette méthode est la plus populaire mais peut induire une perte d'informations (Rao et Hamed, 2000). Par exemple, le second et le troisième plus important débit d'une certaine année peuvent être plus grands que le débit maximal enregistré durant d'autres années de la série.

Cette erreur peut être évitée à l'aide de la méthode des séries partielles (MSP) également connue sous la méthode du renouvellement (Anctil *et al.*, 2005). Cette méthode correspond à la série de valeurs de pointe supérieures à une valeur de débit-seuil x_0 de référence et est composée de tous les événements dont l'ampleur est supérieure au débit-seuil. Cette

méthode est particulièrement utile à l'analyse de mesures lorsque la période d'enregistrement couvre une période inférieure à 15 années. En 1973, Cunnane a démontré que la taille de l'échantillon n doit être supérieure à $1,65 N$ (nombre d'années d'enregistrement) pour que la méthode du renouvellement mène à de meilleures estimations que celles obtenues par la MSC. Pour constituer un échantillon, l'établissement de la valeur du débit-seuil est complexe et repose sur le respect de trois hypothèses. Premièrement, les pointes de crues doivent être indépendantes. Deuxièmement, l'effectif des dépassements $(x - x_0)$ pour chacune des années doit suivre une loi de Poisson. Troisièmement, la distribution des dépassements $(x - x_0)$ doit suivre une distribution exponentielle (Ancil *et al.*, 2005).

La méthode des séries partielles ne sera pas utilisée dans le cadre de cette étude. Afin de vérifier l'évolution des crues dans le futur, la MSC se prête mieux à cet exercice car la taille de l'échantillon demeure toujours la même puisqu'elle n'est pas sujette à varier en fonction d'un débit-seuil.

Deux échantillons de 24 années observées (1967-1990) ont été analysés afin de distinguer les crues printanières et d'été-automne. La taille des échantillons observés a été définie en fonction des échantillons qui pourront être reconstitués par le modèle hydrologique pour qu'une comparaison puisse être possible afin de définir la qualité du calibrage.

Le premier contient 24 séries de valeurs de débits relevés entre le 1^{er} janvier et le 30 juin de chaque année. Le second échantillon contient des débits relevés entre le 1 juillet et le 31 décembre. Enfin le troisième échantillon d'une taille de 23 années correspond à la période hivernale et les débits sont relevés durant décembre et les mois de janvier et février de l'année suivante afin d'assurer l'indépendance de l'échantillon.

3.4.3 Fonctions de distribution

Le choix de la distribution est souvent basé sur des habitudes locales ou l'expérience de l'hydrologue, ce qui peut conduire à une solution inadéquate. Pour cette raison il est préférable d'utiliser plusieurs fonctions de distribution afin de retenir celle qui présente le meilleur ajustement de l'échantillon analysé par rapport à la moyenne, l'écart-type et les coefficients de variation et d'asymétrie. Le terme ajustement indique que les paramètres d'une distribution théorique donnée sont fixés de façon à ce que cette distribution reproduise celle de l'échantillon de données observées à l'étude (CNRC, 1990). Le logiciel HYFRAN développé par INRS-ETE est employé et permet l'emploi de plusieurs fonctions (ou lois) de distribution. Si plusieurs fonctions de distribution existent, certaines sont plus utilisées dans le domaine de l'hydrologie. Ainsi, les distributions lognormale à trois paramètres (L3P), Pearson et log Pearson de type III (P3 et LP3) et la distribution des valeurs extrêmes généralisées (GEV) sont employées dans le cadre de cette étude.

3.4.4 Méthodes d'ajustement

Les principales méthodes d'estimation des paramètres de distribution à partir des données d'un échantillon sont la méthode des moments (MM) et la méthode du maximum de vraisemblance (MV). Le logiciel HYFRAN propose ces deux méthodes.

La base de la méthode MM est que les paramètres de distribution sont reliés aux moments de la distribution. Les moments de l'échantillon corrigés pour éliminer les biais sont utilisés comme estimateurs des moments correspondant de la population.

La méthode du maximum de vraisemblance repose sur l'hypothèse que les valeurs du paramètre de position (ϵ) et d'échelle (α) doivent être celles qui maximisent la probabilité d'obtenir les valeurs observées pour la variable x . Ainsi, la procédure d'estimation par le maximum de vraisemblance suppose d'abord la définition d'une fonction de ϵ et α , $FV(\epsilon, \alpha)$ dite fonction de vraisemblance, qui permet de décrire la probabilité d'obtenir les valeurs

observées de x , puis la maximisation de cette fonction pour ε et α . Chow et al. (1988) décrit en détail cette méthode (Mareuil, 2005).

Si la méthode MV est la préférée de plusieurs pour les échantillons de petite taille utilisés en hydrologie, elle ne semble pas vraiment supérieure à la méthode des moments (Bobee, 1975; Nozdryn-Plotnicki et Watt, 1979; CNRC, 1990) et il ne semble pas y avoir de raison valable de la préférer à la méthode des moments, sauf dans des cas particuliers. Pour les fins de cette étude, la méthode des moments est employée.

3.4.5 Tests d'inférence statistique

Suite au choix de la fonction de distribution utilisée pour l'analyse d'une variable hydrologique aléatoire, il est important de noter que ce choix aura une incidence directe sur la qualité des résultats de toute analyse subséquente et ne signifie pas qu'automatiquement la fonction choisie est la meilleure. Il y aura donc toujours des écarts entre les fréquences expérimentales des valeurs observées et les fréquences des mêmes valeurs calculées à partir d'une fonction de densité de probabilité (Leconte, 2001; Anctil *et al.*, 2005).

Afin d'évaluer ces écarts, des tests ont été développés et ceux-ci permettent également de rejeter ou d'accepter la fonction de distribution utilisée. Les tests les plus employés en hydrologie sont le test de Khi-carré (χ^2) (Anctil *et al.*, 2005) et le test de Kolmogorov-Smirnov (Ferignac, 1962; Anctil *et al.*, 2005). Dans le cadre de cette étude, seul le test de Khi-carré est employé.

3.5 Analyse de fréquence des crues observées

Les analyses de fréquence des crues observées à la station 040110 sont effectuées afin que les caractéristiques des échantillons ainsi que les quantiles de crues puissent être comparés à ceux qui seront obtenus suivant le calibrage du modèle hydrologique.

La période de 1967 à 1990 est employée afin de modéliser la période de référence. Celle-ci est établie par la disponibilité des données météorologiques lesquelles sont nécessaires pour la modélisation hydrologique. Pour vérifier que cette période est représentative de toute la période d'enregistrement de la station 040110, soit de 1931 à 2000, la comparaison des caractéristiques des échantillons et des quantiles de crues annuelles entre les deux périodes est effectuée.

Premièrement, pour les deux échantillons (1931 à 2000 et 1967 à 1990), les hypothèses selon lesquelles les valeurs de l'échantillon des crues annuelles sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Parmi les fonctions de distributions utilisées, le meilleur ajustement est obtenu par la loi de Pearson type III et ce pour les deux échantillons. La qualité de l'ajustement est vérifiée par la comparaison des caractéristiques de la fonction de distribution et celles de l'échantillon (moyenne, écart-type, coefficients de variation et d'asymétrie). Deuxièmement, la qualité de l'ajustement est évaluée à l'aide du test du Khi-Carré à un seuil de signification de 5%. Enfin, une visualisation graphique est effectuée.

En comparant les caractéristiques des échantillons et des quantiles de crues, certains écarts sont observés notamment au niveau de la moyenne. La variabilité exprimée par le coefficient de variation est plus forte pour l'échantillon 1931-2000. Par rapport au quantile de crues, ceux de l'échantillon 1967-1990 sont systématiquement supérieurs à celui de 1931-2000 mais l'écart diminue progressivement en fonction de l'importance de la récurrence. Ainsi, si l'écart entre les crues 2 ans est de $17 \text{ m}^3/\text{s}$ (185 vs. $202 \text{ m}^3/\text{s}$) celui entre les crues centennale est de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ (340 vs. $348 \text{ m}^3/\text{s}$).

Le tableau 3.1 indique les caractéristiques des différents échantillons ainsi que les quantiles de crues caractéristiques pour la détermination de certaines crues typiques.

Tableau 3.1

Comparaison des échantillons et des quantiles de crues pour la période annuelle sur la rivière du Nord à la station 040110

Années	1931-2000	1967-1990
Taille de l'échantillon	70	24
Crue minimale (m ³ /s)	75,4	108
Crue maximale (m ³ /s)	360	345
Moyenne (m ³ /s)	190	206
Écart-type (m ³ /s)	55,1	53,7
Coefficient de variation	0,290	0,261
Coefficient d'asymétrie	0,550	0,439
Crue 2 ans (m ³ /s)	185	202
Crue 20 ans (m ³ /s)	288	300
Crue 100 ans (m ³ /s)	340	348

3.6 Modèle hydrologique HYDROTEL

Le modèle HYDROTEL est un modèle hydrologique distribué spatialement qui comporte des algorithmes de simulation des processus dérivés des lois physiques tout en conservant une part d'empirisme. Les modèles similaires à HYDROTEL semblent bien adaptés à la réalité opérationnelle des gestionnaires du domaine hydrique. Cette situation s'explique car ces modèles permettent un compromis entre l'impossibilité d'alimenter en données d'entrées les modèles plus complexes et les difficultés à établir la crédibilité des modèles empiriques globaux à l'ère des systèmes d'information géographique (Turcotte *et al.*, 2005). Suivant ce raisonnement, le CEHQ a choisi Hydrotel comme modèle hydrologique pour la prévision hydrologique (Turcotte *et al.* 2004a) et pour la gestion des barrages publics (Turcotte *et al.*, 2004b). Par ailleurs, les capacités de ce modèle peuvent également être exploitées à plusieurs fins, la présente étude en est un exemple parmi d'autres.

3.6.1 Présentation du modèle

Afin de calculer le ruissellement sur un bassin versant, HYDROTEL intègre 6 modules de calcul, lesquels sont lancés en cascade de manière découplée pour chaque pas de temps de simulation. Ces modules comprennent l'interpolation des données météorologiques, l'évolution et la fonte du couvert nival, l'évapotranspiration potentielle, le bilan d'eau vertical, l'écoulement sur la partie terrestre et l'écoulement dans le réseau hydrographique.

Il est important de noter que les 5 premiers modules effectuent leur calcul de façon indépendante sur chaque unité hydrologique relativement homogène (UHRH). Ces UHRH couvrent des superficies de quelques dizaines de kilomètres carrés et représentent la forme des petits sous-bassins versants associés à chacun des tronçons de cours d'eau. Le sixième module, l'écoulement par les cours d'eau, effectue ses calculs sur chacun des tronçons de cours d'eau.

3.6.1.1 Interpolation des données hydrologiques

Dans le cadre de cette étude, l'interpolation des données météorologiques sur chaque UHRH est effectuée à l'aide de stations météorologiques. Lors de l'interpolation, Hydrotel effectue la répartition en précipitations liquides et solides sur chaque UHRH en fonction de la température. Dans le cadre de cette étude, la méthode des polygones de Thiessen est retenue. Cette méthode permet d'évaluer la hauteur moyenne des précipitations sur un bassin ou une région d'après la moyenne pondérée des données mesurées à plusieurs stations météorologiques. Le facteur de pondération d'une station est la superficie du polygone formé par les médiatrices des segments d'union entre cette station et les stations avoisinantes (Llamas, 1993). Le polygone peut aussi être limité par les frontières physiques du bassin ou de la région.

3.6.1.2 Évolution et fonte du couvert nival

Le sous-modèle d'évolution du couvert nival simule l'accumulation et la fonte des précipitations solides sur chacune des UHRH. Lors de l'emploi d'Hydrotel, un seul algorithme permettant de simuler l'évolution du couvert nival était disponible soit une méthode mixte combinant à la fois la méthode des degrés-jours et celle du bilan énergétique. Cette méthode mixte permet de simuler la variation spatio-temporelle de l'épaisseur du couvert de neige, de son équivalent en eau et de sa densité à partir des données de température et de précipitation.

La méthode du bilan énergétique est utilisée pour estimer le déficit calorifique du couvert nival à chaque pas de temps. Par la suite, la chaleur est fournie au couvert de neige par une équation modifiée de l'approche degré-jour, laquelle tient compte de l'albédo, de la pente et de l'orientation de la surface.

3.6.1.3 Évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration inclut l'évaporation de l'eau liquide à partir d'une surface quelconque (lac, sol ou plante) et la transpiration émanant du feuillage des plantes. Tant que l'humidité du sol est supérieure à la capacité au champ, l'évaporation se fait au taux potentiel. L'estimation de l'évapotranspiration se calcule pour chaque UHRH et Hydrotel propose 5 sous-modèles. Le modèle retenu pour cette étude est celui développé par Hydro-Québec. Ce modèle est plus empirique et n'utilise que les données de température pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle. Certaines études non-publiées effectuées par l'INRS-ETE indiquent que l'équation d'Hydro-Québec se comporte mieux que la plupart des autres équations. Pour cette raison et car il demande peu d'information, ce modèle est retenu pour cette étude.

3.6.1.4 Bilan d'eau vertical

Le bilan d'eau vertical permet de calculer, pour chaque UHRH, les quantités d'eau qui ruissellent à la surface du sol ou s'y infiltrent, celles qui s'écoulent par ruissellement hypodermique et par vidange de nappe. C'est également lors du calcul du bilan d'eau vertical que l'évapotranspiration réelle est évaluée en fonction de l'état de saturation du sol.

Le modèle employé pour cette étude, le bilan vertical à trois couches (BV3C) (Moussa, 1991; Fortin *et al.* 1995), se rapproche plus des comportements physiques des couches de sol. Les variables sont définies et les flux sont calculés par le modèle de façon à représenter approximativement les macro-processus physiques en jeu lors de l'infiltration et de la redistribution verticale de l'eau à l'échelle d'une colonne de sol correspondant à une UHRH. Les propriétés hydrauliques de chacune des classes de texture de sols peuvent être théoriquement reliées à des caractéristiques mesurables du sol. Ainsi, la conductivité hydraulique à saturation, le potentiel matriciel à saturation, le teneur en eau à saturation, la capacité du champ et le point de flétrissement sont des caractéristiques qui ont été définies à partir de données sur la texture du sol (Rawls *et al.*, 1983; Rawls et Brakensiek, 1989).

3.6.1.5 Écoulement sur la partie terrestre

L'écoulement sur la partie terrestre du bassin est le processus décrivant le déplacement de l'eau jusqu'à ce qu'elle atteigne le réseau hydrographique. Cet écoulement intègre les écoulements s'effectuant directement sur le sol, les écoulements à l'intérieur de canaux, naturels ou artificiels et les écoulements s'effectuant dans le sol. L'eau qui s'écoule sur la partie terrestre du bassin est en fait l'eau disponible pour le ruissellement évalué par le bilan vertical.

Afin de calculer l'écoulement sur la partie terrestre, le modèle hydrologique propose un seul sous-modèle soit celui de l'onde cinématique. La simulation de l'écoulement qui découle d'un hydrogramme géomorphologique basé sur l'onde cinématique n'est pas une

représentation précise de l'écoulement réel mais plutôt une approximation de ce qui se passe en moyenne sur une unité de simulation donnée. Avec l'onde cinématique, les équations qui régissent l'écoulement sont une approximation unidimensionnelle du système complet des équations de Saint-Venant.

3.6.1.6 Écoulement dans le réseau hydrographique

L'écoulement dans le réseau hydrographique est le processus par lequel l'eau s'écoule dans un réseau de rivières, de lacs et de réservoirs jusqu'à l'exutoire du bassin. Les écoulements simulés peuvent être naturels, soit en rivière et en lac, mais peuvent également être influencés ou modulés artificiellement, par des barrages par exemple.

La simulation de l'écoulement naturel dans les tronçons de rivière s'effectue par des approximations des équations de Saint-Venant. Deux algorithmes sont proposés par le modèle, soient l'onde cinématique et l'onde diffusante. Dans le cadre de cette étude, l'onde cinématique est retenue. L'algorithme de l'onde cinématique se base sur une équation qui exprime la conservation de la masse et sur une seconde équation qui exprime la conservation de la quantité de mouvement sous une forme unidimensionnelle.

Les écoulements dans les lacs sont simulés, indifféremment de l'algorithme d'écoulement en rivière qui est activé par une équation de continuité et par une relation niveau-débit à l'exutoire du lac.

Les effets des barrages sur l'écoulement dans le réseau hydrographique peuvent être considérés. Une méthode basée sur le respect des contraintes de gestions du réservoir et sur divers types de gestion est proposée.

3.6.2 Calibrage du modèle

L'assemblage du modèle a été effectué par Richard Turcotte et Charles Poirier de la Direction de l'expertise et de la gestion des barrages publics du CEHQ. Lors de l'assemblage initial du modèle, l'objectif de la modélisation était la prévision des débits de crue pour un horizon à court terme. Ainsi, le modèle fonctionnait avec un pas de temps de 3 h et les données météorologiques provenaient d'une seule station localisée à Saint-Faustin, en périphérie du bassin versant. Par ailleurs, les enregistrements de stations de mesure des niveaux de neige étaient employés afin d'évaluer l'évolution du couvert nival.

3.6.2.1 Critères d'optimisation

Pour aider à l'ajustement des paramètres du modèle, trois critères statistiques sont fournis soit le coefficient de Nash-Sutcliffe, la racine carrée de l'écart quadratique moyen (RCEQM) et l'écart entre le volume total observé et le volume total simulé pour la période considérée.

Puisque l'objectif de la modélisation est la reconstitution des débits de crues en termes d'ampleur et de fréquence, l'analyse de fréquence des échantillons simulés sert également comme critère d'optimisation.

3.6.2.2 Processus de calibrage du modèle

La première étape du calibrage a consisté essentiellement à intégrer les cinq stations météorologiques (tableau 2.1) au modèle hydrologique, retirer les stations de mesures de neige et instaurer un pas de temps de 24 h. À cette étape, les paramètres de modélisation permettant de calculer les débits ne sont pas modifiés.

Suite à la première simulation, le critère de Nash-Sutcliffe atteignait 0,66, le RCEQM était de 0,1947, et l'écart entre les volumes simulés et observés était d'environ 6%. Par ailleurs,

les débits extrêmes étaient fréquemment surestimés et causaient une surestimation des quantiles de crues.

Pour parfaire le calibrage du modèle, les paramètres des sous-modèles calculant l'évolution du couvert nival et le bilan d'eau vertical ont été modifiés manuellement. Au terme de multiples simulations, le calibrage du modèle a été jugé adéquat. Le coefficient de Nash-Sutcliffe global pour la période de référence était de 0,87, celui-ci variant entre 0,68 et 0,94 selon les années. Par ailleurs, le RCEQM était de 0,1199 et l'écart entre les volumes observés et simulés est de 9,8%. Cet écart relativement important est principalement causé par la sous-estimation des débits hivernaux et printaniers. Le tableau 3.2 présente les coefficients de Nash-Sutcliffe obtenus pour les différentes années. Les figures présentant les hydrogrammes observés et simulés par Hydrotel pour chacune des années sont présentées à l'annexe 2.

Tableau 3.2

Coefficients de Nash-Sutcliffe pour les différentes années simulées

Année	Nash	Année	Nash	Année	Nash
1967	0,77	1975	0,86	1983	0,91
1968	0,83	1976	0,87	1984	0,86
1969	0,91	1977	0,79	1985	0,91
1970	0,87	1978	0,79	1986	0,88
1971	0,94	1979	0,85	1987	0,73
1972	0,87	1980	0,92	1988	0,94
1973	0,83	1981	0,88	1989	0,91
1974	0,94	1982	0,85	1990	0,68

Par ailleurs, puisque le calibrage du modèle hydrologique est effectué principalement pour la représentation des pointes de crues printanières, le coefficient de Nash-Sutcliffe pour cette période a été calculé. Le sommaire des coefficients de Nash-Sutcliffe pour cette période de l'année est présenté au tableau 3.3.

Tableau 3.3

Coefficients de Nash-Sutcliffe pour les différentes périodes printanières

Année	Nash	Année	Nash	Année	Nash
1967	0,85	1975	0,91	1983	0,92
1968	0,84	1976	0,89	1984	0,89
1969	0,91	1977	0,82	1985	0,92
1970	0,86	1978	0,79	1986	0,88
1971	0,94	1979	0,89	1987	0,71
1972	0,90	1980	0,95	1988	0,93
1973	0,92	1981	0,89	1989	0,91
1974	0,94	1982	0,84	1990	0,64

Par ailleurs, la qualité du calibrage du modèle hydrologique repose sur une reproduction adéquate des quantiles de crues pour la période annuelle mais également pour les périodes printanières, d'été-automne et hivernales.

Pour les échantillons observés et simulés, les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons des différentes crues sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Parmi les fonctions de distributions utilisées, celle fournissant le meilleur ajustement est la loi de Pearson type III.

Les résultats des analyses de fréquence pour les crues observées et simulées sont présentés à l'annexe 3. Le tableau 3.4 compare les échantillons et les quantiles des crues observés et simulés pour les périodes annuelles, printanières, d'été-automne et hivernale pour la période de 1967 à 1990.

Tableau 3.4

Comparaison entre les échantillons et les quantiles de crues observés et simulés pour les différentes périodes sur la rivière du Nord à la station 040110 entre 1967 et 1990

Période	Annuelle		Printemps		Été-automne		Hiver	
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
Crue moyenne	206	206	202	199	73,2	74,6	51,8	48,1
Écart-type	53,68	51,88	58	55	46,1	52,7	65,8	66,7
Coefficient de variation	0,261	0,252	0,287	0,276	0,63	0,706	1,27	1,39
Coefficient d'asymétrie	0,439	1,034	0,184	0,856	1,42	2,1	4,14	4,42
2 ans	202	197	201	191	64,2	57,9	24,9	21,7
5 ans	250	245	251	242	105	106	65	58,5
10 ans	277	276	278	273	133	143	116	109
20 ans	300	304	301	301	160	180	177	173
50 ans	328	339	327	336	196	230	268	268
100 ans	348	364	345	360	224	267	342	346

La comparaison des crues annuelles observées et simulées s'effectue aisément puisque les moyennes sont identiques à 206 m³/s et les écart-type présentent un faible écart. Par conséquent, les coefficients de variation sont très similaires. Toutefois, les coefficients d'asymétrie présentent un écart relativement important. Dans le cas d'une asymétrie positive, plus le coefficient d'asymétrie est important, plus la probabilité d'obtenir des crues moins forte par rapport à la moyenne est importante. Par conséquent, lors de l'analyse de fréquence des crues simulées, les quantiles de crues de plus faible récurrence sont sous estimés par rapport à ceux des crues observées.

Pour la période printanière, la pointe de cette crue printanière est pour certaines années surestimée et pour d'autres années elle est sous estimée, mais en moyenne elle est bien représentée. La différence entre les crues moyennes printanières entre les échantillons des

crues observées et simulées est de $3 \text{ m}^3/\text{s}$ (202 vs. 199 m^3/s). La date moyenne des crues printanières observées correspond au 19 avril tandis qu'elle s'établit le 16 avril pour les crues simulées. Puisque les crues annuelles sont essentiellement printanières, les mêmes observations effectuées pour les crues annuelles s'appliquent aux niveaux des moyennes, écart-type, coefficients de variation et d'asymétrie.

La comparaison des quantiles de crues pour la période d'été-automne présente d'importants écarts aux niveaux des crues de forte récurrence. Toutefois, cette période présente rarement les plus fortes crues annuelles. Lors de la caractérisation de l'évolution future de ces crues, des nuances sur la validité des résultats pour cette période devront être apportées.

Pour la période hivernale aucune loi de distribution employée ne présente un bon ajustement à l'échantillon simulé, puisqu'elles échouent toutes le test du Khi-carré (Annexe 3). L'ajustement graphique pour cette période, tant pour les échantillons de crues observées que simulées est difficile. Cette situation s'explique par la présence de la crue de 1981, car son ampleur exceptionnelle pour cette période de l'année rend difficile tout ajustement. Cette crue fait également en sorte d'augmenter de façon significative la moyenne, l'écart-type ainsi que les coefficients de variation et d'asymétrie.

De façon générale, les crues simulées par rapport aux crues observées présentent des quantiles inférieurs pour les crues de faible récurrence et des quantiles supérieurs pour les plus fortes récurrences. Par conséquent, lors de la caractérisation de l'évolution des crues pour les horizons futurs, il est important de considérer les crues issues des simulations et non pas les crues observées. En procédant ainsi, l'impact du changement des conditions climatiques sur l'hydrologie du bassin versant est mieux défini puisque le biais induit par le modèle hydrologique est limité.

CHAPITRE 4

MODÉLISATION DES HORIZONS FUTURS

4.1 Objectifs de la modélisation

En vue de modéliser les zones inondables, une évaluation de l'effet des changements climatiques (CC) sur les événements extrêmes de la rivière du Nord doit être effectuée. Puisque les changements climatiques impliquent la non-stationnarité du climat et donc une évolution, les conséquences possibles sur les événements extrêmes doivent être caractérisées à différents horizons. À cette fin, 3 horizons de temps sont étudiés soit 2020, 2050 et 2080.

Dans le cadre juridique actuel au Québec, la cartographie est établie pour les crues annuelles de récurrence 20 et 100 ans, ces crues recevront donc une attention particulière. Par ailleurs, avec l'évolution des températures et des régimes de précipitations, les crues des périodes printanières, d'été-automne et d'hiver sont sujettes à évoluer différemment. Pour cette raison, les crues de ces périodes sont également analysées.

4.2 Modèle climatique globaux et scénario d'émissions de GES

À l'heure actuelle, diverses méthodes existent pour évaluer l'évolution du climat découlant des différents scénarios d'émissions de GES. La plus populaire, et celle retenue pour cette étude, repose sur l'emploi de scénarios issus des modèles climatiques globaux (MCG). Des données récentes pour le secteur à l'étude ont été fournies par le Consortium Ouranos.

À cet effet, plusieurs MCG étaient disponibles :

- CGCM2 (McFarlane *et al.*, 1992) et CGCM3 (McFarlane *et al.*, 2005) développés par le Centre Climatologique Canadien;
- ECHAM4 (Roeckner *et al.*, 1996) développé par le Max Planck Institute for Meteorology en Allemagne;

- HadCM3 (Gordon *et al.*, 2000; Pope *et al.*, 2000) développé par le Hadley Center for Climate Prediction and Research localisé en Angleterre;
- CSIRO-Mk2 (Gordon et O'Farrell, 1997) développé par le Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation en Australie;
- CCSRNIES (Abe-Ouchi *et al.*, 1996; Emori *et al.*, 1999) développé par le Japanese Center for Climate Research Studies.

Pour chacun de ces MCG, différents scénarios d'émissions (SE) de GES étaient disponibles. Pour certains MCG, plusieurs simulations sont réalisées avec le même SE mais avec des conditions initiales différentes. Ces simulations sont appelées membres (M). Au total, 32 combinaisons MCG-SEM étaient disponibles.

Les MCG utilisés possèdent des résolutions spatiales relativement similaires. Toutefois, le centre des mailles des différents modèles diffèrent légèrement par rapport au centre du bassin versant de la rivière du Nord. Il est parfois nécessaire de faire une moyenne de plusieurs mailles encadrant le bassin versant lorsque de fortes disparités, notamment au niveau spatial, sont observées entre la maille centrale et celles environnantes. Par conséquent un lissage sur quelques mailles a été effectué pour réduire les effets inhérents au bruit introduit par les MCG.

4.2.1 Habileté des MCG-SEM à reproduire le climat de la période de référence

Afin de limiter le nombre de MCG-SEM et pour diminuer les biais induit par les MCG, une comparaison basée sur l'habileté des MCG à reproduire les températures et les précipitations de la période de référence (1966-1990) est effectuée. Ce critère de sélection (IPCC-TGICA, 2007) repose sur la prémisse que le (ou les) GCM retenus produiront les projections les plus fiables du climat futur.

Dans un premier temps, cette comparaison est effectuée par une appréciation visuelle des graphiques comparant les températures et les précipitations mesurées sur le bassin versant et

simulées par les différents MCG-SEM (Figures A4.1, A4.2 et A4.3, annexe 4). Dans un deuxième temps, la corrélation entre les températures et les précipitations mesurées aux stations météorologiques (voir tableau 2.1) et simulées par les différents MCG-SEM est établie. Par la suite, l'écart-type de l'erreur entre les températures et précipitations mesurées sur le bassin versant et simulées par les différents MCG-SEM est calculée. La corrélation et l'écart-type de l'erreur entre les températures et les précipitations sont établis à l'aide des moyennes mensuelles sur 25 ans. De façon générale, les MCG reproduisent beaucoup mieux les températures que les précipitations, car ces dernières sont très influencées par les conditions locales.

Sur la base de ces comparaisons, il appert que les modèles HadCM3, ECHAM4 et CGCM3 présentent les meilleurs résultats et sont donc retenus pour la suite de l'étude. Pour limiter le nombre de scénarios à l'étude, les membres sont moyennés pour chaque scénario d'émissions propres à chaque MCG. Le tableau 4.1 présente pour chaque MCG-SE les différents critères moyennés et employés pour définir l'habileté des différents MCG à reproduire le climat de la période de référence. Les 7 premiers MCG-SE du tableau 4.1 correspondent à ceux retenus pour continuer l'étude.

Tableau 4.1

Habilité des MCG à reproduire les caractéristiques du climat de la période de référence sur une base annuelle (12 mois)

MCG-SE	Température minimale		Température maximale		Précipitations	
	Coefficient de corrélation	Écart-type de l'erreur (°C)	Coefficient de corrélation	Écart-type de l'erreur (°C)	Coefficient de corrélation	Écart-type de l'erreur (mm/j)
HadCM3 A2 *	1,00	0,89	1,00	0,84	0,71	0,39
HadCM3 B2 *	1,00	0,88	1,00	0,87	0,76	0,32
ECHAM4 A2 *	1,00	0,90	1,00	1,02	0,38	0,52
ECHAM4 B2 *	1,00	0,88	1,00	1,01	0,34	0,54
CGCM3 A1B *	0,99	1,74	0,99	1,34	0,73	0,35
CGCM3 A2 *	0,99	1,74	0,99	1,34	0,73	0,35
CGCM3 B1 *	0,99	1,74	0,99	1,34	0,73	0,35
CSIRO A1FI	0,96	3,91	0,97	2,76	0,48	0,93
CSIRO B1	0,96	3,96	0,97	2,82	0,47	0,92
CSIRO A2	0,96	3,94	0,97	2,76	0,48	0,92
CSIRO B2	0,96	3,99	0,97	2,79	0,48	0,93
CGCM2 A2	0,94	3,82	0,94	4,28	0,39	0,81
CGCM2 B2	0,94	3,90	0,93	4,33	0,39	0,80
CCSRNIES A1B	0,99	2,34	0,98	3,46	0,24	1,02
CCSRNIES A1FI	0,99	2,34	0,98	3,46	0,24	1,02
CCSRNIES A1T	0,99	2,34	0,98	3,46	0,24	1,02
CCSRNIES A2	0,99	2,34	0,98	3,46	0,24	1,02
CCSRNIES B1	0,99	2,34	0,98	3,46	0,24	1,02

* Modèle retenu pour la suite de l'étude

4.2.2 Effet simulé sur le régime hydrologique

Pour la période de référence (1966-1990), les différents MCG génèrent des températures et des précipitations différentes. Pour cette raison, une analyse de l'impact de ces différences sur le régime hydrologique de la rivière du Nord au droit de la station 040110 est effectuée.

Puisque le sujet de cette étude porte en particulier sur les crues annuelles, lesquelles sont essentiellement printanières, l'impact sur le régime hydrologique est analysé pour cette période de l'année (mars à mai). Pour y parvenir, des séries de débits annuels sont générées par le modèle hydrologique à partir de séries de températures et de précipitations observées qui auront été modifiées en regard des résultats des différents MCG pour la période de référence. Cette méthode s'apparente à la celle des deltas (voir section suivante), sauf que les deltas se calculent entre la température et les précipitations observées aux stations météorologiques et la température et les précipitations générées par le MCG pour la période de référence.

Suite aux simulations hydrologiques, la comparaison entre les séries « observées » et « modifiées MCG » pour chacune des années est effectuée. À titre d'exemple, les figures 4.1 et 4.2 illustrent les hydrogrammes printaniers issus des séries climatiques « observées » et « modifiées MCG » pour les années 1967 et 1976.

Suivant les simulations de l'ensemble des années de la période de référence, l'évaluation de l'impact du MCG sur le régime hydrologique est effectuée à l'aide du coefficient de Nash-Sutcliffe. Ainsi, plus le coefficient de Nash-Sutcliffe est faible, plus le régime hydrologique est perturbé par le MCG. À l'inverse, plus celui-ci se rapproche de 1, moins l'impact du MCG est ressenti.

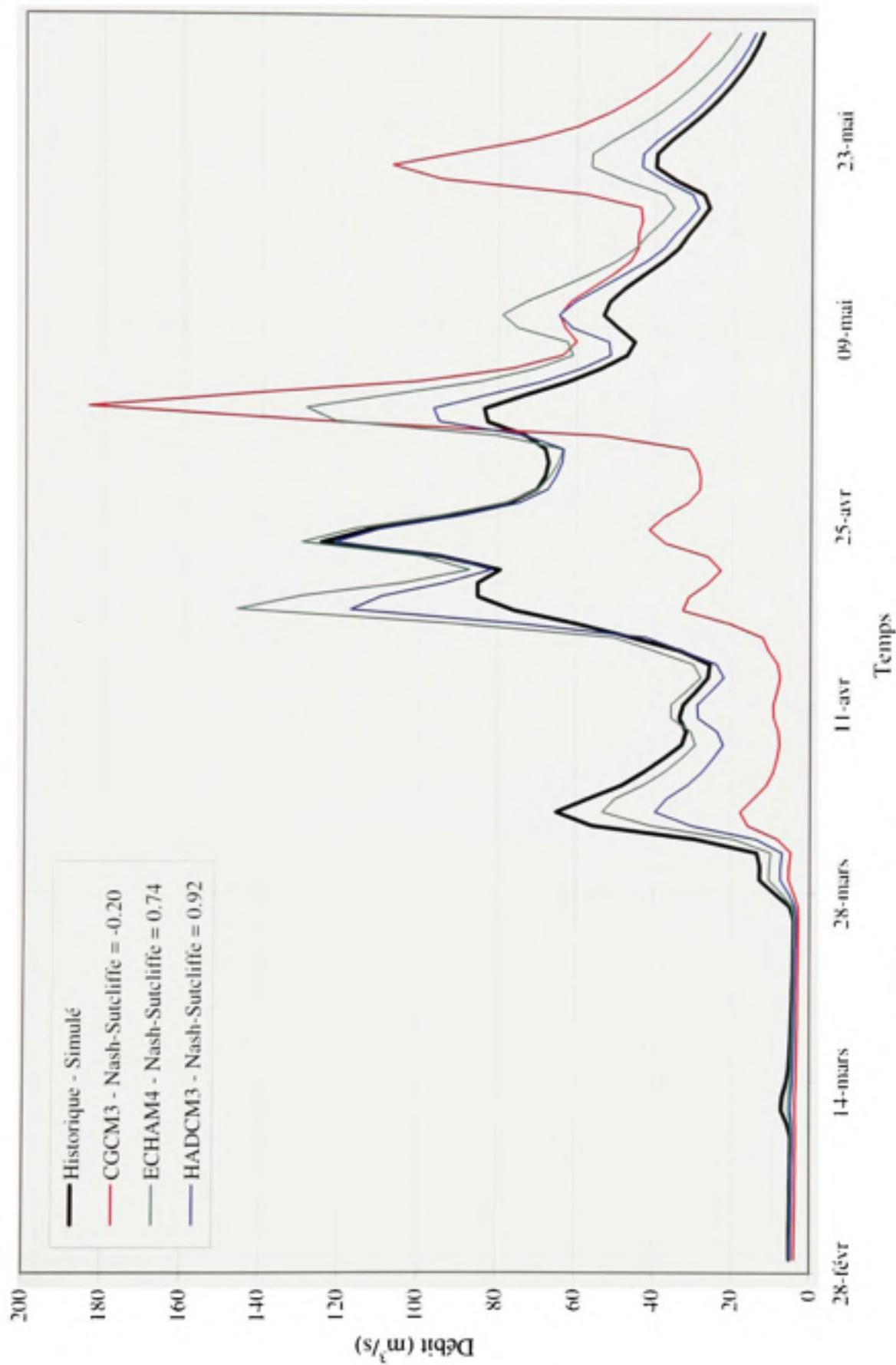


Figure 4.1 Impact des MCG sur l'hydrogramme printanier de 1967.

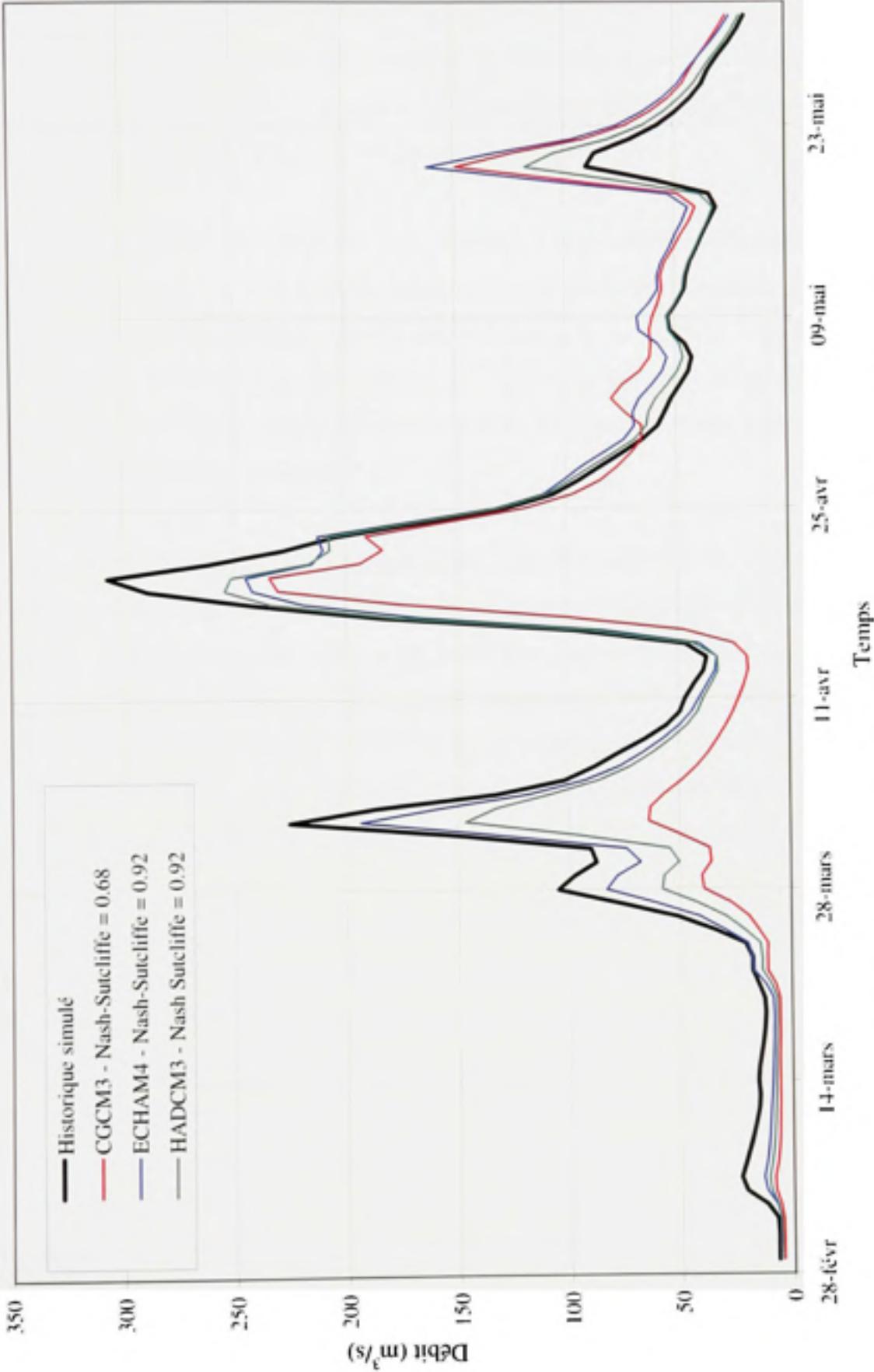


Figure 4.2 Impact des MCG sur l'hydrogramme printanier de 1976.

La moyenne des coefficients de Nash-Sutcliffe pour les MCG ECHAM4, HadCM3 et CGCM3 sont respectivement de 0,84, 0,85 et 0,36. Pour les résultats complets, le tableau A4.1 à l'annexe 4 présente les coefficients de Nash-Sutcliffe obtenus pour les différents MCG-SE pour les différentes années de la période de référence.

Les MCG ECHAM4 et HadCM3 reproduisent à un niveau comparable la période printanière. Toutefois, si l'on considère que le modèle HadCM3 reproduit plus fidèlement les températures et les précipitations sur une base annuelle qu'ECHAM4 (voir tableau 4.1), cette situation peut paraître surprenante. Comparativement aux deux autres modèles, CGCM3 reproduit avec difficulté cette période de l'année. C'est pourquoi certaines explications doivent être apportées.

Premièrement, les crues et les débits printaniers sont tributaires entre autres des conditions climatiques (température et précipitations) ayant prévalu durant l'hiver (novembre à mars). À cet effet, une attention particulière a été portée sur l'habileté des modèles à reproduire les variables climatiques durant cette période. Or il appert que le modèle ECHAM4 donne de meilleurs résultats durant la période hivernale comparativement à la période annuelle. Ces résultats sont meilleurs en termes de corrélation et d'écart-type sur la différence entre les variables climatiques observées et celles générées par le MCG pour la période de référence.

Deuxièmement, si l'on compare les températures minimales et maximales moyennes pour cette période, CGCM3 est le modèle les reproduisant le mieux. Par contre, ce modèle est celui qui sous-estime le plus les précipitations comparativement aux observations. Les modèles ECHAM4 et HadCM3 pour leur part sous-estiment également les précipitations mais dans une moindre mesure. En regard aux températures minimales journalières, ces modèles sont plus chauds que les observations et que le modèle CGCM3. Toutefois, ces modèles sont plus froids en regard aux températures maximales journalières comparativement aux observations et au modèle CGCM3.

En somme, la combinaison des températures maximales quotidiennes plus froides et des précipitations sous estimées semble conduire à une meilleure représentation de la formation du couvert nival pendant l'hiver. Par conséquent, le régime hydrologique durant le printemps s'en trouve moins affecté pour les modèles ECHAM4 et HadCM3. Le tableau 4.2 résume les précipitations et les températures observées et générées par les différents MCG pour la période de référence.

Tableau 4.2

Précipitations et températures moyennes observées et générées par les MCG pour les mois de novembre à mars durant la période de référence

MCG	Scénario	Précipitations (mm)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
Historique	Observé	436	-12,3	-2,3
CGCM3	A1B	370	-12,4	-2,3
CGCM3	A2	370	-12,4	-2,3
CGCM3	B1	370	-12,4	-2,3
ECHAM4	A2	379	-10,3	-4,5
ECHAM4	B2	378	-10,2	-4,4
HADCM3	A2	403	-12,1	-3,4
HADCM3	B2	401	-12,1	-3,4

Pour parfaire l'évaluation de l'influence des variables climatiques simulées par les MCG sur le régime hydrologique, les analyses de fréquences des crues annuelles sont effectuées pour la période de référence selon chaque MCG-SE. La comparaison des caractéristiques des échantillons et des quantiles de crues est alors possible. Au terme des comparaisons entre les échantillons et les quantiles de crues, il appert que le modèle HadCM3 influence le moins les crues printanières. Le tableau 4.3 présente les caractéristiques des échantillons et les quantiles de crues annuelles de la période de référence simulée à partir les données observées et modifiées selon les différents MCG-SE.

Tableau 4.3

Comparaison entre les échantillons et les quantiles de crues annuelles pour la période de référence simulée et simulée selon par les MCG-SE (m³/s)

	Simulée	CGCM3			ECHAM4		HadCM3	
		A1B	A2	B1	A2	B2	A2	B2
Crue moyenne	206	196	196	196	218	218	203	206
Écart-type	51,9	62,9	62,8	62,9	51,1	51,4	49,7	52,0
Coefficient de variation	0,252	0,321	0,32	0,321	0,234	0,235	0,244	0,253
Coefficient d'asymétrie	1,034	0,013	0	0	0,678	0,626	0,992	0,906
2 ans	197	196	196	196	213	213	195	198
5 ans	245	249	249	249	259	259	241	246
10 ans	276	277	276	277	286	287	270	275
20 ans	304	300	299	300	311	311	297	302
50 ans	339	326	325	326	341	340	329	336
100 ans	364	343	342	343	362	361	353	360

En regard à l'habileté du modèle à reproduire les variables climatiques du bassin versant et des effets sur le régime hydrologique de la rivière, il appert que le modèle HadCM3 est le MCG induisant le plus faible biais.

4.3 Méthode des deltas

4.3.1 Approche

La méthode des deltas consiste à évaluer le changement d'une variable dans le futur par rapport au climat actuel. Pour les températures, le calcul de l'incrément s'effectue donc en soustrayant la température future simulée par le GCM de la température de la période de référence simulée également par le GCM. Cet incrément est par la suite additionné à la

température mesurée à la station météorologique durant la période de référence. Cette opération est exprimée par l'équation suivante :

$$Tsce_{a+\Delta a,m,j} = T_{mesref_{a,m,j}} + (T_{GCMfutur_m} - T_{GCMref_m}) \quad (4.1)$$

Où :

$Tsce_{a+\Delta a,m,j}$ est la température pour le jour « j », le mois « m » de l'année « a+ Δa » et Δa est le temps entre le futur et la période de référence (°C);

$T_{mesref_{a,m,j}}$ est la température mesurée à une station météorologique le jour « j », le mois « m » et l'année « a » (°C);

$T_{GCMfutur_m}$ est la température moyenne mensuelle simulée par le GCM pour les conditions futures et moyennées sur une période de 30 ans (°C);

T_{GCMref_m} est la température moyenne mensuelle simulée par le GCM pour les conditions de la période de référence et moyennées sur une période de 30 ans (°C).

Pour les précipitations, un facteur multiplicatif est appliqué à la précipitation observée à la station météorologique pendant la période de référence. Ce facteur est le rapport entre les précipitations futures simulées par le GCM et les précipitations simulées par le GCM durant la période de référence. Cette opération est exprimée par l'équation suivante :

$$Psce_{a+\Delta a,m,j} = P_{mesref_{a,m,j}} \times \left(\frac{P_{GCMfutur_m}}{P_{GCMref_m}} \right) \quad (4.2)$$

Où :

$Psce_{a+\Delta a,m,j}$ sont les précipitations pour le jour « j », le mois « m » de l'année « a+ Δa » et Δa est le temps entre le futur et la période de référence (mm);

$P_{mesref_{a,m,j}}$ sont les précipitations mesurées à une station météorologique le jour « j », le mois « m » et l'année « a » (mm);

$P_{GCM_{future}_m}$ sont les précipitations moyennes mensuelles simulées par le GCM pour les conditions futures et moyennées sur une période de 30 ans (mm);

$P_{GCM_{ref}_m}$ sont les précipitations moyennes mensuelles simulées par le GCM pour les conditions de la période de référence et moyennées sur une période de 30 ans (mm).

La période de référence hydrologique correspond aux années couvertes entre 1967 et 1990 et l'année centrale de cette période est donc 1978. Par conséquent les données de températures et de précipitations simulées par les GCM et moyennées sur une période de 30 ans sont centrées sur l'année 1978.

Pour les horizons futurs soit 2020, 2050 et 2080 les données fournies pour la méthode des deltas correspondent à une moyenne sur 30 ans. Par conséquent l'horizon 2020 correspond à la période 2005-2034, 2050 correspond à la période 2035-2064 et 2080 correspond à la période 2065-2094.

Enfin, puisque les échantillons de crues ne comportent que 24 années (23 pour l'hiver) l'horizon 2020 correspond à la période 2009-2031, l'horizon 2050 correspond à la période 2039-2061 et l'horizon 2080 correspond à la période 2069-2091. Toutefois, afin d'alléger le texte, l'appellation horizon 20X sera employée, avec X= 20, 50 ou 80.

4.3.2 Calcul des incréments

4.3.2.1 Modèle CGCM3

Le modèle CGCM3 est disponible avec trois scénarios d'émissions soit B1, A1B et A2. À titre d'exemple, le tableau 4.4 présente les différentiels climatiques calculés à partir des simulations du MCG pour le scénario d'émission A2 pour les horizons 2020, 2050 et 2080. L'ensemble des différentiels climatiques sont présentés à l'annexe 5.

Tableau 4.4

Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par CGCM3 pour le scénario d'émission A2.

Mois	2020			2050			2080		
	ΔP	ΔT	ΔT	ΔP	ΔT	ΔT	ΔP	ΔT	ΔT
	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
Janvier	15,9	2,4	1,8	24,0	4,4	3,3	44,5	6,8	5,3
Février	9,5	1,6	1,0	29,5	4,2	3,1	46,5	6,4	4,9
Mars	5,0	1,9	1,3	20,6	3,5	2,5	28,6	5,3	4,0
Avril	17,8	1,8	1,3	23,2	3,3	2,3	39,6	5,5	4,1
Mai	8,8	1,4	1,4	15,2	3,2	3,1	21,8	4,9	4,8
Juin	1,0	1,5	1,6	-2,4	2,7	2,7	-2,1	4,6	4,6
Juillet	1,1	1,0	1,0	-6,3	2,5	2,5	-9,3	4,6	4,6
Août	-4,7	1,5	1,6	-2,2	2,5	2,7	-15,5	4,4	4,6
Septembre	-2,8	2,1	2,3	-3,8	2,6	2,5	-8,6	4,7	4,5
Octobre	4,5	1,3	1,4	8,3	2,9	2,9	6,4	4,8	4,9
Novembre	12,9	1,5	1,5	37,1	2,2	2,2	33,8	4,2	4,1
Décembre	9,0	1,8	1,3	17,4	3,2	2,4	25,5	7,2	5,5

4.3.2.2 Modèle ECHAM4

Le modèle ECHAM4 est disponible avec 2 scénarios d'émissions soit B2 et A2. Le tableau 4.5 présente les différentiels climatiques calculés à partir des simulations du MCG pour le scénario d'émission A2 pour les horizons 2020, 2050 et 2080. L'ensemble des différentiels climatiques sont présentés à l'annexe 5.

Tableau 4.5

Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par ECHAM4 pour le scénario d'émission A2.

Mois	2020			2050			2080		
	ΔP	ΔT	ΔT	ΔP	ΔT	ΔT	ΔP	ΔT	ΔT
	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
Janvier	7,7	3,1	2,4	-4,1	5,7	3,9	23,4	9,2	6,2
Février	2,9	1,3	1,2	14,5	3,6	2,8	18,1	7,2	5,2
Mars	4,1	1,7	1,6	6,8	2,6	2,4	13,6	5,2	4,5
Avril	-5,8	1,9	1,7	-2,3	3,9	3,8	3,0	5,7	5,5
Mai	-6,7	1,8	2,1	-2,7	3,0	3,0	-4,5	4,8	4,9
Juin	5,4	1,3	1,3	0,2	2,6	2,6	3,2	4,7	4,7
Juillet	-6,5	1,6	1,9	-3,7	3,0	3,2	2,2	5,1	5,1
Août	-9,5	2,0	2,5	-7,1	3,7	4,2	2,2	5,6	5,8
Septembre	7,8	2,1	2,3	-0,1	3,7	4,1	-3,2	5,9	6,1
Octobre	-10,3	1,3	1,5	-4,2	3,1	3,4	-4,5	4,5	4,6
Novembre	2,9	2,2	2,3	4,2	3,4	3,7	19,7	5,2	5,2
Décembre	-6,6	2,4	1,7	21,4	5,4	4,0	27,5	7,2	5,5

4.3.2.3 Modèle HadCM3

Le modèle HadCM3 est disponible également avec 2 scénarios d'émissions soit B2 et A2. Le tableau 4.6 présente les différentiels climatiques calculés à partir des simulations du MCG pour le scénario d'émission A2 pour les horizons 2020, 2050 et 2080. L'ensemble des différentiels climatiques sont présentés à l'annexe 5.

Tableau 4.6

Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par HadCM3 pour le scénario d'émission A2.

Mois	2020			2050			2080		
	ΔP	ΔT	ΔT	ΔP	ΔT	ΔT	ΔP	ΔT	ΔT
	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
Janvier	9,1	1,9	1,4	15,0	3,2	2,3	21,1	5,5	4,0
Février	3,5	1,1	0,7	15,6	2,5	1,6	20,4	5,3	3,3
Mars	6,3	1,3	0,6	22,9	2,6	1,6	36,0	5,2	3,8
Avril	7,1	0,9	1,3	12,7	1,9	2,6	22,1	3,8	5,0
Mai	13,3	1,0	1,2	9,3	2,4	2,8	14,5	4,1	4,8
Juin	5,7	1,2	1,0	8,6	2,6	2,6	1,8	4,5	4,9
Juillet	-4,7	1,2	1,3	9,9	2,8	3,0	-5,3	5,2	6,4
Août	-2,0	1,5	1,6	3,3	3,1	3,5	-3,8	5,7	6,8
Septembre	9,6	1,9	1,9	13,3	3,2	3,3	5,5	5,5	6,2
Octobre	-3,7	0,7	1,2	5,0	2,2	2,8	4,2	4,1	5,0
Novembre	2,7	1,1	1,0	7,6	2,5	2,3	15,3	4,3	4,3
Décembre	0,5	1,1	0,9	14,3	2,8	2,0	24,6	5,1	3,8

4.4 Analyses de fréquence des crues futures

4.4.1 Analyses de fréquence

Les analyses de fréquence de crues sont effectuées pour le printemps, la période d'été-automne, l'hiver et la période annuelle. Pour chacune de ces périodes, les horizons 2020, 2050 et 2080 sont analysés afin de caractériser l'évolution des crues en fonction du MCG et du scénario d'émission. La loi présentant le meilleur ajustement à l'échantillon est indiquée. Le niveau de signification des hypothèses d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité des valeurs des échantillons de crues est également indiqué.

4.4.2 Discussion et analyse des résultats

Suite à ces nombreuses analyses de fréquences, l'objectif de la présente section est dans un premier temps d'analyser l'impact des MCG employés sur les résultats. Dans un second temps, les principales tendances pour les différentes périodes étudiées sont établies.

4.4.2.1 Influence des MCG

Comme il a été mentionné dans la revue de littérature, les modèles climatiques globaux possèdent chacun leur propre formulation mathématique des processus physiques régissant le système climatique. Cette situation explique le fait que les quantiles de crues sont plus influencés par le MCG employé que par le scénario d'émission (SE).

Par ailleurs, pour un même scénario d'émission, l'évolution dans le temps des différents quantiles de crues n'est pas similaire en regard du MCG utilisé. À titre d'exemple, pour le scénario d'émission A2, l'évolution des quantiles de crues annuelles de récurrence 100 ans n'est pas similaire entre les différents MCG. Ainsi, pour le modèle HadCM3 une tendance à la hausse est observée pour les horizons 2020 à 2080. Parallèlement, pour les modèles ECHAM4 et CGCM3, une tendance à la hausse est observée entre les horizons 2020 à 2050 mais une diminution est prévue pour l'horizon 2080.

Le tableau 4.7 démontre à la fois l'influence du MCG sur l'ampleur des crues et sur leur évolution dans le temps.

Tableau 4.7

Influence des MCG sur les quantiles de crues annuelles de récurrence 100 ans et sur leur évolution dans le temps pour le scénario d'émission A2

MCG	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
CGCM3	364	367	431	379
ECHAM4	364	334	343	279
HADCM3	364	342	393	405

4.4.2.2 Période printanière

En regard des résultats obtenus, il est difficile d'affirmer avec certitude quelle évolution prendront les crues printanières. Le tableau 4.8 résume les quantiles de crues pour les récurrences de 2, 20 et 100 ans obtenus pour l'ensemble des MCG-SE pour les horizons 2020, 2050 et 2080.

Tableau 4.8

Débits de crues printanières pour les horizons 2020, 2050 et 2080

Récurrence	2 ans			20 ans			100 ans		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Référence		191			301			360	
CGCM3-B1	180	185	182	294	322	331	377	424	434
CGCM3-A1B	178	180	186	298	317	331	386	404	414
CGCM3-A2	180	184	188	290	336	314	367	431	378
ECHAM4-B2	158	138	145	272	263	263	340	328	326
ECHAM4-A2	152	142	135	265	274	232	335	346	276
HADCM3-B2	176	178	178	278	295	320	347	369	398
HADCM3-A2	170	183	170	271	314	323	342	395	405

Pour les trois MCG employés, le modèle ECHAM4 est le plus chaud et le plus sec entraînant ainsi une baisse de tous les quantiles de crues. Pour ce modèle, la hausse des températures par rapport à celle des précipitations fait systématiquement en sorte d'augmenter les épisodes de redoux et de précipitations liquide durant l'hiver diminuant ainsi le couvert nival disponible pour la fonte.

Pour les modèles CGCM3 et HadCM3, bien qu'une baisse des crues de faible récurrence soit observée, une hausse des quantiles pour les crues de forte récurrence est observée, pour les scénarios d'émissions de GES des familles A et B. Cette situation peut s'expliquer par le rapport entre l'augmentation des températures et celle des précipitations lequel fait généralement en sorte d'augmenter le nombre d'épisodes pluvieux et de redoux durant l'hiver limitant ainsi l'augmentation du couvert neigeux disponible pour la fonte printanière. Par conséquent, une diminution des crues de faible récurrence est observée. Cependant, il apparaît que certains hivers demeurent assez froid pour favoriser la formation du couvert neigeux augmentant ainsi la quantité de neige disponible pour la fonte printanière. Pour cette raison, une augmentation des quantiles est observée pour les crues de plus forte récurrence.

Même si une certaine ambiguïté des résultats est observée au niveau des crues de forte récurrence, deux tendances s'appliquant pour tous les MCG, tous les scénarios d'émission et tous les horizons sont observés. La première est la baisse des quantiles de crues de faible récurrence. La seconde, consiste au devancement des dates de crues moyennes, donc des crues plus hâtives. Pour illustrer cette situation, la figure 4.3 présente l'évolution de l'hydrogramme des débits moyens journaliers pour les périodes hivernale et printanière tel que simulé avec CGCM3 sous un scénario d'émission A2.

Si la méthode des deltas comporte certaines limites, notamment au niveau de l'estimation de la variabilité climatique, ces limites sont toutefois moins problématiques en regard à l'estimation des crues de la période printanière. Une moins grande variabilité aura possiblement des conséquences plus modestes sur les quantités de neige accumulées et donc sur le volume de ruissellement. Par ailleurs, l'ampleur d'une crue printanière résulte d'une combinaison d'évènements dont la quantité de neige tombée durant l'hiver, l'ampleur des températures prévalant durant l'hiver et lors de la fonte et la quantité de précipitations liquides accélérant la fonte du couvert nival.

La section 1 de l'annexe 6 (A6.1) présente les caractéristiques de tous les échantillons et les résultats de toutes les analyses de fréquences pour cette période pour les différents horizons et MCG-SE.

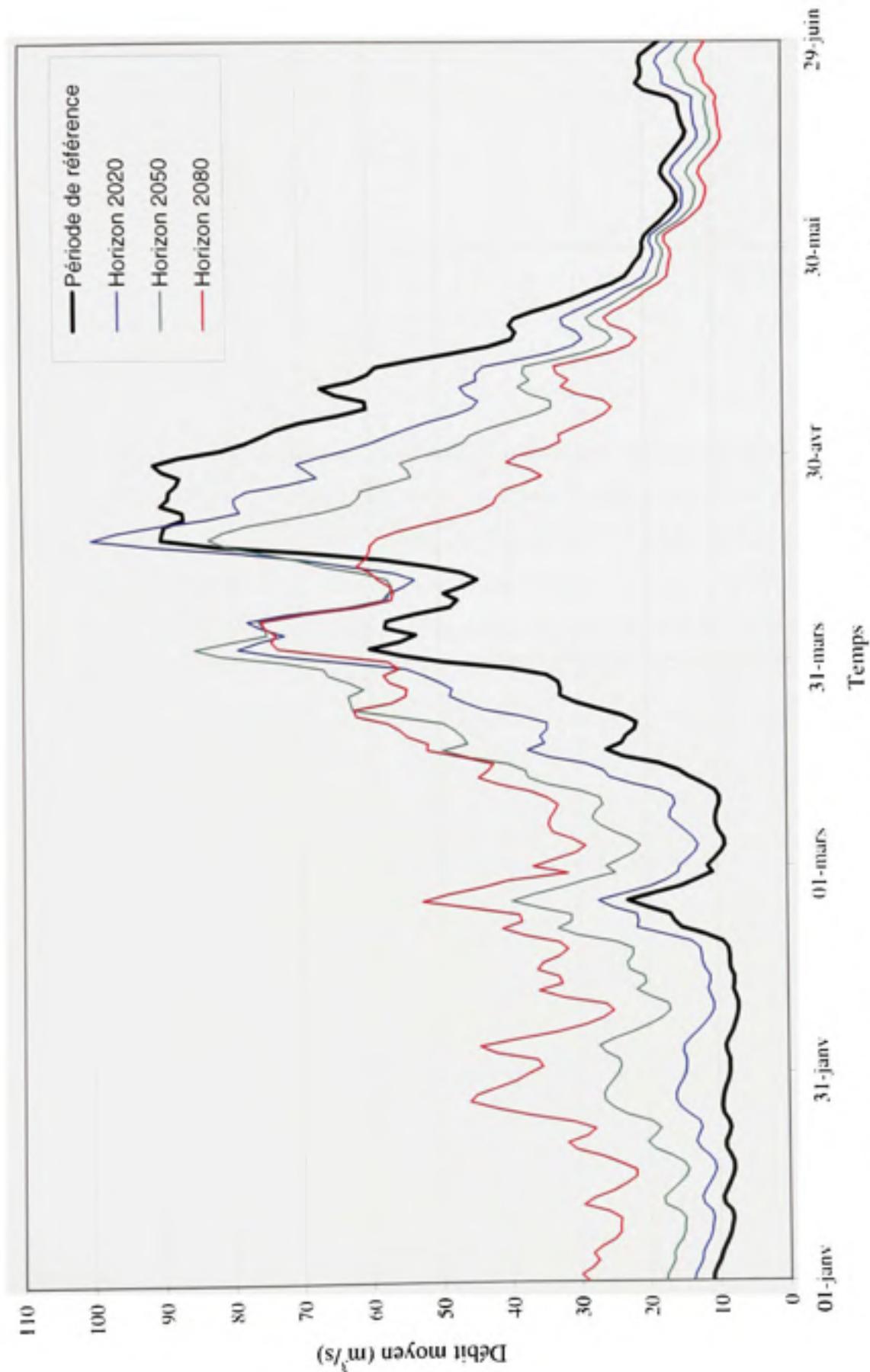


Figure 4.3 Évolution de l'hydrogramme moyen pour les périodes hivernale et printanière simulées sous CGCM3 pour un scénario d'émission A2.

4.4.2.3 Période été-automne

De façon générale, une baisse des quantiles de crues est observée pour la majorité des MCG et scénarios d'émissions. Toutefois, il importe de souligner les importantes limites de la méthode des deltas, pour cette période de l'année. Premièrement, la sous-estimation de la variabilité climatique est la principale limite de la méthode, puisque celle-ci influence l'intensité des précipitations. Bien que l'ampleur des crues d'été-automne puisse être la conséquence d'une longue série d'événements pluvieux, celles-ci sont également le résultat d'intenses précipitations sur un court laps de temps (crues éclairs).

Par conséquent, les résultats obtenus dans cette étude pour cette période doivent être considérés avec de larges réserves. Ainsi, une baisse des quantiles de crues est observée pour la présente étude, lorsque des méthodes permettant d'estimer la plus grande variabilité climatique inhérente aux changements climatiques seront employées, une forte augmentation des quantiles de crues d'été-automne pourrait alors être observée. Le tableau 4.9 présente l'évolution de certaines crues d'été-automne et la section 2 de l'annexe 6 (A6.2) présente les échantillons et les résultats de toutes les analyses de fréquences pour cette période.

Tableau 4.9

Débits de crues été-automne pour les horizons 2020, 2050 et 2080

Récurrence	2 ans			20 ans			100 ans		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Référence	58			180			267		
CGCM3-B1	52,3	58,9	62,4	146	150	144	205	205	193
CGCM3-A1B	57,1	63,5	74,7	157	146	160	220	192	205
CGCM3-A2	57,2	70,6	78,3	148	169	142	203	226	165
ECHAM4-B2	49,1	52,8	48,8	141	125	102	205	170	128
ECHAM4-A2	42,9	56,8	66,9	123	120	134	180	153	163
HADCM3-B2	65,2	59,6	65,1	167	136	135	232	178	170
HADCM3-A2	49,5	58,9	48,8	161	160	116	241	226	156

4.4.2.4 Période hivernale

La période hivernale (décembre à février) présente généralement des crues nettement inférieures à la période printanière, mais celle-ci présente toutefois un certain intérêt en regard aux inondations. Durant cette période, les rivières sont généralement couvertes par un couvert de glace et le risque d'inondation par embâcles est par conséquent présent. Ainsi, pour un débit donné, la présence d'un embâcle peut faire en sorte d'augmenter de façon substantielle les niveaux d'eau atteints. Par conséquent, même si les débits sont plus faibles, les niveaux d'eau peuvent atteindre ou même dépasser ceux des crues printanières.

Si une tendance forte peut être tirée de cette étude, elle concerne les crues durant la période hivernale. Le tableau 4.10 présente les quantiles de crues pour les récurrences de 2, 20 et 100 ans pour les différents horizons pour la période hivernale.

Tableau 4.10

Débits de crues hivernales pour les horizons 2020, 2050 et 2080

Récurrence	2 ans			20 ans			100 ans		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Référence		21,7			173			346	
CGCM3-B1	26,8	45,1	63,3	192	214	230	376	385	391
CGCM3-A1B	30,2	65,1	98,9	202	219	265	386	362	378
CGCM3-A2	32,3	70,2	123	194	232	267	364	381	358
ECHAM4-B2	35,3	66,4	99,1	192	189	218	341	280	291
ECHAM4-A2	28,9	66	114	173	188	209	328	293	266
HADCM3-B2	32,3	46,1	64,3	185	190	198	345	332	318
HADCM3-A2	25,3	48,6	72,7	173	202	214	339	353	315

Pour tous les MCG employés et pour tous les scénarios d'émissions de GES utilisés, la hausse des débits hivernaux (Figure 4.3) semble se traduire par la hausse systématique des crues hivernales de récurrence inférieure à 20 ans. Pour les plus importantes récurrences (50 et 100 ans), les résultats entre les différents MCG et SE doivent être nuancés puisque certains laissent entrevoir une baisse tandis que d'autres prévoient une hausse de ces quantiles.

Tel que mentionné à la section 2.2.6.3 (Caractérisation des crues extrêmes), la crue de février 1981 est exceptionnelle de par son ampleur ($345 \text{ m}^3/\text{s}$) et de sa date d'occurrence. Par conséquent, cette crue vient fortement teinter l'analyse de fréquence des crues en induisant une augmentation des quantiles de crues, de la variabilité (traduite par le coefficient de variation) et de l'asymétrie des échantillons. Suite à l'analyse des crues hivernales pour les horizons 2020, 2050 et 2080, il appert qu'une baisse de la variabilité et de l'asymétrie sont prévues. Cette observation sous tend une baisse de la valeur exceptionnelle de cette crue ainsi qu'une certaine « normalisation » des crues hivernales. À titre d'exemple, le tableau 4.11 présente cette situation pour le MCG HadCM3 pour le scénario d'émission A2.

Tableau 4.11

Évolution des quantiles de crues hivernales à la station 040110 simulés par HadCM3 selon le scénario d'émission A2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
Crue moyenne (m ³ /s)	48,1	51,3	69,7	92
Écart-type (m ³ /s)	66,7	64,7	73,2	61,1
Coefficient de variation	1,39	1,26	1,05	0,665
Coefficient d'asymétrie	4,42	4,3	3,68	2,07

La section 3 de l'annexe 6 (A6.3) présente tous les échantillons et les résultats de toutes les analyses de fréquences pour cette période.

4.4.2.5 Période annuelle

Sur la base de la méthodologie employée, il appert que les crues annuelles demeurent fortement influencées par les crues printanières. Ainsi, même si les quantiles de crues annuelles sont légèrement supérieurs à ceux des crues printanières, les mêmes conclusions peuvent être tirées. Ainsi, la baisse des crues moyennes et des crues de faible récurrence est observée. Pour ce qui est des plus fortes récurrences, ECHAM4 prévoit une baisse, tandis que CGCM3 et HadCM3 prévoient leur augmentation. Le tableau 4.12 présente l'évolution de certaines crues annuelles et la section 4 de l'annexe 6 (A6.4) présente les résultats de toutes les analyses de fréquences pour la période annuelle.

Tableau 4.12

Débits de crues annuelles pour les horizons 2020, 2050 et 2080

Récurrence	2 ans			20 ans			100 ans		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Référence		197			304			364	
CGCM3-A1B	181	180	186	297	317	331	386	404	414
CGCM3-A2	181	184	188	290	336	313	367	431	379
ECHAM4-A2	154	145	137	265	274	231	334	343	279
HADCM3-A2	175	186	170	274	315	323	342	393	405
CGCM3-B1	181	191	182	292	314	331	378	415	434
ECHAM4-B2	162	143	145	273	263	263	339	323	327
HADCM3-B2	180	178	178	279	295	320	346	369	398

4.5 Détermination de la plage d'incertitudes

La délimitation d'une zone inondable de récurrence 20 ou 100 ans se fait actuellement en considérant certaines incertitudes, notamment au niveau hydrologique. Avec les changements climatiques, les incertitudes deviennent une réalité plus tangible en regard aux « possibles futurs ». La plage d'incertitude est établie en supposant l'équiprobabilité des projections climatiques des différents MCG-SE. Par conséquent, plusieurs « futurs » apparaissent comme possible. Pour illustrer cette problématique, la figure 4.4 présente les différents hydrogrammes annuels des débits moyens obtenus à partir des projections climatiques des MCG-SE pour l'horizon 2080. Comme on peut le constater, les débits moyens hivernaux, printaniers et pour les périodes estivales et automnales diffèrent entre les différents MCG-SE.

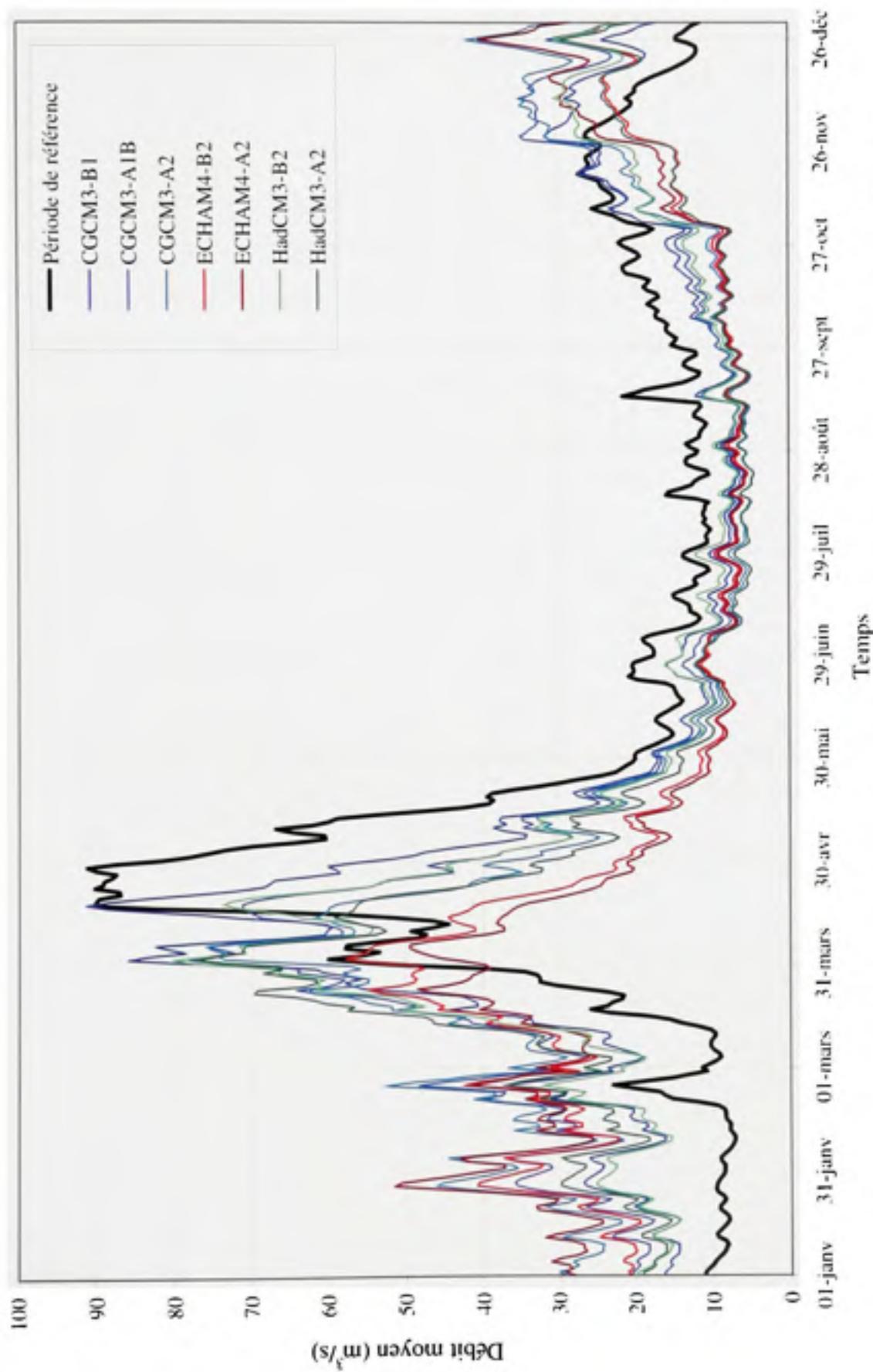


Figure 4.4 Plage d'incertitude à l'horizon 2080 illustrée par les hydrogrammes annuels des débits moyens.

Parallèlement, pour une récurrence et un horizon donné, un échantillon de débits est obtenu en regard des MCG-SE employés. À partir de cet échantillon, la détermination de la probabilité de non-dépassement (P.N.-D.) des différents débits s'effectue à l'aide de différents centiles.

Puisque la cartographie des zones inondables s'effectue à l'aide des crues annuelles, la plage d'incertitude est établie à partir de celles-ci. Le tableau 4.13 présente les différents centiles des crues de récurrence 20 et 100 ans pour les trois horizons considérés.

Tableau 4.13

Centiles de crues vicennales et centennales pour les horizons 2020, 2050 et 2080 à la station 040110 sur la rivière du Nord

Probabilité de non-dépassement	Crues 20 ans (m ³ /s)			Crues 100 ans (m ³ /s)		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
95 %	296	330	331	384	426	428
50 %	279	314	320	346	393	398
5 %	267	266	241	336	329	293
Référence	304			364		

4.6 Détermination de l'évolution « probable »

Les différents MCG employés induisent tous un certain biais car ils ne reproduisent pas fidèlement le climat du bassin versant pour la période de référence historique. L'évolution « probable » peut être définie à partir du modèle représentant le mieux la période de référence en regard des températures, des précipitations et des débits générés sous ces conditions météorologiques.

Afin de déterminer ce modèle, des « poids » sont attribués aux différents critères établis. Par rapport aux précipitations et aux températures, le coefficient de corrélation et l'écart-type de l'erreur sont employés. Par ailleurs, comme les différents MCG ne représentent pas

parfaitement le climat de la période de référence, l'impact de ces différences est vérifié sur le régime hydrologique pour la période printanière. Le critère employé pour cet aspect est le coefficient de Nash-Sutcliffe.

Afin d'attribuer un poids relatif aux différents MCG-SEM, une note relative (en pourcentage) est attribuée à chacun des critères. À cet effet, pour le coefficient de corrélation, la note correspond au coefficient de corrélation multiplié par 100. Pour le coefficient de Nash-Sutcliffe, le même principe est employé, soit le coefficient multiplié par 100. Pour l'écart-type de l'erreur, la note est établie en utilisant une relation linéaire, laquelle attribue une note de 100 si l'écart-type de l'erreur est de 0. À l'inverse, la note de 0 est attribuée au modèle présentant le plus grand écart-type de l'erreur (Figure A7.1 et A7.2 à l'annexe 7).

Suivant l'attribution des notes à chaque critère des différents MCG-SEM, une note globale est attribuée au MCG-SEM en faisant varier le poids relatif de chacun de ces critères. Il est important de prendre note que le poids total attribué aux différents critères doit être égal à 100 (Tableau A7.1).

Puisque les simulations hydrologiques ont été effectuées avec les différents MCG-SE avec les membres « M » moyennés le même principe est employé pour attribuer une note globale à chaque MCG-SE (Tableau A7.2).

Puisqu'il est difficile d'attribuer une importance relative et donc un poids à chacun des critères, une analyse de sensibilité est effectuée en distribuant des poids différents à chaque critère. Ainsi, 12 cas ont été étudiés (Tableau A7.3). Suivant les 12 cas d'attribution de poids aux différents critères, les notes globales des différents MCG-SE varient (Tableau A7.4). Enfin un poids relatif aux différents MCG-SE est attribué en fonction de leurs notes globales (Tableau A7.5).

Au terme de l'exercice, le modèle HadCM3 est retenu pour définir l'évolution « probable » du climat et son influence sur le régime des crues car ce modèle reproduit avec le plus d'exactitude le climat observé. Par ailleurs, le régime hydrologique sous ce modèle demeure le plus fidèle au régime hydrologique observé.

Puisque deux scénarios d'émissions sont modélisés par ce modèle (B2 et A2) et que ces scénarios d'émissions doivent être considérés comme équiprobables, l'évolution « probable » est définie comme la moyenne des résultats issus de ces deux scénarios. Pour illustrer cette évolution, la figure 4.5 présente l'hydrogramme annuel des débits moyens. Ainsi, une tendance à la diminution des débits moyens printaniers et estivaux est prévue contrairement à ceux de la période hivernale. Le tableau 4.14 présente les évolutions probables des crues de récurrence 20 et 100 ans.

Tableau 4.14

Évolution « probable » des crues pour les horizons 2020, 2050 et 2080 à la station 040110 sur la rivière du Nord

	Crues 20 ans (m ³ /s)			Crues 100 ans (m ³ /s)		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Probable B2	279	295	320	346	369	398
Probable A2	274	315	323	342	393	405
Probable	277	305	322	344	381	402
Référence		304			364	

En comparaison à la plage d'incertitude, les débits de l'évolution « probable » correspondent environ aux débits de la probabilité de non dépassement de 50%.

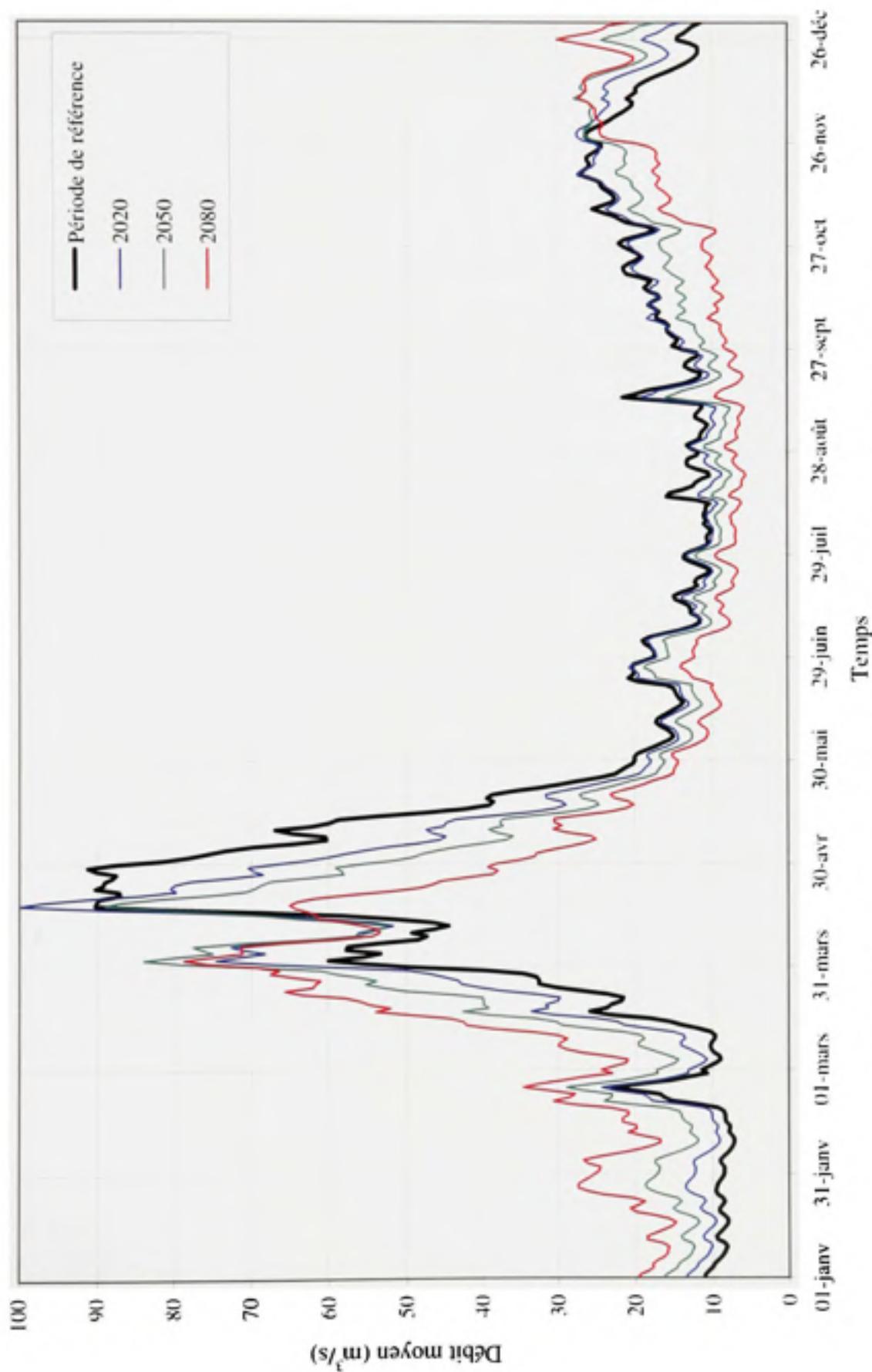


Figure 4.5 Évolution probable de l'hydrogramme annuel des débits moyens.

CHAPITRE 5

MODÉLISATION HYDRAULIQUE

5.1 Objectifs de la modélisation

La modélisation hydraulique sert à déterminer les niveaux d'eau atteints et les superficies inondées au passage des crues. Dans l'approche actuelle, la modélisation hydraulique a pour objectif la délimitation des zones inondables pour des récurrences de 20 et 100 ans. Les changements climatiques apportent toutefois de nouvelles problématiques : des incertitudes bien plus grandes et une évolution du régime des crues. À cet effet, le premier objectif de la modélisation hydraulique est d'estimer l'ampleur que peuvent entraîner les incertitudes tant sur les débits, les niveaux d'eau et les superficies inondées. Le second objectif est d'évaluer les impacts de l'évolution des crues sur les niveaux et sur les superficies inondées.

5.2 Description et localisation du secteur d'étude

Le secteur d'étude a été cartographié comme zone inondable initialement dans le cadre de la Convention entre les gouvernements du Canada et du Québec relativement à la cartographie et à la protection des plaines d'inondation en 1992. À cette époque, près de 41 km de la rivière du Nord ont été modélisés entre les villes de Saint-Jérôme et Lachute (Figure 5.1). Le secteur d'étude actuel est tiré des cartes de risques d'inondation 31G09-020-1307-0 et 31G09-020-1407-3 (Environnement Canada et le Ministère de l'Environnement du Québec, 1992) produites dans le cadre de cette Convention.

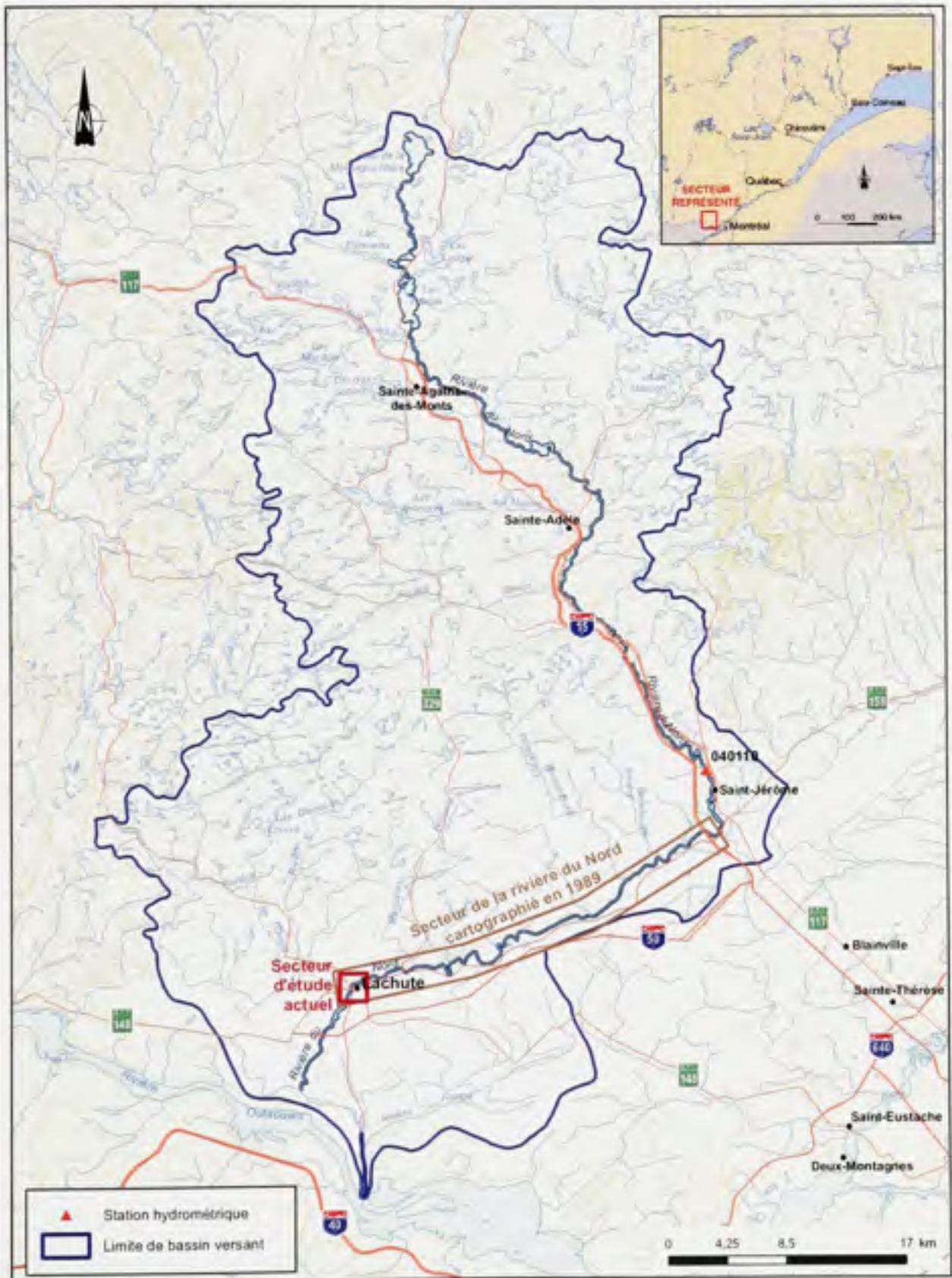


Figure 5.1 Localisation du secteur d'étude.

Pour l'étude actuelle, le secteur modélisé de la rivière du Nord se situe dans la zone urbaine de la ville de Lachute. Celui-ci est présenté sur la figure A8.1 à l'annexe 8 et les photographies y apparaissant ont été prises le 21 avril 2007.

D'une longueur d'environ 2,7 km, le secteur débute à environ 100 m en amont du barrage Wilson et se termine à la hauteur d'un parc où plusieurs terrains de sport sont présents. Dans ce secteur, trois ponts enjambent le cours de la rivière du Nord. De l'aval vers l'amont, ces ponts sont ceux de la rue Millway, un pont ferroviaire et celui de la route 148 (rue principale). Enfin, la confluence de la rivière de l'Ouest avec la rivière du Nord se trouve dans ce secteur.

5.3 Modèle hydraulique

La cartographie officielle de 1992 a été effectuée à l'aide du modèle numérique HEC-2 (USACE, 1991). Ce programme de calcul est à l'origine du modèle hydraulique employé dans cette étude, soit HEC-RAS version 3.1.3 (USACE, 2005).

5.3.1 Description du modèle

HEC-RAS est un modèle hydraulique unidimensionnel (1D) qui emploie la méthode de calcul dite du « Standard Step Method » pour établir le profil de l'écoulement. Ainsi, pour chaque section perpendiculaire à l'écoulement, une vitesse et une hauteur d'eau est calculée pour un débit donné. Pour ce modèle, l'écoulement peut être graduellement varié et les changements rapides de régimes, tel que les ressauts, peuvent également être reproduits. Le principe de calcul en régime permanent est basé sur la résolution de l'équation de la conservation de l'énergie entre deux sections de cours d'eau.

5.3.2 Données d'entrée

Les données d'entrée nécessaire à l'assemblage du modèle hydraulique sont les mêmes que celles employées lors de l'établissement de la cartographie officielle en 1992.

5.3.2.1 Choix et profils des sections

Le choix des sections pour le bief modélisé a été établi en 1989 (Boucher *et al.*, 1989). Ainsi, un total de 25 sections perpendiculaires à l'écoulement ont été choisies selon la topographie du terrain, l'emplacement des tributaires et des ponts.

Pour chacune des sections, le profil du lit a été établi à l'aide d'un échosondeur, alors que le profil des berges a été déterminé à l'aide de relevés d'arpentage. Pour les sections nécessitant l'extension des berges, un modèle numérique de terrain à l'échelle 1 :2 000 avec des courbes de niveau à tous les 0,5 m a été employé.

5.3.2.2 Ponts

Afin de caractériser l'influence des ponts sur les écoulements, les caractéristiques géométriques de ceux-ci doivent être définies. Ainsi, la localisation et les dimensions des culées et des piliers doivent être indiquées. Par ailleurs, si les débits deviennent assez importants, le tablier d'un pont peut devenir une obstruction à l'écoulement. À cet effet, le niveau du soffite doit être spécifié ainsi que le niveau et la largeur du tablier. Le tableau 5.1 présente les caractéristiques des trois ponts considérés.

Tableau 5.1

Caractéristiques des ponts enjambant la rivière du Nord à Lachute dans le bief modélisé
(Tiré de Boucher *et al.*, 1989)

Pont	Niveau (m)		Tablier (m)	
	Soffite	Garde corps	Hauteur	Largeur
Rue Millway	61,73	63,90	1,9	10,8
Ferroviaire	62,82	63,68 (Tablier)	0,86	7,8
Route 148	61,88	64,05	1,3	16,0

Source : Les niveaux indiqués dans ce tableau sont tirés du modèle hydraulique unidimensionnel Hec-Ras utilisé en 1989 pour établir les zones inondables du secteur d'étude.

5.3.2.3 Coefficients de rugosité

Les coefficients de rugosité (Manning) sont établis en fonction de la nature du lit de la rivière et des berges. Pour le tronçon aval du modèle, le coefficient de rugosité du lit de la rivière varie entre 0,065 et 0,090 en raison de la présence d'affleurement rocheux et de gravier grossier. Pour le bief amont, le coefficient de rugosité varie entre 0,025 et 0,031 car du gravier plus fin est présent. Pour les berges, les coefficients sont évalués en regard de la nature des berges pour chacune des sections (tableau 5.2). Les coefficients de rugosité pour chacune des sections sont présentés au tableau.

Tableau 5.2

Coefficients de rugosité des berges
(Tiré de Boucher *et al.*, 1989)

Nature des berges	Coefficient de rugosité
Aménagements urbains	0,070 – 0,080
Forêt	0,060 – 0,070
Broussaille	0,055 – 0,060
Aulnes et champs en culture	0,050 – 0,055

Source : Ce tableau est tiré de l'étude *Cartographie des zones inondables – Rivière du Nord* de Boucher *et al.*, 1989, p.9

5.3.2.4 Conditions aux limites

Afin d'établir les profils d'écoulement, une condition à la limite aval du modèle doit être imposée. À cet effet, une relation niveau-débit au droit de la section 1 (255) est définie à l'aide de relevés de niveaux et de débits effectués en 1971 et 1985. À partir de cette relation, une extrapolation est effectuée pour atteindre les valeurs de débits à modéliser. Le tableau 5.3 présente les niveaux et les débits relevés et la figure A8.2 à l'annexe 8 présente la relation niveau-débit ainsi produite.

Tableau 5.3

Relation niveau-débit aval du modèle hydraulique
(Tiré de Boucher *et al.*, 1989)

Date	Niveau d'eau géodésique (m)	Débit (m ³ /s)
21-10-1971	58,84	19,2
19-10-1971	58,88	22,5
01-05-1985	59,77	191,9
24-04-1985	59,97	244,3
26-04-1985	60,00	254,3

Source : Ce tableau est tiré de l'étude *Cartographie des zones inondables – Rivière du Nord* de Boucher *et al.*, 1989, p.11.

5.3.2.5 Calibrage du modèle

Le modèle hydraulique sert à l'établissement des cotes d'inondations de récurrence 20 ans et 100 ans. Puisque les coefficients de rugosité sont influencés par le débit, le calibrage du modèle doit être effectué avec des mesures à des débits représentatifs des débits à modéliser. À cet effet, le calibrage du modèle a été effectué à partir de mesures de niveaux d'eau et de débits datant du 24 avril 1985. Lors de cette journée, un débit de 244 m³/s à Lachute permet d'obtenir un calibrage représentatif des conditions pouvant être observées lors des crues de récurrence de 20 ans et 100 ans. Les résultats du calibrage du modèle sont présentés au tableau 5.4.

Tableau 5.4

Caractéristiques du modèle hydraulique et résultats du calibrage
(Tiré de Boucher *et al.*, 1989)

Numéro de section	Distance cumulative (m)	Thalweg (m)	N.E. observé 24-04-1985 (m)	Calibrage (m)	Coefficient de rugosité		
					R.G.	Canal	R.D.
237	2708	56,69		61,12	0,05	0,025	0,06
238	2556	55,47		61,10	0,05	0,025	0,06
239	2403	55,01		61,09	0,05	0,025	0,06
240	2251	51,81		61,09	0,05	0,025	0,06
243	1791	52,27		61,08	0,08	0,025	0,06
245	1486	55,47		61,05	0,08	0,025	0,06
246	1334	55,32		61,05	0,08	0,025	0,06
247	1181	56,5		61,04	0,08	0,025	0,06
248	1029	56,2		61,03	0,08	0,025	0,06
249	876	54,22		61,03	0,08	0,025	0,06
250	724	54,68		61,01	0,08	0,025	0,06
251	572	54,37	60,99	61,01	0,08	0,025	0,06
251,2	547	56,13		60,93	0,08	0,047	0,08
251,3	547	56,13	60,94	60,93	0,08	0,047	0,08
251,4	541	56,45		60,92	0,08	0,047	0,08
251,7	470	57,39		60,87	0,08	0,047	0,08
251,8	458	57,13		60,85	0,08	0,090	0,08
251,9	458	57,13	60,86	60,82	0,08	0,090	0,08
252	446	54,25		60,83	0,08	0,090	0,08
253	294	54,25		60,66	0,08	0,090	0,08
254	141	54,25		60,50	0,08	0,088	0,08
254,53	54	56,6	60,04	60,06	0,08	0,075	0,08
254,57	54	56,4		59,98	0,08	0,075	0,08
254,6	37	56,18		59,97	0,08	0,065	0,08
255	0	53,33	59,97	59,97	0,08	0,065	0,08

Source : Ce tableau est tiré de l'étude *Cartographie des zones inondables – Rivière du Nord* de Boucher *et al.*, 1989. Tableau 3 en annexe.

5.4 Modélisation des zones inondables en eaux libres

5.4.1 Étude hydrologique

La modélisation hydrologique et les analyses de fréquences sont effectuées au droit de la station 040110, laquelle couvre un bassin versant de 1170 km². Pour être en mesure d'établir les débits de crues à la hauteur de la ville de Lachute, les débits doivent être transposés.

5.4.1.1 Bassin versant

Les superficies de bassin versant aux limites amont et aval du modèle hydraulique sont respectivement de 1597 et de 1989 km². Ces superficies correspondent respectivement au bassin versant de la rivière du Nord en aval du ruisseau Williams et à celle en aval de la rivière de l'Ouest.

5.4.1.2 Facteur de pointe

Les débits calculés par le modèle hydrologique et lors des analyses de fréquences correspondent au débit moyen journalier. Or, les dommages causés lors d'une crue surviennent lors de l'atteinte du niveau maximal lequel ne dure que de quelques minutes à quelques heures. Par conséquent, un débit instantané doit être considéré en majorant le débit moyen journalier par un facteur de pointe. Pour ce faire, la méthodologie utilisée consiste à prendre, pour une station donnée, tous les débits de crues dont il est possible d'obtenir le débit instantané correspondant. En divisant l'un par l'autre, la valeur du facteur de pointe est obtenue.

Pour la station 040110, 12 crues ont été utilisées et la valeur des coefficients de pointe varient entre 1,01 et 1,05. Le facteur de pointe moyen est donc de 1,03 (Boucher *et al.*, 1989).

5.4.1.3 Transposition des débits

La transposition des débits de la station 040110 au site à l'étude s'effectue à l'aide de la relation suivante :

$$Q_1 = \left[Q_{040110} \cdot \left(\frac{A_1}{A_{040110}} \right)^{0,73} \right] \cdot 1,03 \quad (5.1)$$

Où :

Q_1 est le débit recherché (m^3/s);

Q_{040110} est le débit provenant de la station 040110 (m^3/s);

A_1 est l'aire du bassin versant au site à l'étude (km^2);

A_{040110} est l'aire du bassin versant à la station 040110 ($1170 km^2$);

0,73 est l'exposant régional (Boucher *et al.*, 1989);

1,03 est le facteur de pointe.

5.4.2 Période de référence (1967-1990)

La modélisation hydraulique pour la période de référence est effectuée afin de fournir une base comparative pour les résultats des horizons futurs. Cette comparaison est faite en fonction des débits, des niveaux et des superficies inondées. Par ailleurs, afin de permettre une certaine appréciation des niveaux d'eaux, la modélisation des débits et niveaux observés le 21 avril 2007 (Figure A8.1, annexe 8) est effectuée.

5.4.2.1 Transposition des débits et conditions aux limites

Les débits de crues annuelles de récurrence 20 et 100 ans à la station 040110 sont respectivement de 304 et 364 m^3/s . Le débit du 21 avril 2007 est de 118 m^3/s et correspond au débit moyen journalier. Celui-ci a été obtenu du CEHQ (CEHQ, 2007) et il est important

de noter qu'au moment d'écrire ces lignes, ce débit est préliminaire et doit donc être utilisé avec circonspection.

À l'aide de l'équation 5.1, la transposition de ces débits est effectuée dans le secteur d'étude. Le niveau aval est obtenu de la courbe de tarage. Le tableau 5.5 présente les débits de récurrence des crues annuelles de 20 et 100 ans.

Tableau 5.5

Paramètres de modélisation de la rivière du Nord à Lachute – Période de référence

Localisation	21 avril 2007	Crue 20 ans	Crue 100 ans
Station 040110 (m ³ /s)	118	304	364
Aval du ruisseau Williams (m ³ /s)	152	393	471
Aval de la rivière de l'Ouest (m ³ /s)	178	461	552
Niveau aval (m)	59,68	60,66	60,83

5.4.2.2 Profils des écoulements et discussion

La simulation effectuée pour la journée du 21 avril 2007, permet de corroborer les observations visuelles faites sur le terrain (Figure 5.2). Selon les régimes d'écoulement observés dans le bief modélisé, deux secteurs bien distincts sont identifiés.

Le secteur amont, d'une longueur d'environ 2,1 km, se termine au droit du pont de la route 148. Ce secteur est caractérisé par une pente d'écoulement relativement faible avec un gradient hydraulique de 0,00062 m/m. Les méandres caractérisent ce secteur et sont représentatifs de la géomorphologie de la rivière du Nord entre Saint-Jérôme et Lachute. Les vitesses moyennes varient entre 0,4 et 0,7 m/s. Pour le débit simulé de 152 m³/s, un débordement dans les marécages de la rive droite est observé. La présence de l'escarpement Laurentien sur cette rive limite l'étendue de la plaine d'inondation.

Le bief aval s'étend du pont de la route 148 jusqu'à la limite aval du modèle sur une distance d'environ 600 m. Le lit de la rivière est caractérisé par la présence de deux hauts fonds, le premier étant localisé à proximité du pont de la rue Millway et le second entre le pont ferroviaire et celui de la route 148. En aval du pont ferroviaire, le long de l'avenue Argenteuil, la berge gauche est bétonnée sur une longueur d'environ 300 m. Ce bief possède une pente d'écoulement plus importante et les vitesses d'écoulement sont plus rapides comparativement au bief amont. Ainsi, pour des débits simulés de 152 et 178 m³/s (apports de la rivière de l'Ouest), les vitesses moyennes varient entre 0,62 et 1,72 m/s et le gradient hydraulique est de 0,00125 m/m.

Pour les débits de récurrence de 20 et 100 ans, la délimitation des secteurs amont et aval est conservée. Toutefois, il appert que le pont de la route 148 contribue au rehaussement des niveaux dans le bief amont en créant une restriction. En effet, en amont du pont (section 13), les niveaux d'eau atteignent respectivement 62,30 m et 62,81 m pour les crues vicennale et centennale soit des niveaux supérieurs à celui du soffite du pont (61,88 m). Ainsi, pour les débits de récurrence de 20 et 100 ans, les pertes de charges calculées dans le bief amont sont identiques à 23 cm. Cette situation était également observée lors de la cartographie officielle effectuée en 1992. Une analyse de cette problématique est effectuée à la section 5.6. Pour le bief aval, les pertes de charges diffèrent entre les deux récurrences. Ainsi, pour la crue vicennale, la perte de charge est de 1,54 m, tandis que pour la crue centennale, elle est de 1,79 m. Les superficies inondées (incluant la rivière) sont respectivement de 0,75 km² et de 0,87 km² pour les crues de récurrence 20 et 100 ans. Les profils d'écoulement pour ces trois cas sont présentés par la figure 5.2 et les résultats des simulations sont présentés à l'annexe 9.

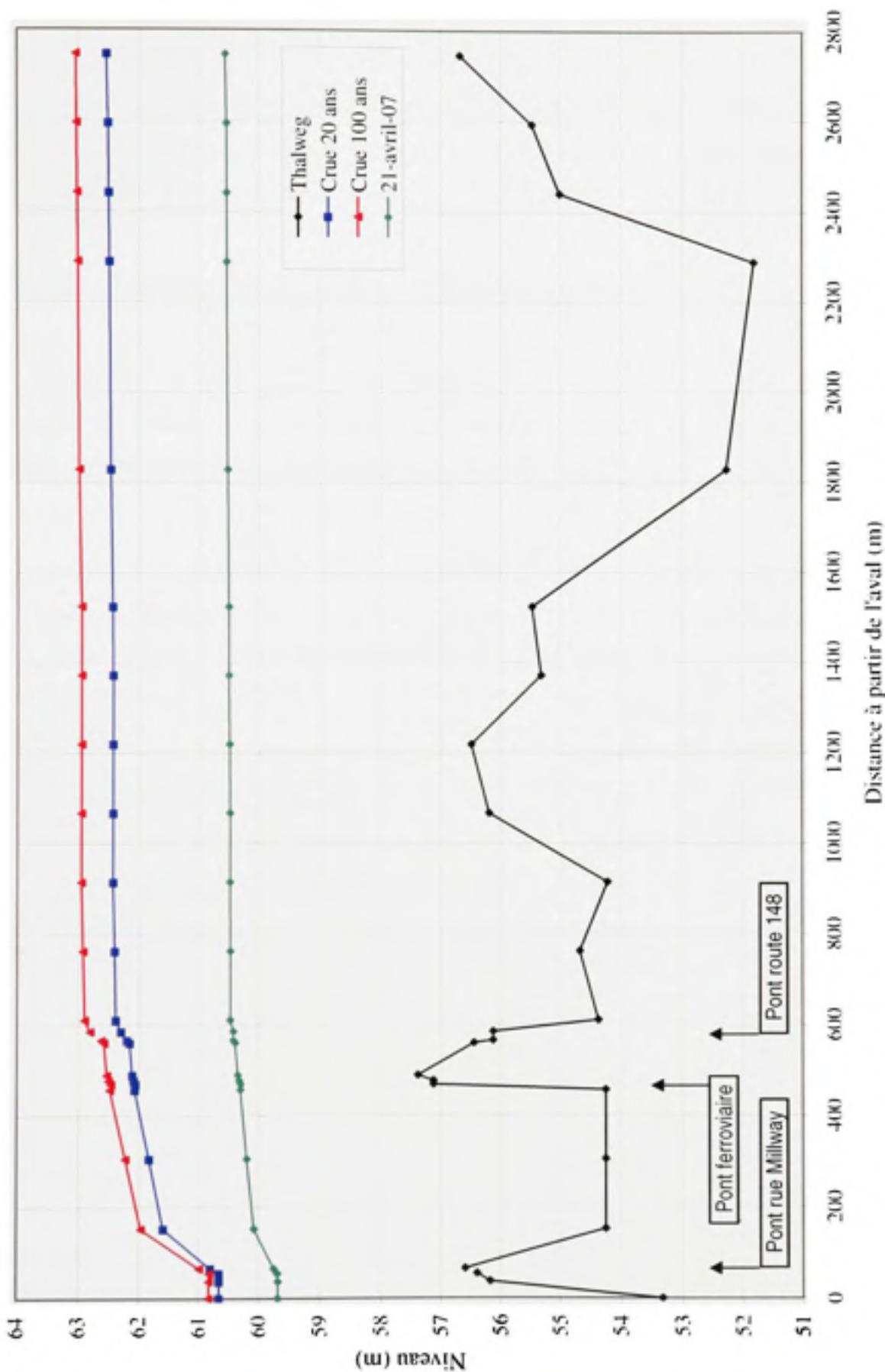


Figure 5.2 Profils des écoulements de la rivière du Nord à Lachute pour la période de référence.

5.4.3 Plage d'incertitude

Tel que défini à la section 4.5, la notion de plage d'incertitude réfère à l'obtention de plusieurs débits pour une récurrence et un horizon donné. Pour illustrer cette problématique, l'analyse porte sur les débits de récurrence 100 ans pour l'horizon 2080.

5.4.3.1 Transposition des débits et conditions aux limites

À l'aide de l'équation 5.1, la transposition de ces débits est effectuée dans le secteur d'étude. Le niveau aval est obtenu de la courbe de tarage. Le tableau 5.6 présente les différents débits de crues centennales pour l'horizon 2080.

Tableau 5.6

Paramètres de modélisation de la rivière du Nord à Lachute – Plage d'incertitude pour la crue centennale pour l'horizon 2080

Localisation	Référence	Probabilité de non-dépassement		
		5%	50%	95%
Station 040110 (m ³ /s) (Tableau 4.13)	364	293	398	428
Aval du ruisseau Williams (m ³ /s)	471	379	514	553
Aval de la rivière de l'Ouest (m ³ /s)	552	445	604	649
Niveau aval (m)	60,83	60,62	60,90	60,95

5.4.3.2 Résultats et analyses des simulations

Pour une récurrence de 100 ans et pour l'horizon 2080, les débits en aval de la rivière de l'Ouest, pour la plage d'incertitude, varient entre 445 et 649 m³/s. Cette forte variation entre les débits entraîne une grande disparité entre les écoulements et les délimitations des zones inondées.

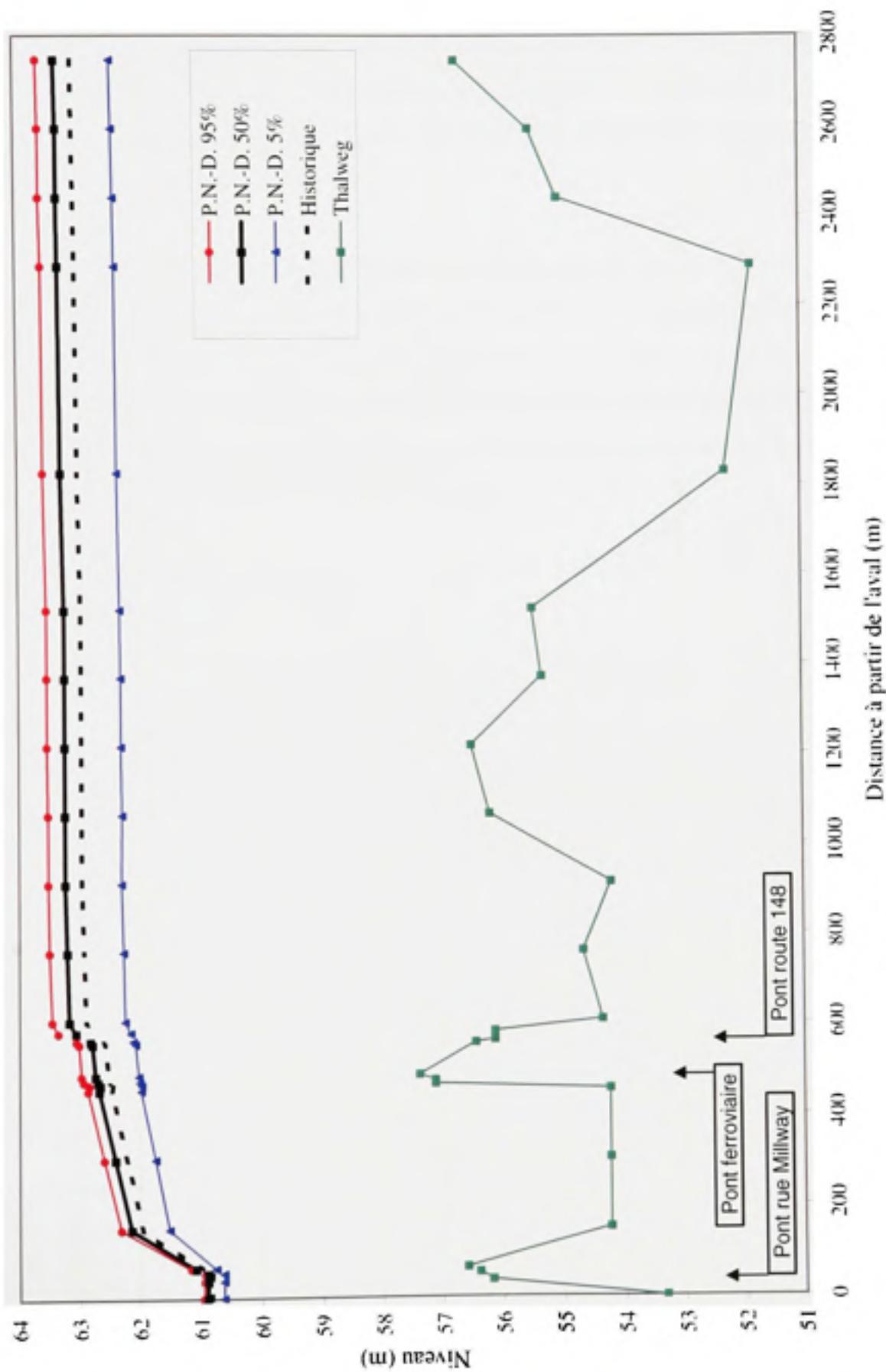
En fonction des débits simulés les résultats présentent d'importantes différences. Le tableau 5.7 présente les caractéristiques des écoulements pour les différents débits simulés et la figure 5.3 présente les profils d'écoulement. La figure A9.1 à l'annexe 9 présente la cartographie des zones inondées pour les différents cas. Les résultats de simulation sont présentés à l'annexe 9.

Tableau 5.7

Caractéristiques des écoulements simulés pour la plage d'incertitude des débits de récurrence 100 ans pour l'horizon 2080

Caractéristique	Bief	Référence	P, N.-D. (%)		
			5	50	95
Débit (m ³ /s)			445	604	649
Écart p/r période de référence		552	-19,4%	9,4%	17,6%
Niveau moyen (m)	Amont	62,96	62,31	63,24	63,53
Écart p/r période de référence			-0,65 m	0,28 m	0,57 m
Niveau moyen (m)	Aval	61,90	61,51	62,07	62,22
Écart p/r période de référence			-0,39 m	0,17 m	0,32 m
Superficie inondée (ha)			69,7	89,6	99,2
Écart p/r période de référence		86,9	-19,8%	3,1%	14,2%
Perte de charge (m)	Amont	0,23	0,23	0,25	0,25
Perte de charge (m)	Aval	1,79	1,5	1,93	2,11
Vitesse moyenne (m/s)	Amont	0,90	0,87	0,91	0,92
Vitesse moyenne (m/s)	Aval	1,90	1,68	2,00	2,08

La fluctuation des niveaux d'eau dans le bief amont en fonction des débits est plus importante en raison de la restriction causée par le pont mais également en raison de la faible pente naturelle de la rivière pour ce secteur. Par rapport à la période de référence, le niveau moyen amont varie entre une baisse de 65 cm et une hausse de 57 cm. Ainsi, l'incertitude sur le niveau moyen amont est de 1,22 m variant entre 62,31 et 63,53 m.



**Figure 5.3 Profil des écoulements de la rivière du Nord à Lachute
Plage d'incertitude - Horizon 2080 - Débit de récurrence 100 ans.**

Pour le bief aval, le gradient hydraulique, les pertes de charges et les vitesses sont plus importants, par conséquent, la variation des niveaux d'eaux pour les différents débits est moins marquée. Par rapport à la période de référence, le niveau moyen aval varie entre une baisse de 39 cm et une hausse de 32 cm. Ainsi, la fluctuation du niveau moyen amont est de 0,71 m variant entre 61,51 et 62,22 m.

La différence entre les zones inondées est principalement tributaire du faible relief présent sur la rive gauche de la rivière, soit la zone urbaine de la ville de Lachute. En rive droite, la présence de marécages et de l'escarpement Laurentien limite les fluctuations de l'étendue de la zone inondable. Ainsi, selon les débits, la variation des zones inondées s'effectue entre 69,7 et 99,2 ha. Par rapport à la période de référence, les superficies inondées varient entre une baisse de 17,2 et une hausse de 12,3 hectares.

5.4.4 Évolution « probable »

La notion d'évolution, positive ou négative, (section 4.6) implique le changement d'un débit d'une récurrence donnée par rapport à l'horizon de temps. L'évolution « probable » est définie à partir du MCG HadCM3 car celui-ci représente le mieux la période de référence. Tel que mentionné précédemment, l'évolution « probable » se compare aux débits de la plage d'incertitude pour une probabilité de non dépassement de 50%. Pour illustrer cette problématique, l'analyse porte sur les débits de récurrence 100 ans pour les horizons 2020, 2050 et 2080.

5.4.4.1 Transposition des débits et conditions aux limites

La transposition des débits est effectuée dans le secteur d'étude à l'aide de l'équation 5.1 et les niveaux aval sont obtenus de la courbe de tarage. Le tableau 5.8 présente les débits de crues centennales probables pour les horizons 2020, 2050 et 2080.

Tableau 5.8

Paramètres de modélisation de la rivière du Nord à Lachute – Évolution de la crue centennale probable pour les horizons 2020, 2050 et 2080

Localisation	Référence	Horizon		
		2020	2050	2080
Station 040110 (m ³ /s) (Tableau 4.14)	364	344	381	402
Aval du ruisseau Williams (m ³ /s)	471	445	492	519
Aval de la rivière de l'Ouest (m ³ /s)	552	522	578	609
Niveau aval (m)	60,83	60,78	60,87	60,91

5.4.4.2 Résultats et analyses des simulations

L'évolution des débits de récurrence de 100 ans pour les horizons 2020, 2050 et 2080 se caractérise par une hausse constante des quantiles de crues passant de 522 m³/s en 2020 jusqu'à 609 m³/s à l'horizon 2080. Cette évolution à la hausse des débits entraîne par conséquent une hausse des niveaux et des superficies inondées.

Le tableau 5.9 présente les caractéristiques des écoulements pour les différents débits simulés. La figure 5.4 présente les profils d'écoulement pour les différents débits simulés et la figure A9.2 à l'annexe 9 présente la cartographie des zones inondées pour les différents cas. Les résultats de simulation sont présentés à l'annexe 9.

Par rapport à la période de référence, le niveau moyen amont varie entre une baisse de 17 cm (horizon 2020) et une hausse de 31 cm (horizon 2080). Ainsi, la fluctuation du niveau moyen amont est de 0,48 m variant entre 62,79 et 63,27 m.

Pour le bief aval, le gradient hydraulique, les pertes de charges et les vitesses sont plus importants, par conséquent, la variation des niveaux d'eaux pour les différents débits est moins marquée. Par rapport à la période de référence, le niveau moyen aval varie entre une

baisse de 10 cm et une hausse de 18 cm. Ainsi, la fluctuation du niveau moyen amont est de 0,28 m variant entre 61,80 et 62,08 m.

Pour ce qui est des superficies d'inondations, la variation des zones inondées s'étend entre 85,5 et 89,6 ha. Par rapport à la période de référence, les superficies inondées varient entre une baisse de 1,4 et une hausse de 2,7 hectares.

Tableau 5.9

Caractéristiques des écoulements simulés pour l'évolution « probable »
des débits de récurrence 100 ans

Caractéristique	Bief	Référence	Horizon		
			2020	2050	2080
Débit (m ³ /s)		552	522	578	609
Écart p/r période de référence			-5,4%	4,7%	10,3%
Niveau moyen (m)	Amont	62,96	62,79	63,10	63,27
Écart p/r période de référence			-0,17 m	0,14	0,31
Niveau moyen (m)	Aval	61,90	61,80	61,99	62,08
Écart p/r période de référence			-0,10 m	0,09 m	0,18 m
Superficie inondée (ha)	N.A.	86,9	85,5	89,1	89,6
Écart p/r période de référence			-1,6 %	2,5%	3,1%
Perte de charge (m)	Amont	0,23	0,23	0,24	0,25
Perte de charge (m)	Aval	1,79	1,70	1,86	1,95
Vitesse moyenne (m/s)	Amont	0,90	0,90	0,91	0,92
Vitesse moyenne (m/s)	Aval	1,90	1,84	1,95	2,01

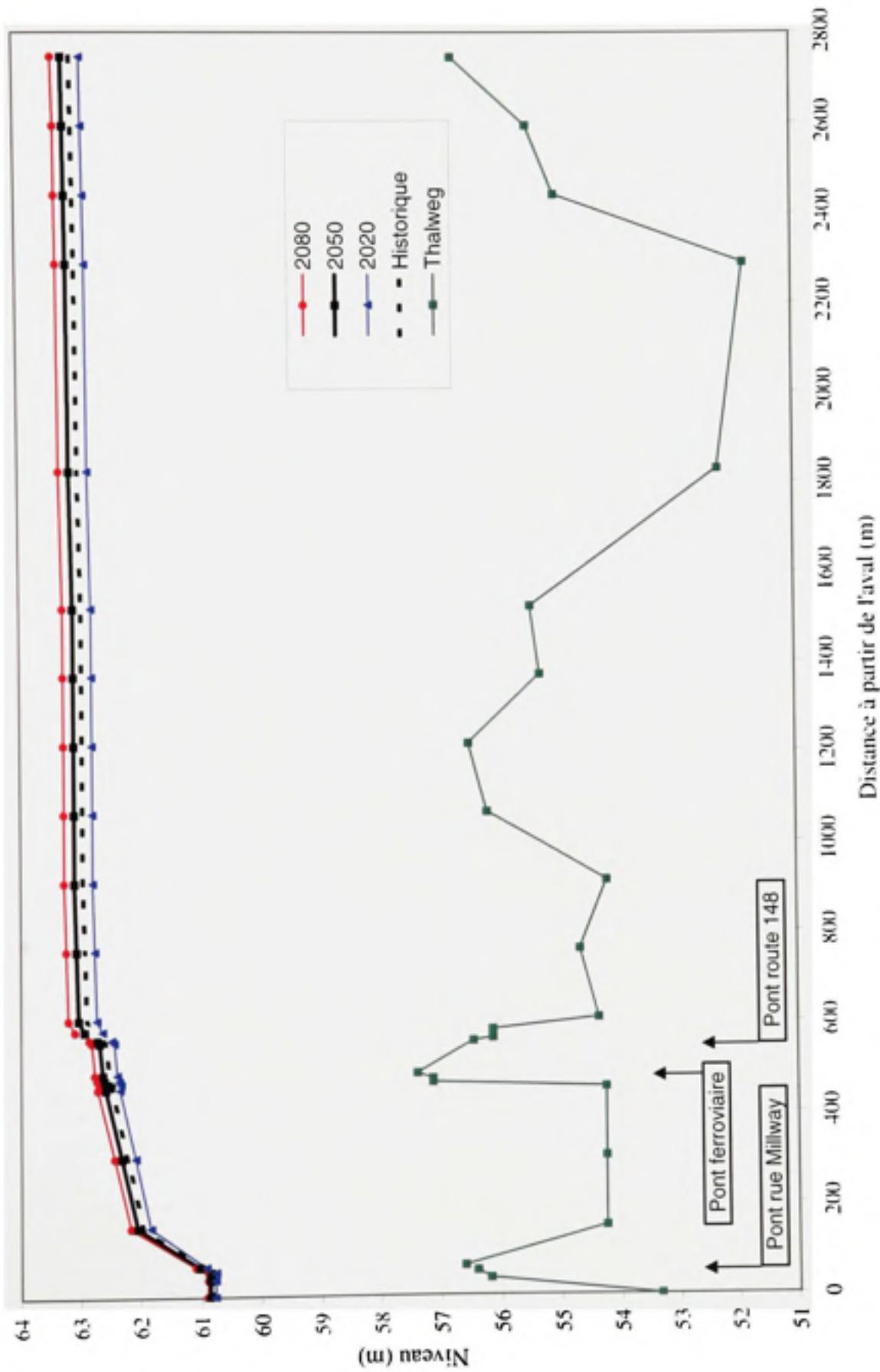


Figure 5.4 Profil de l'écoulement de la rivière du Nord à Lachute
Évolution probable de la crue de récurrence 100 ans.

5.5 Pont de la route 148 (rue principale)

Tel que démontré précédemment, la capacité hydraulique du pont de la route 148 est insuffisante pour les crues de récurrence 20 ans et 100 ans (pour la période de référence), puisque les niveaux d'eau dépassent le soffite du pont. Par conséquent, le pont contribue au rehaussement des niveaux et augmente l'étendue de la zone inondée dans le bief amont.

5.5.1 Capacité hydraulique du pont

La première étape de cette analyse consiste à calculer le débit maximal pouvant transiter sous le pont sans atteindre le soffite. Suite à cet exercice, il appert que le débit maximal est de 338 m³/s. À la station 040110, le débit correspondant est de 269 m³/s soit un débit légèrement inférieur à une crue annuelle de récurrence 10 ans (276 m³/s) pour la période de référence.

5.5.2 Influence du pont sur les niveaux

L'exercice consiste à simuler les débits avec l'élévation actuelle du tablier et dans un second temps avec l'élévation rehaussée afin d'assurer un écoulement libre sous le soffite. Suite aux simulations, l'écart entre les niveaux dans le bief amont est comparé. L'influence est calculée pour la période de référence et les horizons 2050 et 2080 pour les récurrences de 20 et 100 ans. L'évolution « probable » est employée.

Le tableau 5.10 présente les rehaussements au droit de point d'intérêts du bief modélisé pour les crues de récurrence 20 et 100 ans de la période de référence. Pour leur part, les tableaux 5.11 et 5.12 présentent les rehaussements pour les horizons 2050 et 2080.

Tableau 5.10

Comparaison des niveaux d'eaux dans le bief amont avec la configuration actuelle et rehaussée du soffite du pont de la route 148 pour la période de référence

Section	Crue 20 ans			Crue 100 ans		
	Débit (m ³ /s)	Niveaux d'eau (m)		Débit (m ³ /s)	Niveaux d'eau (m)	
		Soffite Actuel	Soffite Rehaussé		Soffite Actuel	Soffite Rehaussé
Pont (13)	393	62,30	62,22	471	62,81	62,64
19	393	62,44	62,37	471	62,96	62,81
Amont (25)	393	62,53	62,46	471	63,04	62,90

Tableau 5.11

Comparaison des niveaux d'eaux dans le bief amont avec la configuration actuelle et rehaussée du soffite du pont de la route 148 pour l'horizon 2050

Section	Crue 20 ans			Crue 100 ans		
	Débit (m ³ /s)	Niveaux d'eau (m)		Débit (m ³ /s)	Niveaux d'eau (m)	
		Soffite Actuel	Soffite Rehaussé		Soffite Actuel	Soffite Rehaussé
Pont (13)	394	62,31	62,23	492	62,94	62,75
19	394	62,45	62,38	492	63,10	62,93
Amont (25)	394	62,54	62,47	492	63,18	63,02

Tableau 5.12

Comparaison des niveaux d'eaux dans le bief amont avec la configuration actuelle et rehaussée du soffite du pont de la route 148 pour l'horizon 2080

Section	Débit (m ³ /s)	Crue 20 ans		Crue 100 ans		
		Niveaux d'eau (m)		Débit (m ³ /s)	Niveaux d'eau (m)	
		Soffite Actuel	Soffite Rehaussé		Soffite Actuel	Soffite Rehaussé
Pont (13)	416	62,46	62,35	519	63,10	62,88
19	416	62,60	62,51	519	63,27	63,07
Amont (25)	416	62,68	62,60	519	63,35	63,16

La première observation qui émane des simulations est relative à l'importance des débits. Ainsi, plus le débit est important, plus le rehaussement et la longueur de refoulement sont importants. Par conséquent, le rehaussement est plus important au droit du pont et diminue avec la distance.

5.5.3 Influences des changements climatiques sur les niveaux

Puisque le pont contribue au rehaussement des niveaux dans le bief amont, quel est le véritable impact sur les niveaux amont des changements climatiques, lesquels entraînent un rehaussement des quantiles de crues? A cet effet, les simulations sont effectuées avec la configuration rehaussée du tablier tant pour la période de référence que pour les horizons 2050 et 2080. Ainsi, seule la hausse des quantiles de crues attribuables aux changements climatiques contribue à l'augmentation des niveaux d'eau.

Les tableaux 5.13 et 5.14 présentent les hausses de niveaux attribuables aux changements climatiques dans le bief amont.

Tableau 5.13

Rehaussements des niveaux dans le bief amont causés par les changements climatiques pour l'horizon 2050

Section	Crue 20 ans			Crue 100 ans		
	Hausse débit (m ³ /s)	Niveaux (m) Période de référence	Horizon 2050	Hausse débit (m ³ /s)	Niveaux (m) Période de référence	Horizon 2050
Pont (13)	1	62,22	62,23	21	62,64	62,75
19	1	62,37	62,38	21	62,81	62,93
Amont (25)	1	62,46	62,47	21	62,91	63,02

Tableau 5.14

Rehaussements des niveaux dans le bief amont causés par les changements climatiques pour l'horizon 2080

Section	Crue 20 ans			Crue 100 ans		
	Hausse débit (m ³ /s)	Niveaux (m) Période de référence	Horizon 2080	Hausse débit (m ³ /s)	Niveaux (m) Période de référence	Horizon 2080
Pont (13)	23	62,22	62,35	48	62,64	62,88
19	23	62,37	62,51	48	62,81	63,07
Amont (25)	23	62,46	62,60	48	62,90	63,16

Contrairement au pont de la route 148, l'influence des changements climatiques s'exerce de façon plus importante non pas à proximité du pont mais plus en amont. La pente d'écoulement plus faible dans le bief amont comparativement à celui aval explique cette situation.

5.5.4 Analyses et discussions

Comme il a été démontré, les niveaux d'eau dans le bief amont du secteur d'étude sont influencés à la fois par le pont de la route 148 et par les effets des changements climatiques. Le rehaussement du soffite du pont apparaît comme une mesure de mitigation à envisager afin de limiter les hausses de niveaux d'eau dans le bief amont.

Suite à la simulation de la crue centennale pour l'horizon 2080, laquelle génère les plus forts débits, il appert que le niveau au droit du pont, au passage de cette crue avec le soffite rehaussé atteint l'élévation 62,88 m. Par conséquent, le rehaussement d'environ un mètre du soffite permettrait d'éliminer l'influence du pont sur les niveaux d'eau amont.

En regard à la récurrence et de l'horizon de temps, l'impact du rehaussement du soffite sur les niveaux d'eau par rapport à la période de référence est différent. Ainsi, pour l'horizon 2050, pour les crues de 20 et 100 ans, le rehaussement du soffite entraînerait une baisse des niveaux par rapport à la période de référence. Au passage des crues 20 et 100 ans, les niveaux atteindraient respectivement 62,23 et 62,75 m comparativement à 62,30 et 62,81 m pour la période de référence. Par ailleurs, les niveaux d'eau atteindraient respectivement 62,31 et 62,94 m au passage des crues 20 et 100 ans si la configuration actuelle est conservée. Enfin, le rehaussement du soffite amène une diminution des niveaux au droit du pont de 0,08 et 0,19 m au passage des crues 20 et 100 ans.

Pour l'horizon 2080, pour les crues de 20 et 100 ans, le rehaussement du tablier limite les hausses des niveaux d'eau, mais ceux-ci subissent tout de même une hausse par rapport à la période de référence. Au passage des crues de 20 et 100 ans, les niveaux atteindraient respectivement 62,35 et 62,88 m comparativement à 62,30 et 62,81 m pour la période de référence. Si la configuration actuelle est maintenue, les niveaux au droit du pont atteindraient 62,46 et 63,1 m respectivement au passage des crues de 20 et 100 ans. Globalement, le rehaussement du soffite au niveau de 62,89 m entraîne une baisse des niveaux de 0,11 et 0,22 m au droit du pont.

Le tableau 5.15 et les figures 5.5 et 5.6 présentent l'impact du rehaussement du tablier du pont sur les niveaux d'eau amont pour les récurrences 20 et 100 ans et les horizons 2050 et 2080 en comparaison à la période de récurrence.

Tableau 5.15

Impact du rehaussement du soffite du pont de la route 148 sur les niveaux au droit du pont par rapport à la période de référence (m)

Récurrence	Référence	Horizon 2050		Horizon 2080	
	(Pont actuel)	Niveau	Variation	Niveau	Variation
Crue 20 ans	62,30	62,23	-0,07	62,35	0,05
Crue 100 ans	62,81	62,75	-0,06	62,88	0,07

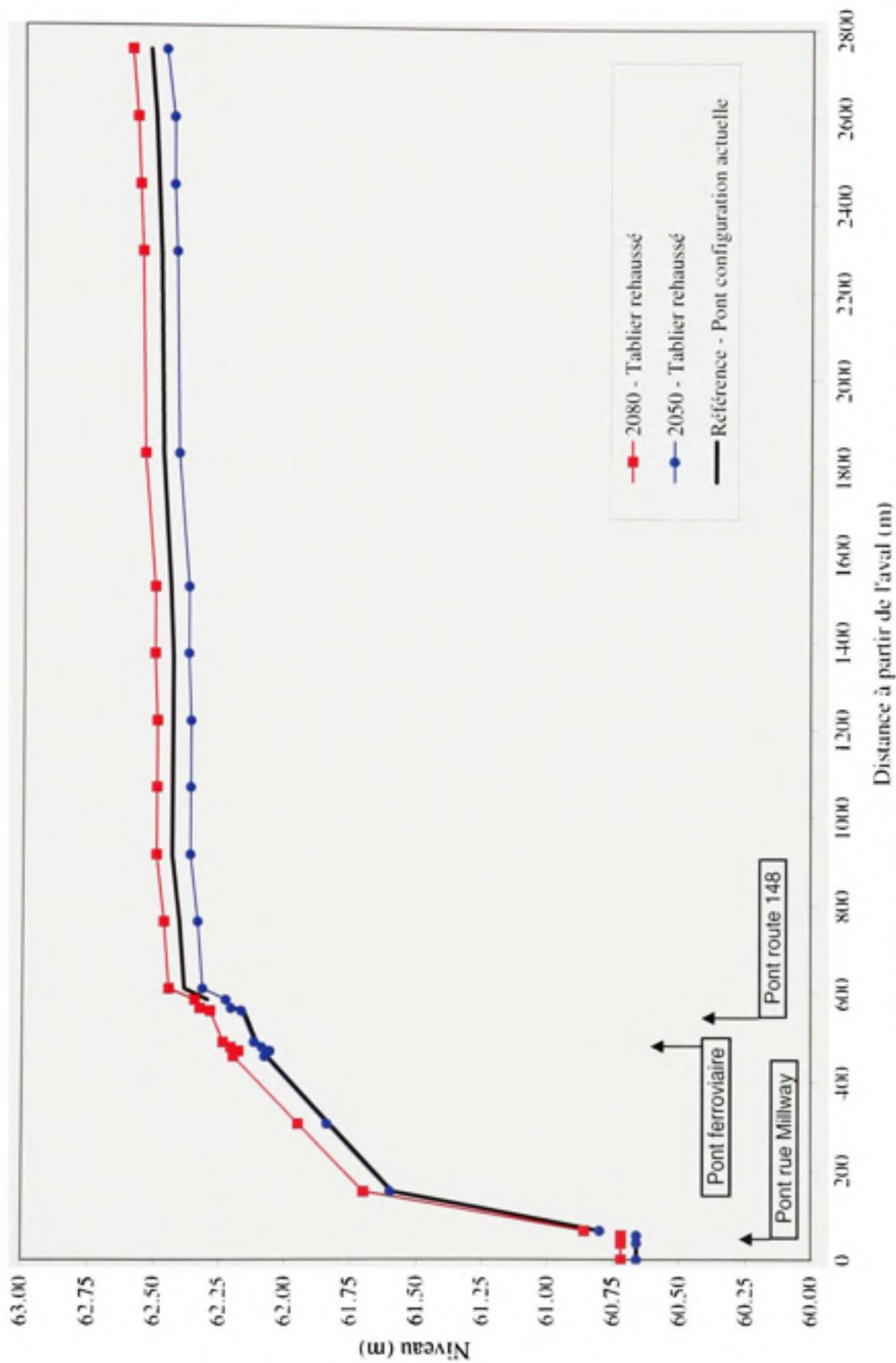


Figure 5.5 Profil de l'écoulement de la rivière du Nord à Lachute
Influence du rehaussement du tablier du pont pour les crues de récurrence 20 ans.

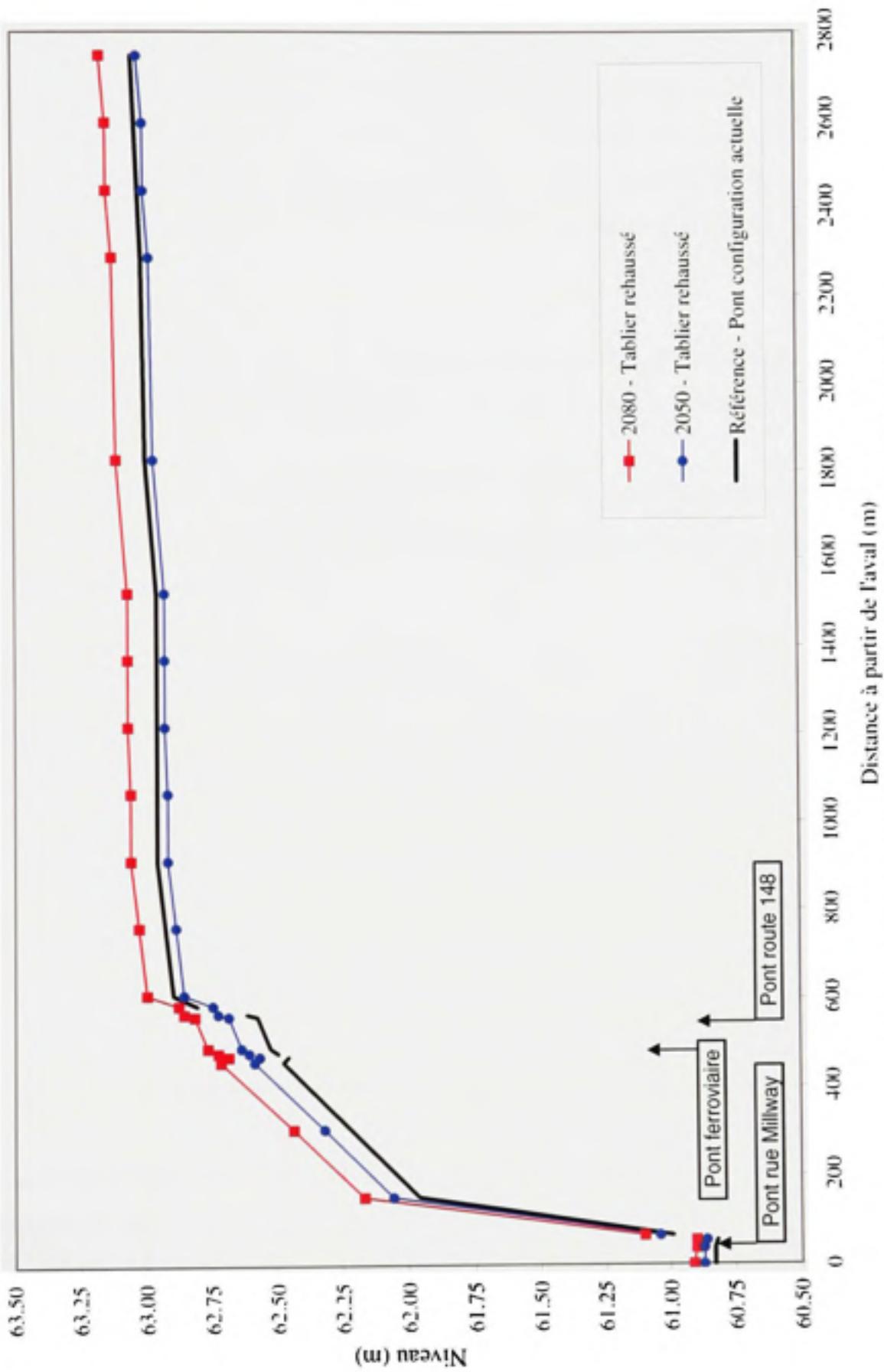


Figure 5.6 Profil de l'écoulement de la rivière du Nord à Lachute
Influence du rehaussement du tablier du pont pour les crues de récurrence 100 ans.

5.6 Rehaussement des niveaux pour la période hivernale

Un des impacts appréhendés des changements climatiques est la hausse des débits hivernaux ainsi que la plus grande occurrence de la formation d'embâcles de glace. Par conséquent, la cartographie des zones inondables dans le futur devrait prendre en considération cette situation. Toutefois, pour les besoins de l'exercice, la présence d'un simple couvert de glace est étudiée.

Le principal impact d'un couvert de glace sur les écoulements est l'augmentation de la résistance à l'écoulement qui se traduit par un rehaussement des niveaux d'eau.

Pour les fins de l'exercice, il est important de noter que cette problématique n'est pas observée au secteur d'étude et par conséquent, les hypothèses émises en regard au couvert de glace n'ont pu être vérifiées.

5.6.1 Hypothèses de simulations

Cette analyse se veut une comparaison du niveau atteint en eau libre pour la récurrence 20 ans pour la période de référence et les niveaux atteints au passage d'une crue de récurrence 10 ans lors de la période hivernale pour les horizons futurs.

L'évaluation de l'impact d'un couvert de glace sur les niveaux d'eau est effectuée en considérant la hausse des débits hivernaux pour les différents horizons, tout en conservant les mêmes paramètres pour le couvert de glace. Ainsi un couvert de glace d'une épaisseur de 0,3 m est considéré pour l'ensemble du tronçon. Le coefficient de Manning pour le couvert de glace est de 0,05, puisque le couvert de glace risque d'être morcelé. Le niveau aval est fixé en considérant un écoulement normal ($S=0,0005$). Le tableau 5.16 présente les débits et niveaux aval employés pour les différentes simulations.

Tableau 5.16

Paramètres de modélisation de la rivière du Nord à Lachute pour les débits annuels de récurrence 20 ans pour la période de référence et les crues de récurrence 10 ans pour la période hivernale des horizons futurs

Localisation	Référence	Horizons		
		2020	2050	2080
Station 040110 (m ³ /s)	304	118	145	163
Aval du ruisseau Williams (m ³ /s)	393	153	187	210
Aval de la rivière de l'Ouest (m ³ /s)	461	179	220	247
Niveau aval (m)	60,66	60,02	60,61	61,03

5.6.2 Résultats des simulations

Suivant la hausse des quantiles de crues hivernales de récurrence 10 ans, le rehaussement des niveaux de cette période annuelle fait en sorte de rapprocher les niveaux atteints de ceux atteints par la crue de récurrence 20 ans pour la période de référence. La figure 5.7 présente la comparaison des niveaux atteints.

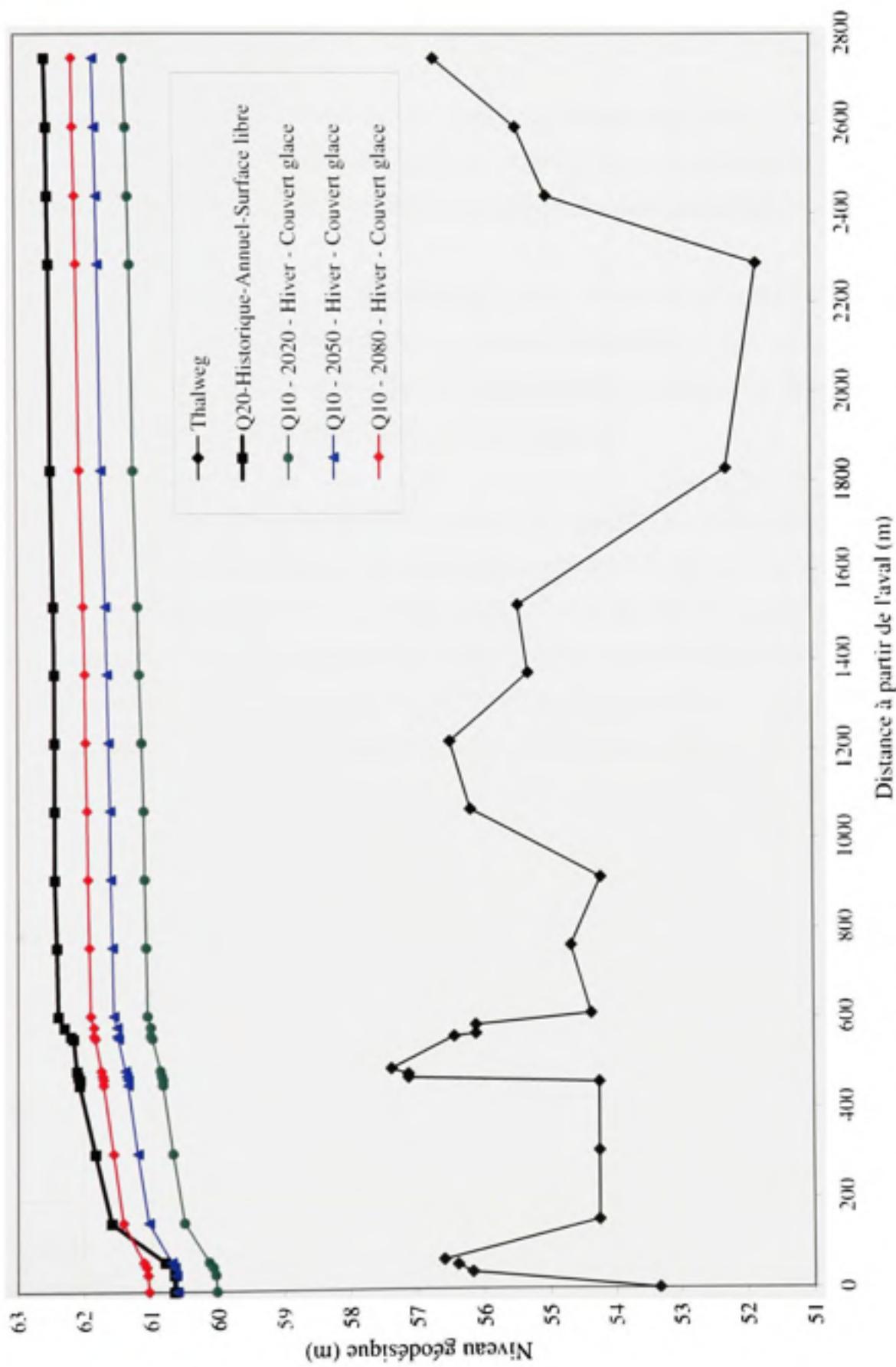


Figure 5.7 *Comparison entre les crues hivernales de récurrence 10 ans avec couvert de glace et la crue annuelle de récurrence 20 ans de la période de référence.*

5.7 Cartographies des zones inondables dans un contexte de changements climatiques

La redéfinition des zones inondables devra s'effectuer en considérant de nouvelles problématiques. Dans l'avenir, les incertitudes et l'évolution des régimes hydrologiques sont des réalités avec lesquelles les chercheurs et ingénieurs devront composer.

Si de nouvelles problématiques apparaissent, le type de cartographie des zones inondables devraient conserver la même présentation, à savoir la délimitation des zones de récurrence de 20 et 100 ans. Ainsi, si l'approche cartographique demeure, la détermination des quantiles de crues devra reposer sur une nouvelle approche.

La plage d'incertitude témoigne de la variété des résultats possible pouvant entourer un débit d'une récurrence donnée et pour un horizon donné. En fait, chaque couple MCG-SE produit un quantile différent. À partir de cet ensemble de quantiles, il est possible d'associer un débit à une probabilité de non-dépassement. Ainsi, pour une récurrence donnée, et en fonction de la confiance dans les résultats il serait possible de retenir un débit en fonction de sa probabilité de non-dépassement. Par ailleurs, afin de retirer toute subjectivité au praticien quant au choix du quantile à retenir, la moyenne de l'ensemble des quantiles pourrait être retenue.

Toutefois, cette approche ne tient pas compte de l'habileté des différents MCG à reproduire le climat de la période de référence. À cet effet, le choix du MCG reproduisant le plus fidèlement le climat historique apparaît comme une solution envisageable. En fonction du MCG retenu, le choix du quantile s'effectuerait en moyennant les résultats obtenus avec les différents scénarios d'émissions de GES, puisque ceux-ci doivent être considérés comme équiprobables.

Afin de palier au problème que pose l'évolution des régimes hydrologiques, il appert que l'établissement d'un horizon de temps donné doit être envisagé. Cet horizon pourrait être

basé sur le cycle de vie de la majorité des infrastructures publiques (bâtiments, égouts, barrages, approvisionnement en eau et les ponts) soit habituellement 50 ans.

Puisque l'évolution des crues ne signifie pas nécessairement une progression constante des quantiles, l'étude d'horizons intermédiaires pourrait être envisagée. Cette problématique a été remarquée pour les crues printanières, car en fonction de l'évolution des températures et des précipitations, l'ampleur des crues peut être affectée.

Par ailleurs, en regard des hausses appréhendées des débits hivernaux et des embâcles qui pourraient en résulter, des méthodes permettant la modélisation de cette problématique doivent être étudiées. Les sites à risque de formation d'embâcles devraient être identifiés et des suivis devraient être effectués.

Comme il a été démontré, les inondations sont des phénomènes naturels mais l'amplification des dommages peut s'accroître en raison de l'intervention humaine. À cet effet, l'étude des zones inondables devraient permettre à l'avenir de caractériser l'impact des infrastructures urbaines sur les niveaux d'eau au passage des crues. Par la suite, des solutions visant à réduire le rehaussement des niveaux d'eau au passage des crues pourraient être proposées.

CHAPITRE 6

DISCUSSION ET ANALYSE DE LA MÉTHODE

Dans un contexte de changements climatiques, la délimitation des zones inondables requiert des connaissances sur l'hydraulique des rivières, l'hydrologie des bassins versants et la climatologie régionale. La modélisation informatique des phénomènes relatifs à ces disciplines requiert divers intrants, lesquelles détiennent une certaine marge d'incertitude. Par ailleurs, la méthode employée pour la modélisation est également source d'incertitude. Le présent chapitre est donc une revue des principales sources d'incertitudes sous-jacentes aux travaux effectués dans le cadre de cette étude.

6.1 Modélisation hydraulique

L'hydraulique des cours d'eau est parmi les trois disciplines employées dans le cadre de cette étude, celle renfermant le moins d'incertitudes. Ainsi, pour un tronçon de rivière, il est possible de mesurer et d'observer la majorité des éléments pouvant influencer sur l'hydraulique du cours d'eau (topographie, bathymétrie, nature du lit et des berges, mesure des contrôles hydrauliques, etc.).

6.1.1 Incertitudes dues aux intrants

Pour le secteur d'étude, les incertitudes liées aux données topographiques et bathymétriques sont relativement faibles, car des relevés terrain ont été effectués. La définition de la plaine d'inondation est adéquate car la topographie de la ville est bien définie. Toutefois, des erreurs de mesure sont toujours possibles.

Le modèle hydraulique a fait l'objet d'un calibrage à fort débit ($254 \text{ m}^3/\text{s}$) permettant une attribution adéquate des différents coefficients de Manning en regard de la nature du lit de la

rivière et des berges. Ce calibrage a été effectué à l'aide d'une courbe de tarage aval, laquelle a été établie à l'aide de plusieurs jaugeages et peut comporter des erreurs.

Toutefois, même si un calibrage a été effectué pour un débit élevé, celui-ci demeure inférieur aux crues de récurrence 20 et 100 ans pour la période de référence (461 et 552 m³/s). Comparativement au débit de calibrage, dont les écoulements demeurent essentiellement dans le lit mineur de la rivière, les crues importantes provoquent de vastes débordements sur les berges. Par conséquent, les écoulements en berge n'ont pu faire l'objet d'une caractérisation.

6.1.2 Incertitudes dues à la méthode de modélisation

Les principales sources d'erreur et d'incertitudes pour la modélisation hydraulique proviennent de l'utilisation du modèle hydraulique employé soit HEC-RAS (v. 3.1.3). Si les écoulements demeurent dans le lit mineur ou débordent dans le lit majeur, lorsque le lit du cours d'eau est relativement rectiligne, ce modèle est relativement fiable.

Lorsque le lit du cours d'eau est méandrique, la fiabilité du modèle demeure lorsque les écoulements demeurent à l'intérieur du lit mineur. Toutefois, si des écoulements débordants doivent être modélisés, les limites du modèle apparaissent. Le problème de recoupement des méandres est attribuable au fait que la longueur de l'axe du lit mineur est légèrement plus grande (ou petite, selon la rive) que la longueur de l'axe du lit majeur. Par conséquent, les sections transversales employées devraient être différentes notamment au niveau de leur orientation, avant et après le débordement.

Dans ces conditions des écoulements transversaux importants apparaissent. Par conséquent, l'hypothèse selon laquelle l'écoulement est horizontal et perpendiculaire à l'axe principal d'écoulement n'est plus valable. Pour ces raisons, des incertitudes sur les niveaux d'eau apparaissent et l'étude des plaines d'inondations de ce secteur devrait idéalement être effectuée à l'aide d'un modèle bidimensionnel.

6.2 Modélisation hydrologique

6.2.1 Incertitudes dues aux intrants

La modélisation hydrologique nécessite d'une part l'emploi d'intrants pour modéliser les caractéristiques physiographiques du bassin versant (topographie, pédologie, occupation des sols, hydrographie, etc.). D'autre part, les intrants météorologiques sont nécessaires à la modélisation du régime hydrologique pour une période de temps donnée.

De façon générale, les aspects relatifs à la surface (topographie, occupation des sols et hydrographie) d'un bassin versant ont fait l'objet d'une cartographie issue de photographies aériennes. Avec l'avènement des systèmes d'informations géographiques (SIG), il est plus aisé de mesurer les superficies et de cartographier par la suite ces aspects. Enfin, si ces aspects sont mesurables, il ne faut pas oublier qu'ils évoluent dans le temps, notamment l'occupation des sols.

Par ailleurs, les aspects pédologiques du bassin versant ont fait l'objet de caractérisation par le passé. La cartographie issue de ces travaux est toutefois plus sujette à contenir des imprécisions notamment sur la délimitation des zones couvertes par les différents types de sols présents.

La modélisation hydrologique requiert des données météorologiques propres au bassin versant à l'étude. Dans le cadre de cette étude, le modèle hydrologique Hydrotel a été employé et celui-ci nécessite les données de températures minimale et maximale journalière ainsi que les précipitations, également sur une base quotidienne.

Ces données, mesurées aux stations climatiques lorsqu'elles sont disponibles, comportent leur lot d'incertitudes. Dans le cas de la rivière du Nord, la disponibilité des données météorologiques limite le nombre d'années pouvant être modélisées. Par conséquent, l'échantillon et les quantiles de crues obtenus pour la période modélisée (1967-1990) sont

relativement représentatifs de la période totale d'enregistrement à la station 040110 (1931-2000) mais présentent toutefois certaines différences notamment aux niveaux des moyennes et des crues de faibles récurrences. Parallèlement, les crues de plus forte récurrence (20 ans et plus) sont plus représentatives. Enfin, le nombre d'années modélisées (24) limite la fiabilité de l'extrapolation effectuée pour les récurrences de 100 ans et plus.

La représentativité spatiale des données météorologiques est une donnée importante notamment lorsque le bassin versant comporte des sous-bassins hétérogènes. À cet effet, le bassin versant de la rivière du Nord comporte deux régions physiographiques distinctes, le plateau Laurentien au nord et les basses terres au sud. Toutefois, le calibrage du modèle s'effectue à l'aide de la station hydrométrique 040110 localisée sur la rivière du Nord à Saint-Jérôme. Or, les débits de cette station proviennent essentiellement du plateau Laurentien. Par conséquent, la représentativité spatiale des données météorologiques est adéquate puisque les cinq stations employées sont localisées dans cette région ou sur sa périphérie.

Enfin, le calibrage du modèle s'effectue à partir de la station hydrométrique 040110 localisée sur la rivière du Nord. Or, il ne faut pas oublier que ces données sont également sources d'imprécision.

6.2.2 Incertitudes dues à la modélisation

Aucun modèle hydrologique, aussi évolué soit-il, ne peut représenter parfaitement la réalité. Le modèle hydrologique Hydrotel, employé dans cette étude, permet une reproduction satisfaisante des quantiles de crues observées, notamment pour les périodes printanières et hivernales.

Ce modèle hydrologique conceptuel à base physique, distribué et fonctionne en continu. Pour ces raisons, ce modèle est capable de représenter les processus hydrologiques sur plusieurs années. Ainsi, il est possible de tenir compte de l'évapotranspiration entre deux

averses et d'évaluer l'humidité du bassin versant. Pour un climat nordique, il est capable d'évaluer l'évolution du couvert nival. Toutefois, le modèle éprouve notamment des difficultés à reproduire les débits moyens de la période hivernale.

Dans le cadre de cette étude, le modèle a été calibré avec comme objectif d'être en mesure de reproduire les crues pour une période de 24 années. Puisque les crues annuelles sont principalement printanières, le calibrage du modèle visait donc la reproduction des crues de cette période.

La principale difficulté rencontrée est la reproduction des pointes de crues, car pour certaines années celles-ci sont surestimées et pour d'autres elles sont sous-estimées. Toutefois, en moyenne les crues printanières sont bien reproduites car les analyses de fréquence effectuées à partir des échantillons de crues observées et simulées indiquent un faible écart entre les différents quantiles de crues des différentes récurrences. La même observation est applicable pour les crues hivernales. Enfin, la comparaison des échantillons observé et simulé pour la période d'été/automne indique toutefois un écart plus significatif.

6.3 Modélisation climatique

6.3.1 Modèles climatiques et scénarios d'émissions

Tout comme pour les modélisations hydraulique ou hydrologique, la modélisation climatique renferme également son lot d'incertitudes. Les modèles climatiques globaux (MCG) font actuellement l'objet d'intenses recherches afin d'améliorer leurs capacités à reproduire le climat terrestre observé. Comme il a été démontré, la capacité à reproduire adéquatement les caractéristiques du climat de la période de référence varie grandement entre les différents MCG.

À cet effet, une discrimination basée sur l'habileté des MCG à reproduire le climat observé a été effectuée. Ainsi, seulement 3 MCG parmi les 6 disponibles ont été retenus pour

continuer l'étude. Pour tous types de modélisation, le calibrage d'un modèle est une étape préalable essentielle à son utilisation. Ainsi la discrimination effectuée consiste en quelque sorte à vérifier le « calibrage » des différents MCG par rapport à la période de référence. Toutefois, l'habileté d'un MCG à reproduire le climat de la période de référence ne garantit pas que celui-ci reproduira mieux le climat futur.

Par ailleurs, comme les MCG ne sont pas en mesure de reproduire les différentes caractéristiques du climat observé, ceux-ci influencent ainsi le régime hydrologique du cours d'eau étudié. À cet effet, un second exercice de discrimination a été mené afin de déterminer quel MCG perturbait le moins le régime hydrologique du cours d'eau. Au terme de cet exercice, il appert que le modèle reproduisant le plus fidèlement les différentes variables climatiques est le modèle induisant les plus faibles perturbations au régime hydrologique de la rivière. Par ailleurs, comme il a été démontré pour les périodes hivernale et printanière, il appert que la combinaison température –précipitations, même si celle-ci est mal reproduite par le MCG, peut conduire à une bonne réponse du régime hydrologique. Par conséquent, la discrimination d'un MCG sur la seule base de ce critère peut induire en erreur.

Même lorsque tous les MCG seront en mesure de reproduire adéquatement le système climatique terrestre, il demeurera toujours des incertitudes. Celles-ci sont tributaires des différents scénarios d'émissions de GES élaboré par le GIEC dans le *Special Report on Emissions Scenarios* (GIEC, 2000). Ces scénarios d'émissions sont fondés sur des hypothèses permettant une certaine quantification des émissions de GES à l'échelle de la planète. À l'heure actuelle, aucun scénario d'émissions de GES ne semble représenter un avenir plus probable. Par conséquent les différents scénarios d'émissions doivent être considéré comme équiprobables. Dans le cadre de cette étude, plusieurs scénarios d'émissions ont été employés encadrant ainsi les « futurs possibles ».

6.3.2 Mise à l'échelle spatiale et temporelle

La mise à l'échelle spatiale et temporelle est la seconde source d'incertitudes relatives à la modélisation climatique. Afin d'obtenir une mise à l'échelle spatiale adéquate, une régionalisation devrait être effectuée. La résolution des grilles des MCG est bien supérieure à la taille du bassin versant à l'étude. Par exemple, la résolution (latitude x longitude) du MCG HadCM3 est $2,25^{\circ} \times 3,75^{\circ}$ tandis que celle du CGCM3 est de $3,7^{\circ}$ par $3,7^{\circ}$. Or la taille du bassin versant de la rivière du Nord ($2\,214\text{ km}^2$) peut tenir dans une maille de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Pour cette raison, l'application directe des données des MCG est peu adaptée aux études régionales.

Afin de palier à cette limite des MCG, les méthodes de mise à l'échelle statistique et dynamique font actuellement l'objet d'intenses recherches. L'emploi du Modèle Régional canadien du climat (MRCC), lequel possède actuellement une échelle $45\text{ km} \times 45\text{ km}$, aurait permis une meilleure régionalisation. Ce modèle est développé par l'UQAM en collaboration avec le consortium Ouranos et fait actuellement l'objet de travaux visant à augmenter la résolution de la grille à des mailles de $10\text{ km} \times 10\text{ km}$.

La mise à l'échelle temporelle constitue une autre source d'incertitude. Ainsi, la méthode des deltas employée dans cette étude suppose la même variabilité que pour la période de référence, ce qui est peu probable. Pour l'estimation des crues printanières, la variabilité climatique influence moins l'ampleur de celles-ci puisqu'elles sont le résultat de plusieurs événements s'échelonnant sur plusieurs mois. Toutefois, l'augmentation anticipée des redoux hivernaux et des épisodes pluvieux rend l'utilisation de cette méthode plus délicate.

Pour les crues de la période d'été/automne, les événements extrêmes de précipitations sont plus liés à la variabilité du climat et la méthode des deltas n'est pas adaptée. Par conséquent l'ampleur des crues de cette période est certainement sous-estimée. Le développement des générateurs de climat aidera à corriger les lacunes de cette approche.

CONCLUSION

La recherche sur les changements climatiques a accompli des progrès remarquables et elle permet une prise de conscience des effets potentiels que peuvent avoir les changements climatiques sur la société. Avec l'augmentation prévue des températures et la modification des régimes de précipitation, les changements climatiques auront un impact sur l'hydrologie des bassins versants et sur l'hydraulique des cours d'eau.

Les inondations constituent un problème depuis que les sociétés se sont développées sur les rives des différents cours d'eau. Pour atténuer cette problématique, la cartographie des zones inondables est l'un des outils développés afin de planifier le développement des communautés pour minimiser l'impact des inondations. La cartographie des zones inondables devient l'une des stratégies d'adaptation pour faire face aux conséquences potentielles du changement climatique.

Dans cette perspective, les deux premiers objectifs de cette étude visaient à caractériser l'impact des changements climatiques sur les annuelles et les crues des périodes printanière, d'été/automne et hivernale. Pour caractériser l'impact de ceux-ci sur les crues des différentes personnes, les modélisations climatique et hydrologique sont requises. La modélisation climatique demeure la principale source d'incertitude car la compréhension du système climatique est complexe ce qui se reflète sur la conception des MCG. Cette situation fait en sorte que chaque MCG possède sa propre formulation mathématique de certains processus physiques régissant le système climatique. À cet effet, ce sont les MCG qui influencent le plus les résultats et non pas les scénarios d'émissions, comme il devrait être.

Par ailleurs, le manque de résolution des différents MCG, les processus de mise à l'échelle spatiale et temporelle sont également des sources d'incertitudes. Enfin, même lorsque les recherches auront en bonne partie comblé les lacunes de la modélisation climatique, l'évolution des émissions de GES, lesquelles demeurent liées à l'évolution de la planète,

demeureront toujours une source d'incertitudes. Dans ce travail, la modélisation climatique a retenu l'emploi de trois MCG (CGCM3, ECHAM4 et HadCM3) et différents scénarios d'émissions de GES ont été employés.

Les changements climatiques amènent deux nouvelles problématiques: Premièrement, une plus grande part d'incertitude est observée puisque pour un débit d'une récurrence et un horizon donné, chaque MCG-SE produit un résultat différent. Dans cette étude, cette problématique est définie comme la plage d'incertitude. Deuxièmement, les changements climatiques induisent une évolution des régimes hydrologiques, lesquels entraînent une évolution dans l'ampleur des crues. Ainsi, pour un MCG-SE et une récurrence donnée, le débit change en fonction de l'horizon de temps étudié.

Pour limiter la plage d'incertitudes, le MCG démontrant le plus d'habileté à reproduire le climat de la période de référence est retenu pour décrire l'évolution la plus « probable ». Puisque plusieurs SE sont simulés par les différents MCG, l'évolution « probable » est calculée en moyennant les résultats obtenus selon les différents SE, car ceux-ci doivent être considérée comme équiprobables.

La modélisation hydrologique a été effectuée sur une période de 24 années, puisque la disponibilité des données météorologiques limite la période pouvant être modélisée. Le logiciel Hydrotel a permis une reproduction acceptable des crues printanières et hivernales observées. Toutefois, les crues des périodes estivale et automnale sont moins bien reproduites dans leur ampleur et leur fréquence. Enfin, puisque les crues annuelles sont principalement printanières, la reproduction des quantiles de crues annuelles est acceptable.

Suivant ces modélisations, la caractérisation des effets des changements climatiques sur les différentes crues a pu être effectuée. Pour les crues printanières et les crues annuelles, une tendance à la baisse des quantiles de crues des faibles récurrences est prévue par tous les MCG-SE. Pour ce qui est des plus fortes récurrences (100 ans), une augmentation des quantiles est prévue par deux MCG (HadCM3 et CGCM3), tandis que le troisième

(ECHAM4) prévoit une tendance à la baisse. Toutefois, les résultats obtenus par le MCG HadCM3 retenu pour définir l'évolution probable prévoit une tendance à la hausse des quantiles de crues de forte récurrence mais également une hausse de la variabilité. Enfin, le devancement des crues printanières par rapport à la période de référence est prévu par tous les MCG, pour tous les horizons.

Pour les crues des périodes estivale et automnale, la méthode de mise à l'échelle temporelle employée ne permet pas de quantifier de façon adéquate l'augmentation des quantiles de crues de cette période. En effet, la méthode des deltas suppose la même variabilité du climat ce qui est peu probable. Cette variabilité du climat est directement relié l'intensité des précipitations pouvant survenir.

Enfin, les crues de la période hivernale sont sujettes à augmenter de façon substantielle, notamment pour les faibles récurrences. Cette tendance à la hausse est prévue par tous les MCG-SE. Pour les plus fortes récurrences (50 et 100 ans), une tendance à la hausse est observée pour deux des trois MCG (HadCM3 et CGCM3), tandis que le modèle le plus chaud (ECHAM4) prévoit une diminution des quantiles. Pour le MCG HadCM3 retenu pour décrire l'évolution probable, une augmentation des quantiles de forte récurrence est prévue.

La cartographie des zones inondables requiert la modélisation hydraulique, laquelle possède le moins d'incertitudes parmi les trois types de modélisation employées. Le modèle hydraulique unidimensionnel employé a fait l'objet d'un calibrage en présence de forts débits, limitant ainsi les incertitudes reliées à cette modélisation.

Le troisième objectif de cette étude consiste à cartographier les zones inondables en tenant compte des incertitudes induites par les changements climatiques. À cette fin, une cartographie a été effectuée pour les débits de récurrence 100 ans pour l'horizon 2080. Par rapport à la période de référence, les superficies des zones inondées varient entre une diminution de 17,2 ha (19,8 %) et une augmentation de 12,3 ha (14,2 %) dépendamment des MCG employés.

Le quatrième objectif de cette étude consistait à définir l'impact de l'évolution du régime hydrologique sur la cartographie des zones inondables en cernant une évolution « probable » des crues annuelles. L'étude de cette évolution indique une tendance à la hausse de la crue centennale et la cartographie de celle-ci se traduit par une augmentation de la zone inondée de 85,5 ha à l'horizon 2020 à 89,6 ha à l'horizon 2080.

La modélisation hydraulique du secteur d'étude a permis de constater que l'augmentation des zones inondées est attribuable aux changements climatiques mais également à la présence d'un pont. En raison de sa capacité hydraulique insuffisante, le pont constitue une restriction à l'écoulement lorsque le débit atteint $338 \text{ m}^3/\text{s}$.

Enfin, puisque les débits hivernaux augmenteront de façon substantielle, des simulations avec un couvert de glace ont été effectuées. Ainsi, en fonction de l'évolution « probable », les débits hivernaux de récurrence 10 ans pour les horizons 2020, 2050 et 2080 ont été comparé au niveau atteint par la crue annuelle de récurrence 20 ans de la période de référence. Ainsi, à l'horizon 2080, le niveau atteint par une crue hivernale de récurrence 10 ans avec un couvert de glace demeure légèrement inférieur à la crue annuelle de récurrence 20 ans de la période de référence.

RECOMMANDATIONS

Jusqu'à présent la cartographie des zones inondables ne considère que les écoulements en surface libre. Devant l'augmentation des débits hivernaux et des épisodes de redoux, la problématique de formation des embâcles de glace risque d'être accrue. Par conséquent, des méthodes permettant la modélisation de ceux-ci doivent être développées afin que la cartographie des zones inondables intègre cette problématique inhérente à certaines rivières.

Si les incertitudes sont toujours sous-jacentes à la caractérisation des crues, l'étude de celles-ci dans un contexte de changements climatiques met en évidence que les incertitudes deviennent une problématique incontournable. Par conséquent, comment intégrer cette réalité plus tangible dans un cadre de pratique du génie? Pour la cartographie des zones inondables, faut-il éduquer les décideurs à cette incertitude future ou tenter de déterminer un scénario plus probable?

Par ailleurs, dans un contexte de conception d'une infrastructure quelconque, cette plage d'incertitude ouvre la porte à une certaine subjectivité. La conception d'un barrage ou d'un pont pourrait se baser sur le choix entre un faible ou un plus fort débit et la répercussion sur le coût de l'infrastructure pourrait être substantielle. Dans cette perspective, faut-il laisser au jugement du praticien le choix du débit servant au dimensionnement de l'ouvrage ou tenter de cerner un scénario plus probable afin de limiter les incertitudes? Dans l'affirmative, des méthodes visant à discriminer les différents MCG pourraient être développées.

Afin de répondre à ces questions importantes et pour encadrer les études hydrologiques dans un contexte de changements climatiques des recommandations devraient être émises par les autorités compétentes. Ces recommandations encadreraient ce type d'études et permettraient aux ingénieurs et spécialistes du domaine d'intégrer les changements climatiques lors d'études hydrologiques.

ANNEXE 1

Descriptif des stations météorologiques et hydrométriques

Annexe 1 - Description des stations météorologiques et hydrographiques

Station utilisée

Stations météorologiques

# station	Localisation	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Ouverture	Fermeture	Années utilisées		Remarques	Nb années
							Début	Fin		
7031017	Camp-Tamaracouta	45.83	-74.20	282	1970-02-15	1987-03-15	1972	1986	B.V.	14
7032997	Harrington-Forest-Farm	45.85	-74.63	183	1955-09-15	1991-11-15	1963	1990		27
7033650	Lachute	45.85	-74.33	91	1958-06-15		1963	2002	B.V.	39
7033700	Lac-Saint-Denis-RCAF	45.93	-74.30	406	1956-02-15	1986-06-15	1969	1985	B.V.	16
7035290	Montreal-Mirabel-A	45.66	-74.03	82	1975-10-15		1976	1997	Perimètre	21
7015665	Notre-Dame-de-la-Merci	46.23	-74.05	366	1973-07-15	1994-06-15	1976	1993	Perimètre	17
7015730	Oka	45.50	-74.06	91	1937-08-15		1970	2002	Perimètre	32
7036762	Sainte-Agathe-des-Monts	46.05	-74.28	395	1965-11-15	1992-07-15	1966	1991	B.V.	25
7037230	Saint-Faustin	46.11	-74.48	366	1967-11-15	1994-06-15	1968	1993	Perimètre	25
7037310	Saint-Hippolyte	45.98	-74.00	366	1963-10-15		1964	2002	Perimètre	38
7037400	Saint-Jérôme	45.80	-74.05	169	1932-05-15		1963	2002	B.V.	39

Stations hydrométriques

# station	Localisation	Latitude	Longitude	Bassin versant (km ²)	Ouverture	Fermeture
040110	Saint-Jérôme	45° 47' 35" N	74° 0' 45" O	1170	1930	encore ouverte
040113	en amont de la rivière Doncaster	45° 58' 26" N	74° 6' 37" O	435	1927	1956
040113	en amont de la rivière Doncaster	45° 58' 24" N	74° 6' 39" O	435	1956	1978
040122	Sainte-Agathe-des-Monts	46° 2' 45" N	74° 15' 10" O	311	1971	encore ouverte

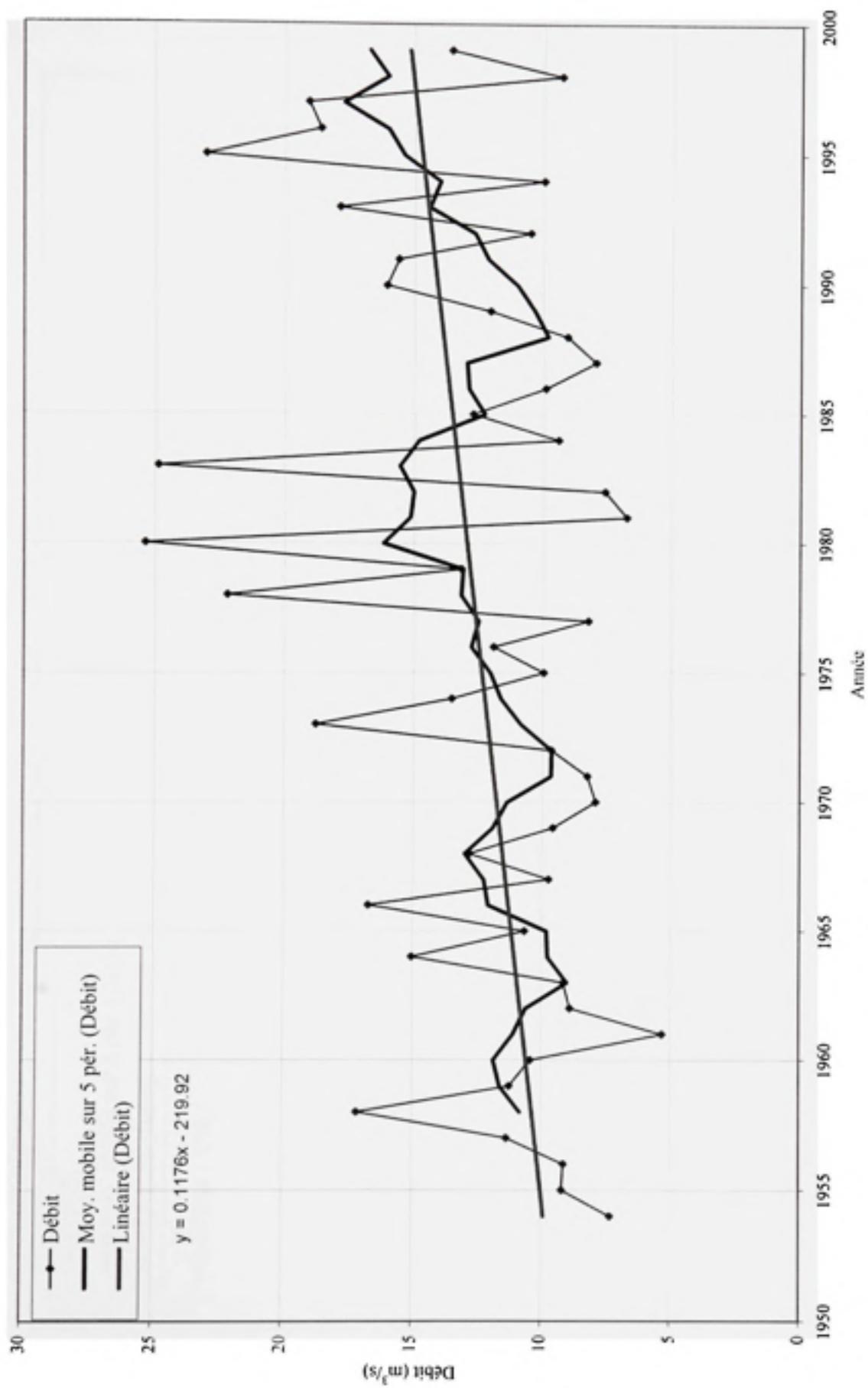


Figure A1.1 Évolution du débit moyen en janvier à la station 040110 (1954-1999).

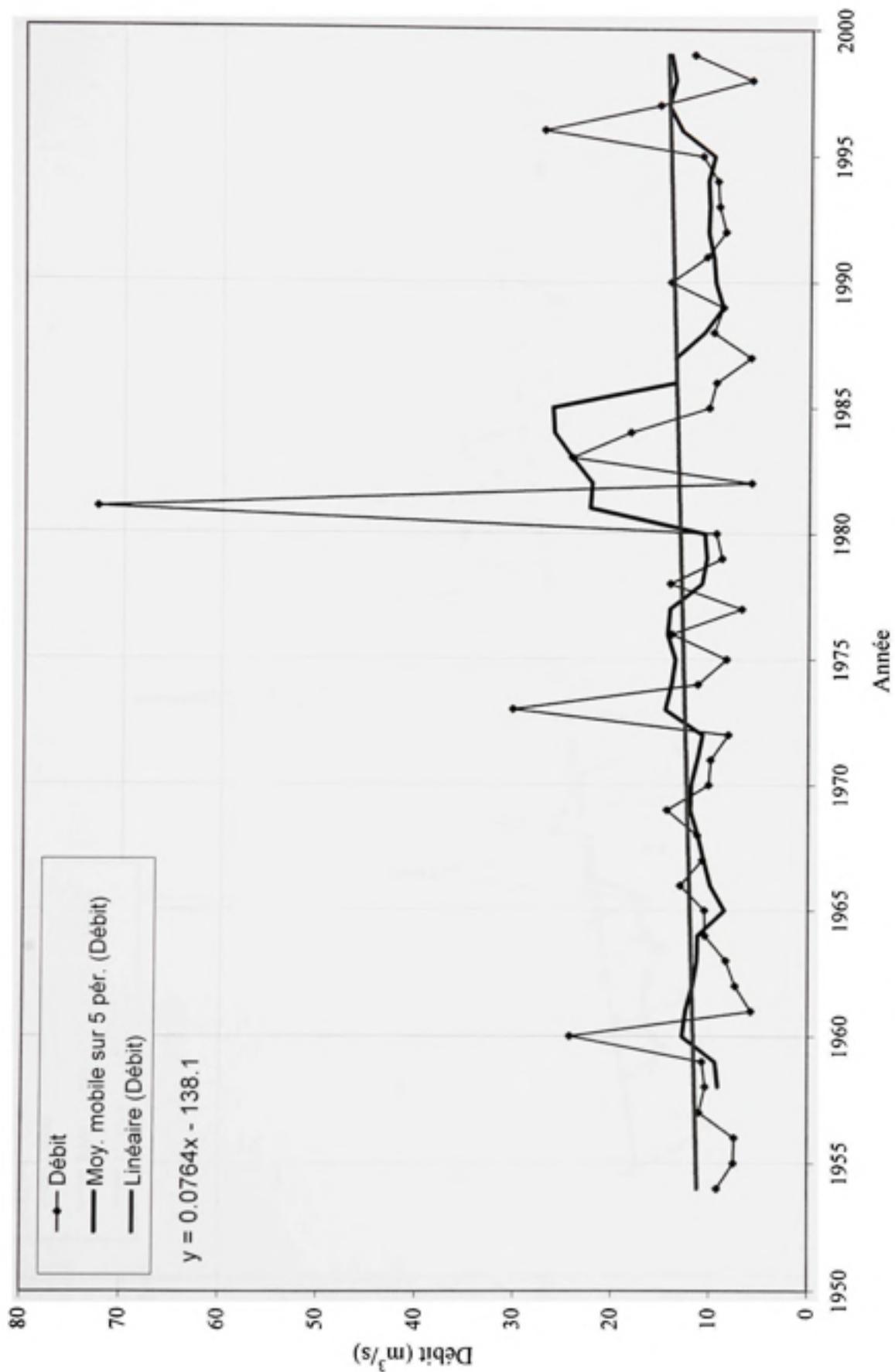


Figure A1.2 Évolution du débit moyen en février à la station 040110 (1954-1999).

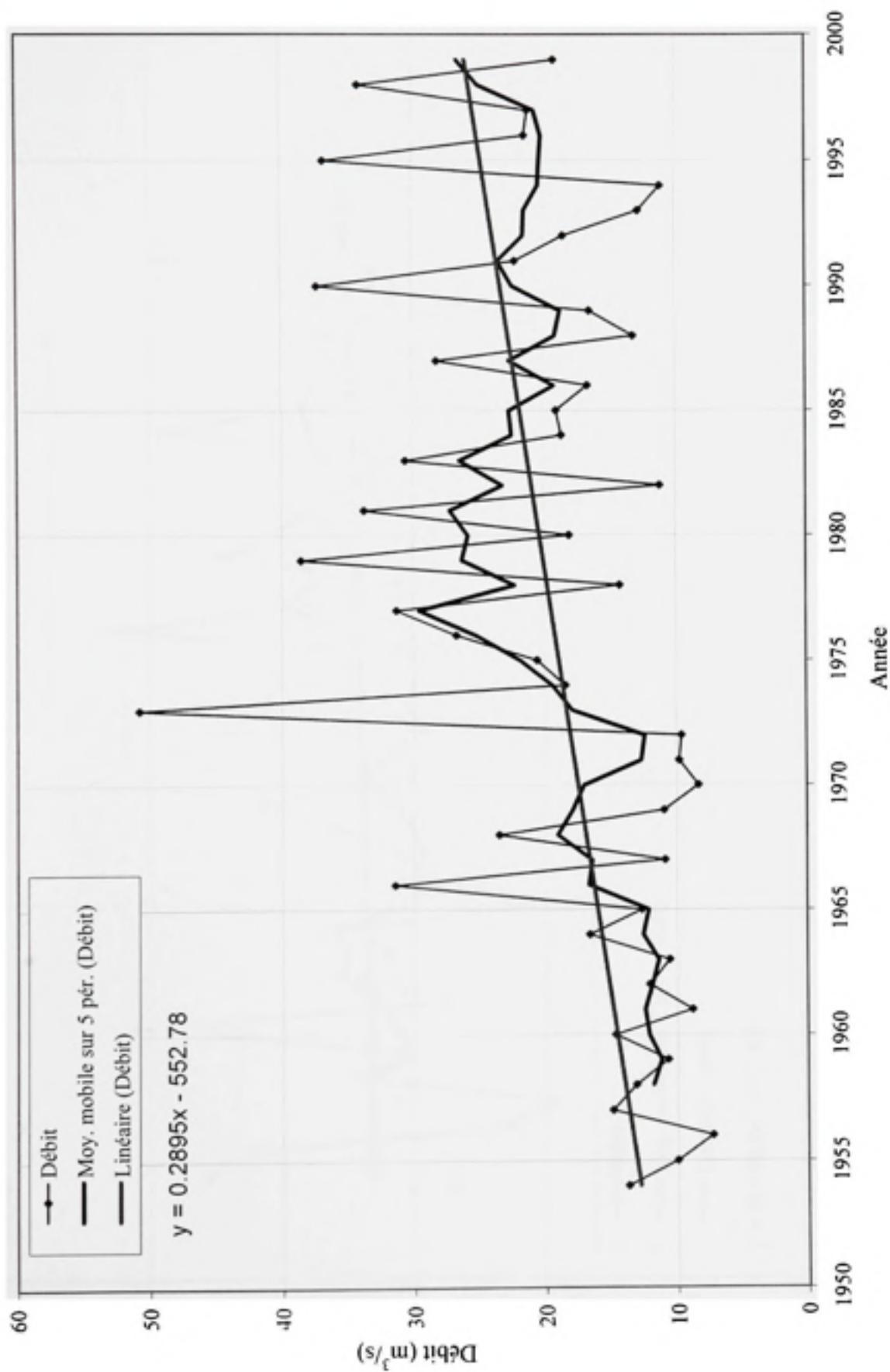


Figure A1.3 Évolution du débit moyen en mars à la station 040110 (1954-1999).

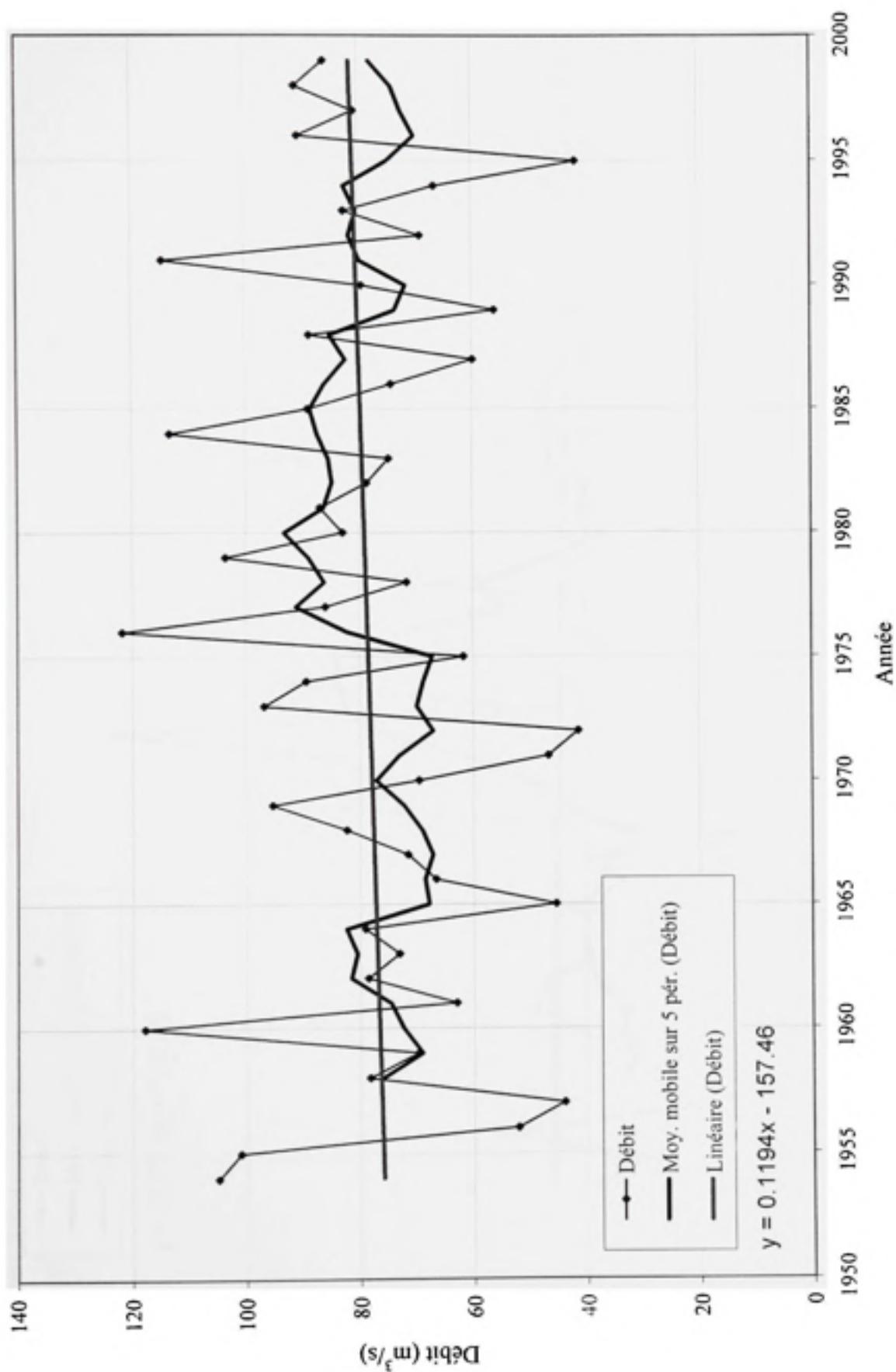


Figure A1.4 Évolution du débit moyen en avril à la station 040110 (1954-1999).

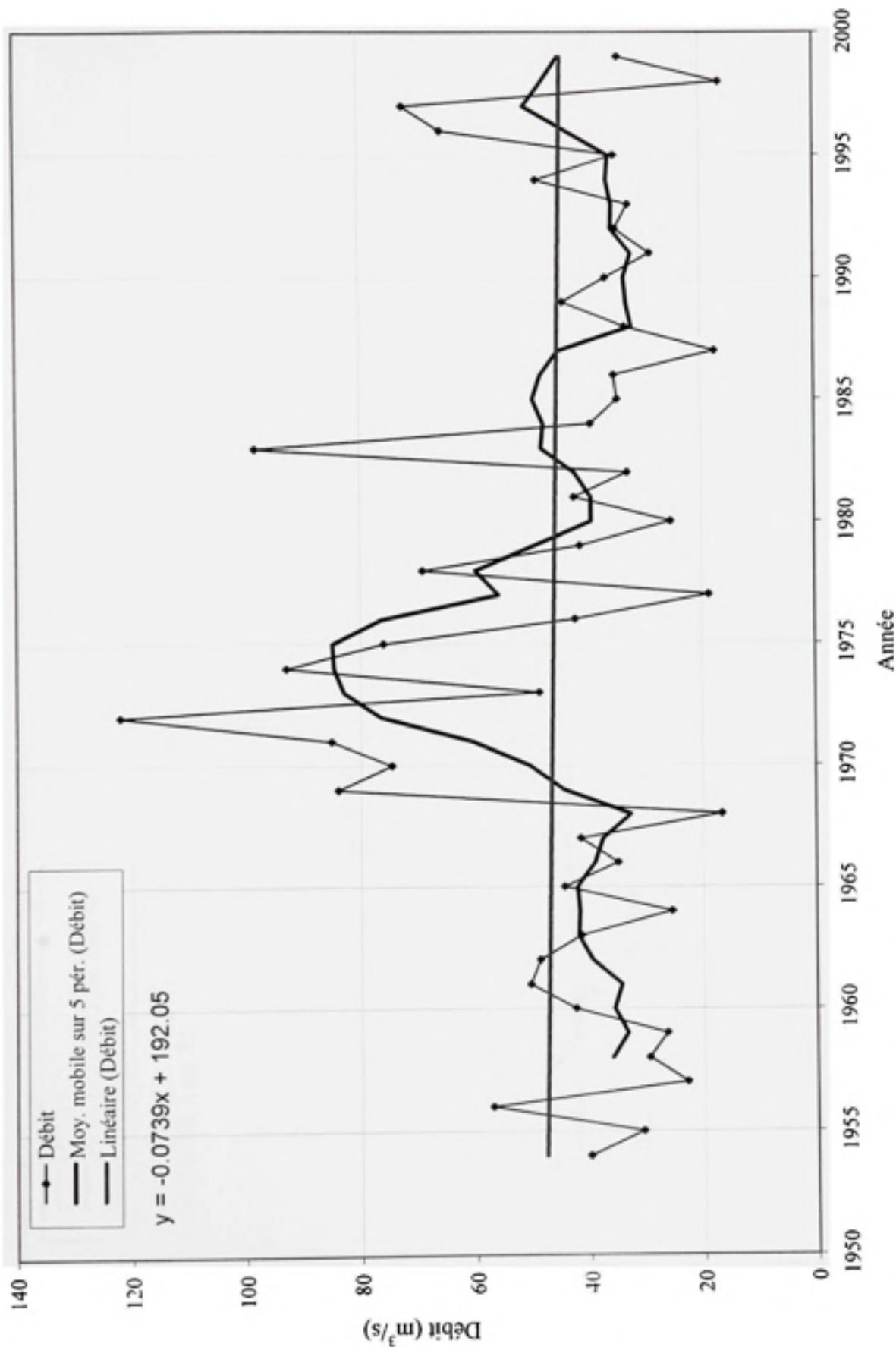


Figure A1.5 Évolution du débit moyen en mai à la station 040110 (1954-1999).

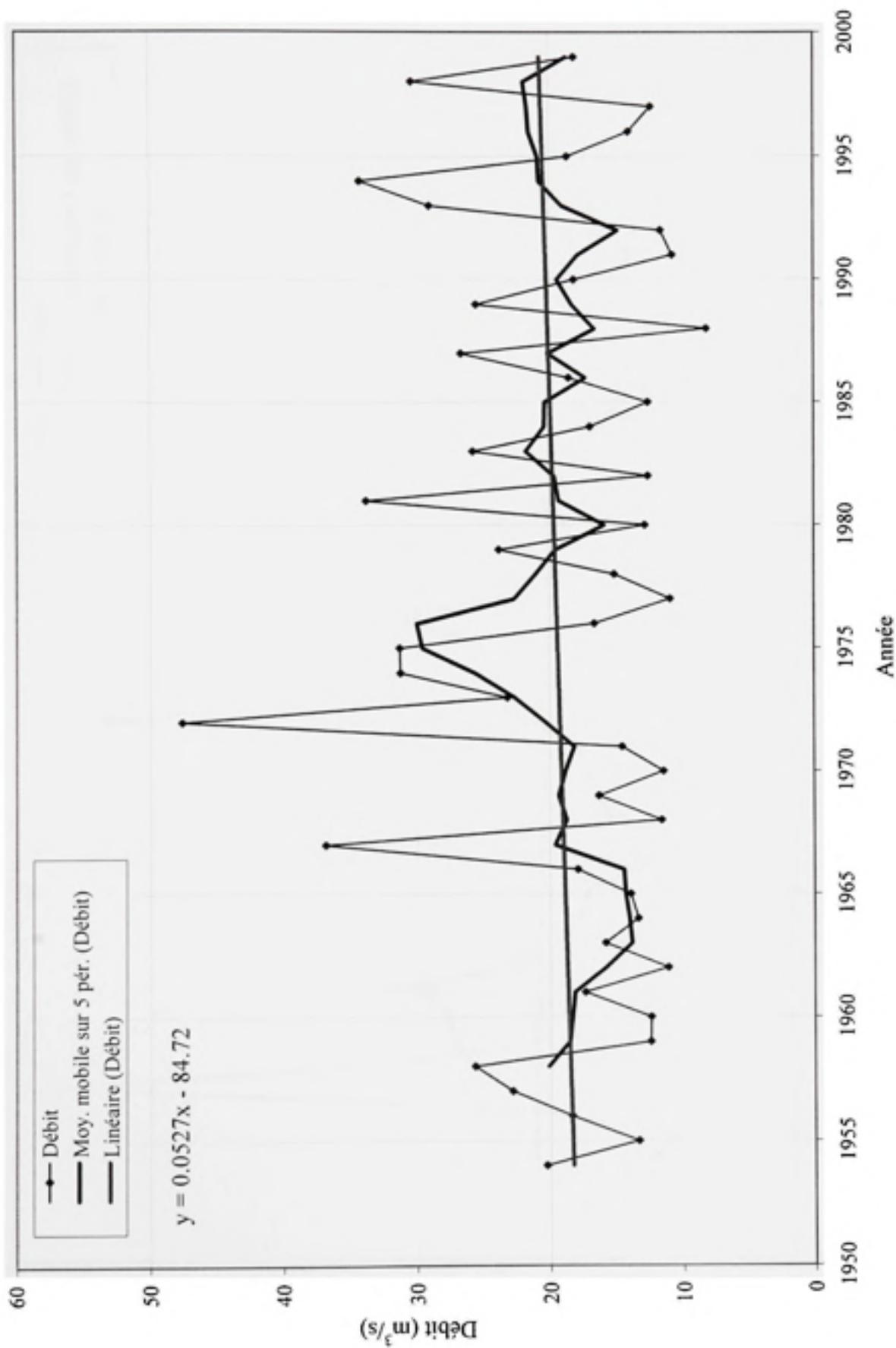


Figure A1.6 Évolution du débit moyen en juin à la station 040110 (1954-1999).

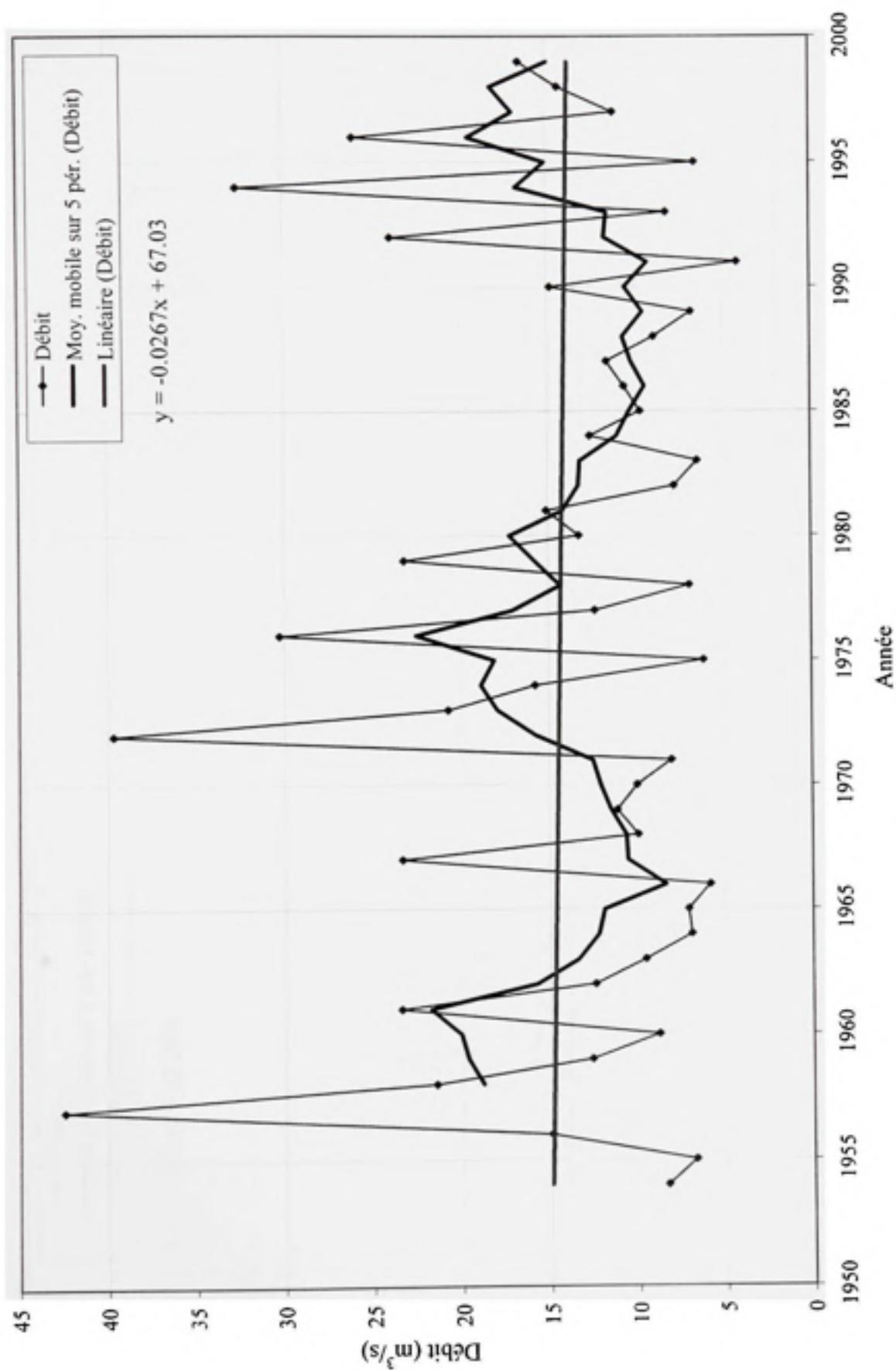


Figure A1.7 Évolution du débit moyen en juillet à la station 040110 (1954-1999).

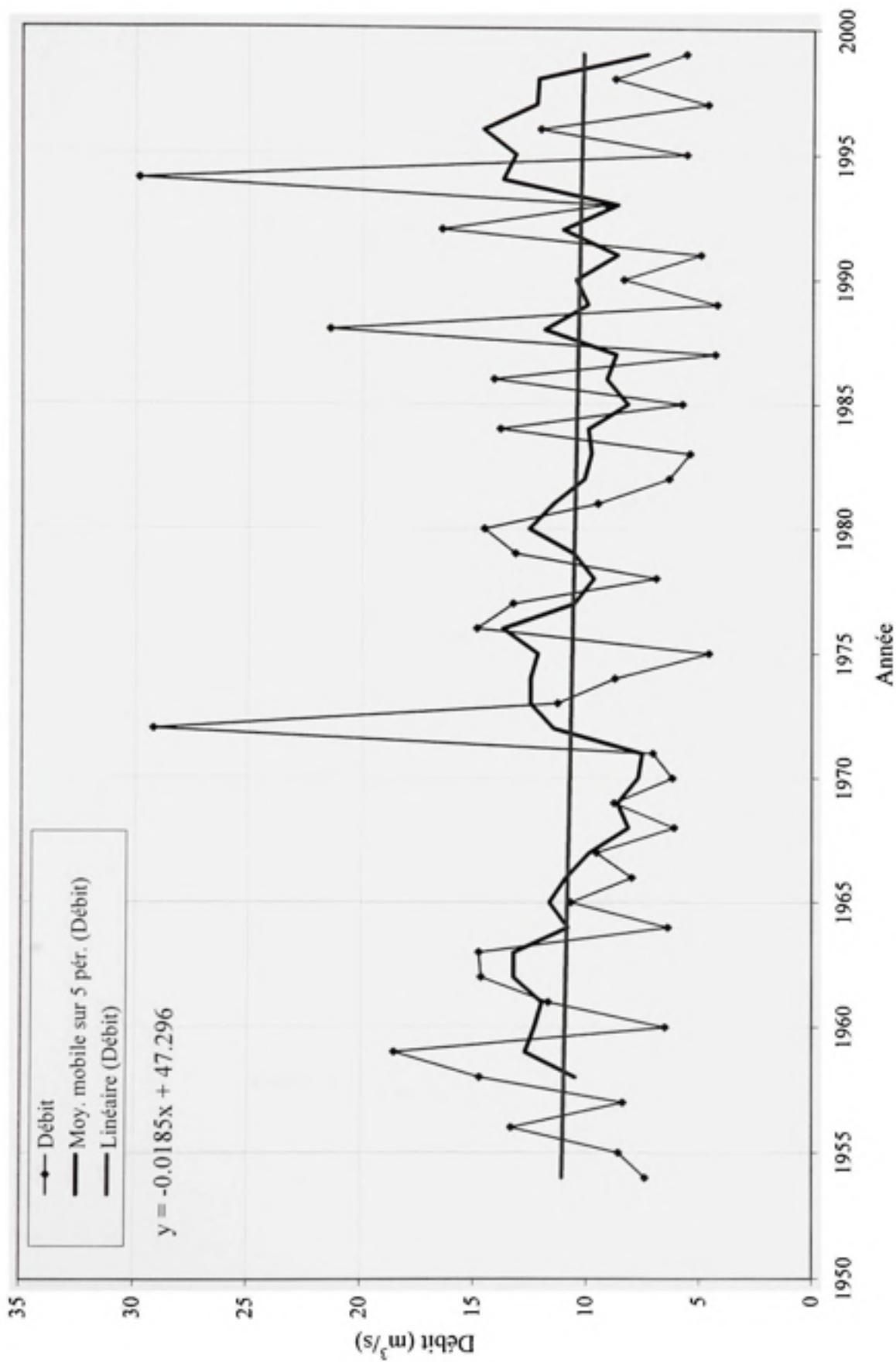


Figure A1.8 Évolution du débit moyen en août à la station 040110 (1954-1999).

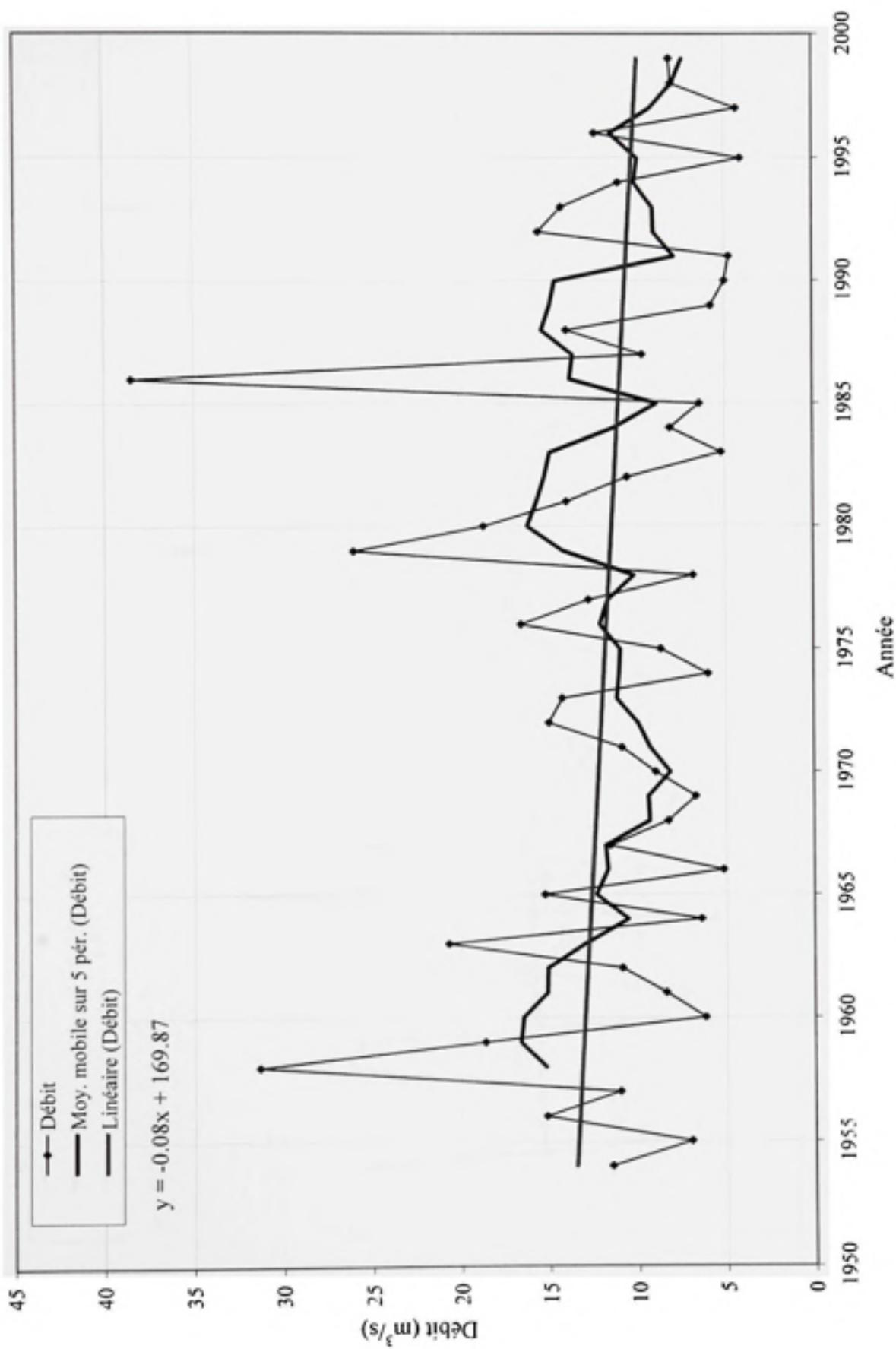


Figure A1.9 Évolution du débit moyen en septembre à la station 040110 (1954-1999).

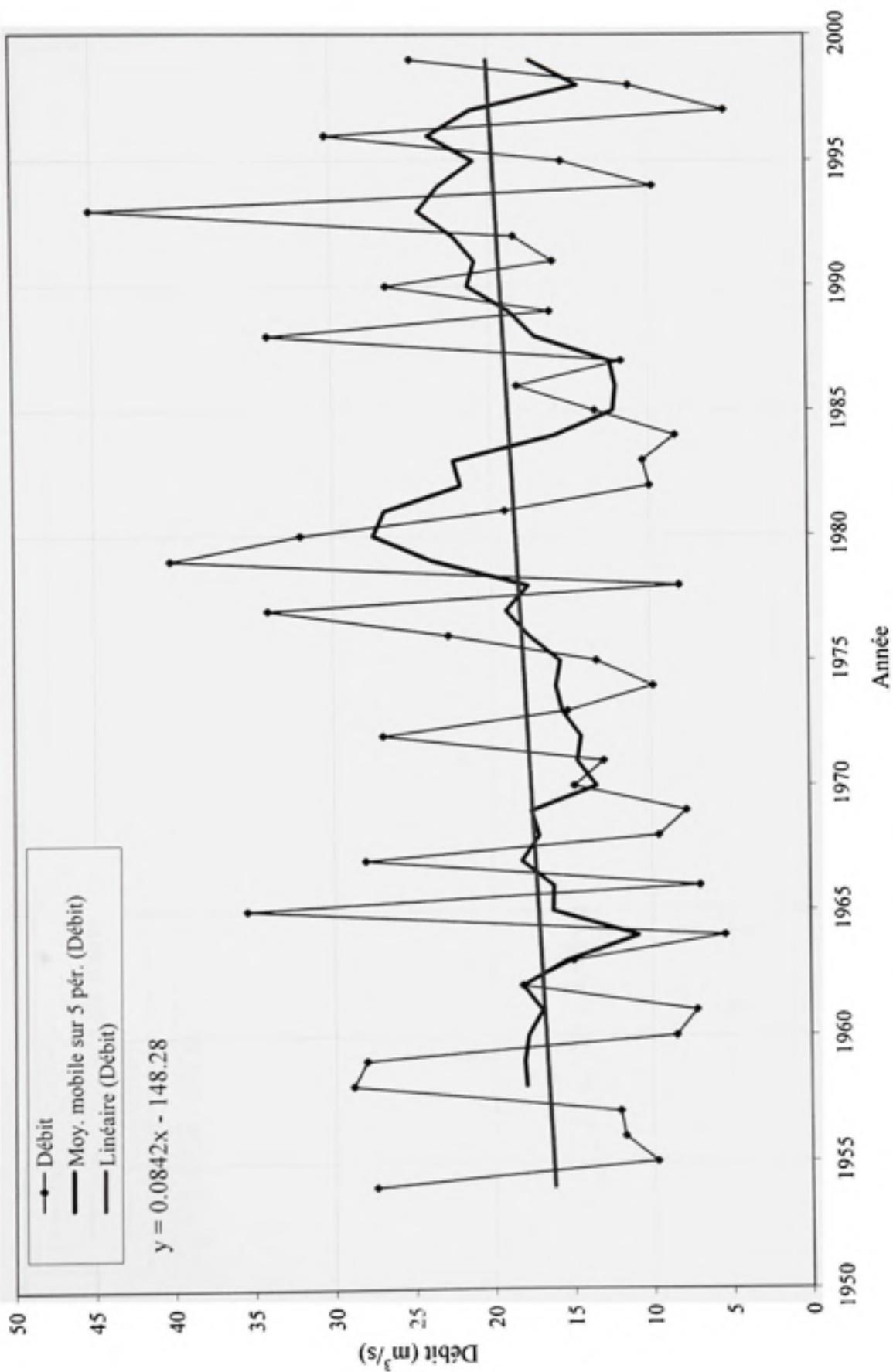


Figure A1.10 Évolution du débit moyen en octobre à la station 040110 (1954-1999).

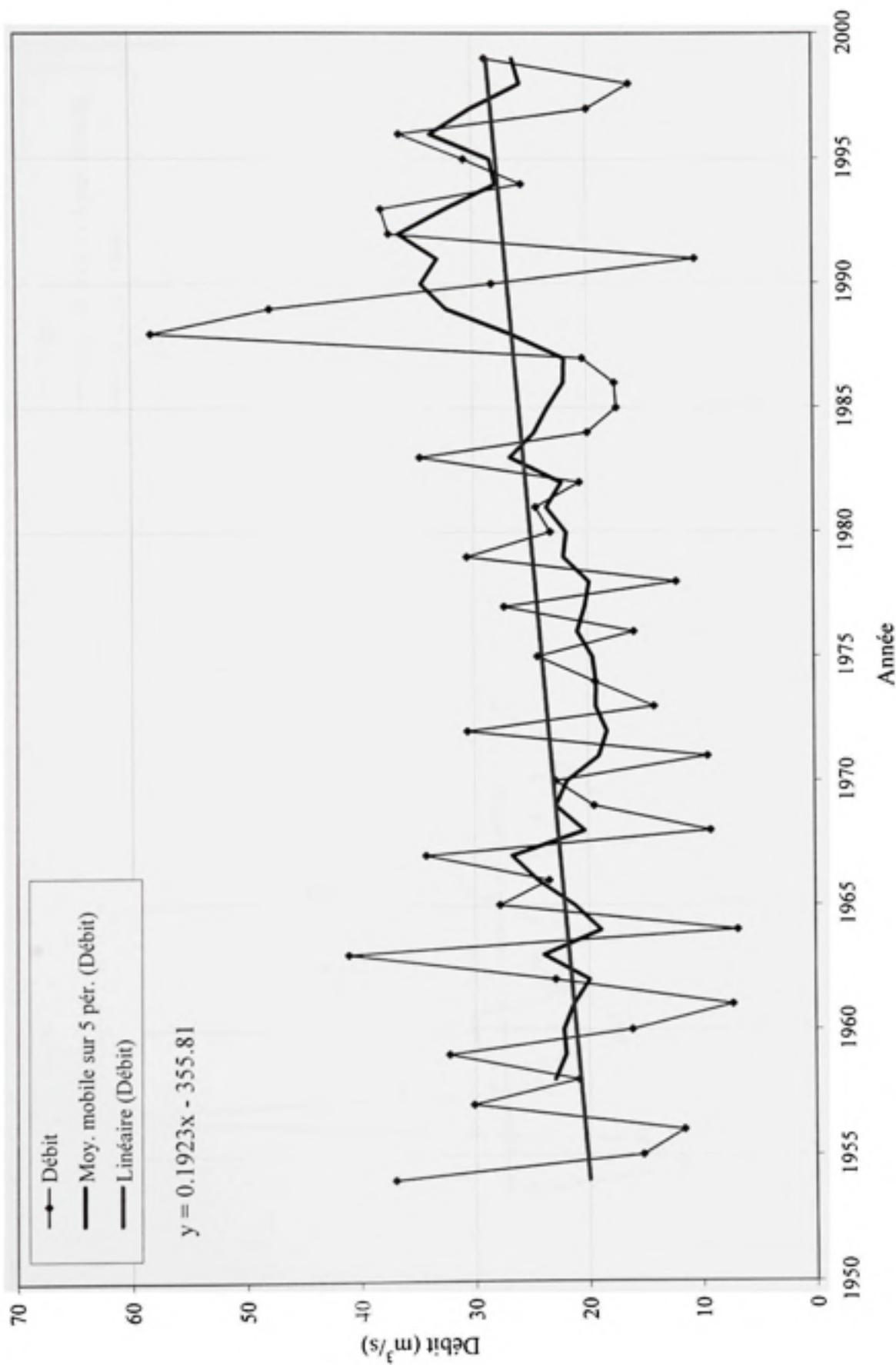


Figure A1.11 Évolution du débit moyen en novembre à la station 040110 (1954-1999).

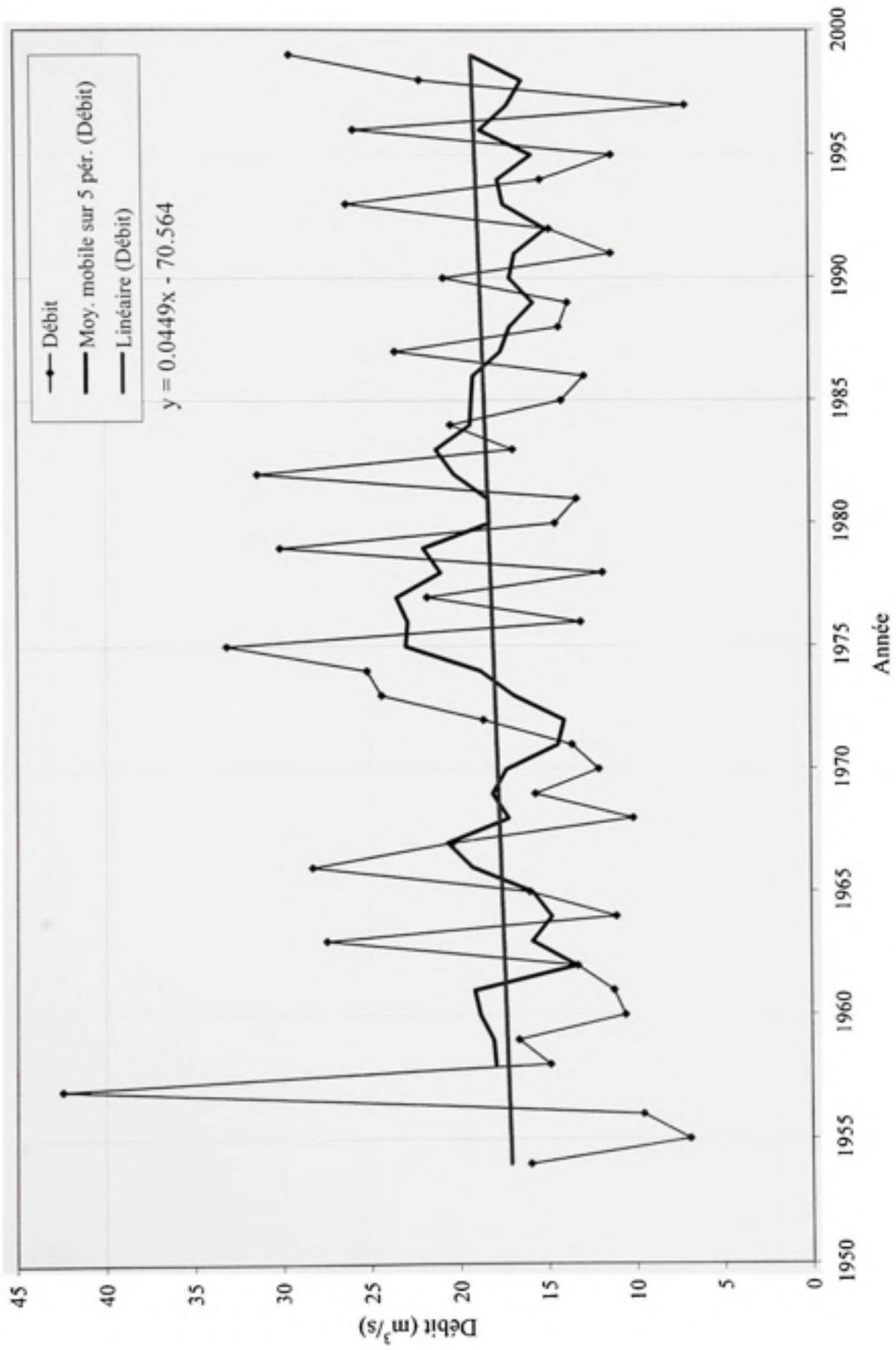


Figure A1.12 Évolution du débit moyen en décembre à la station 040110 (1954-1999).

ANNEXE 2

Résultats du calibrage du modèle hydrologique

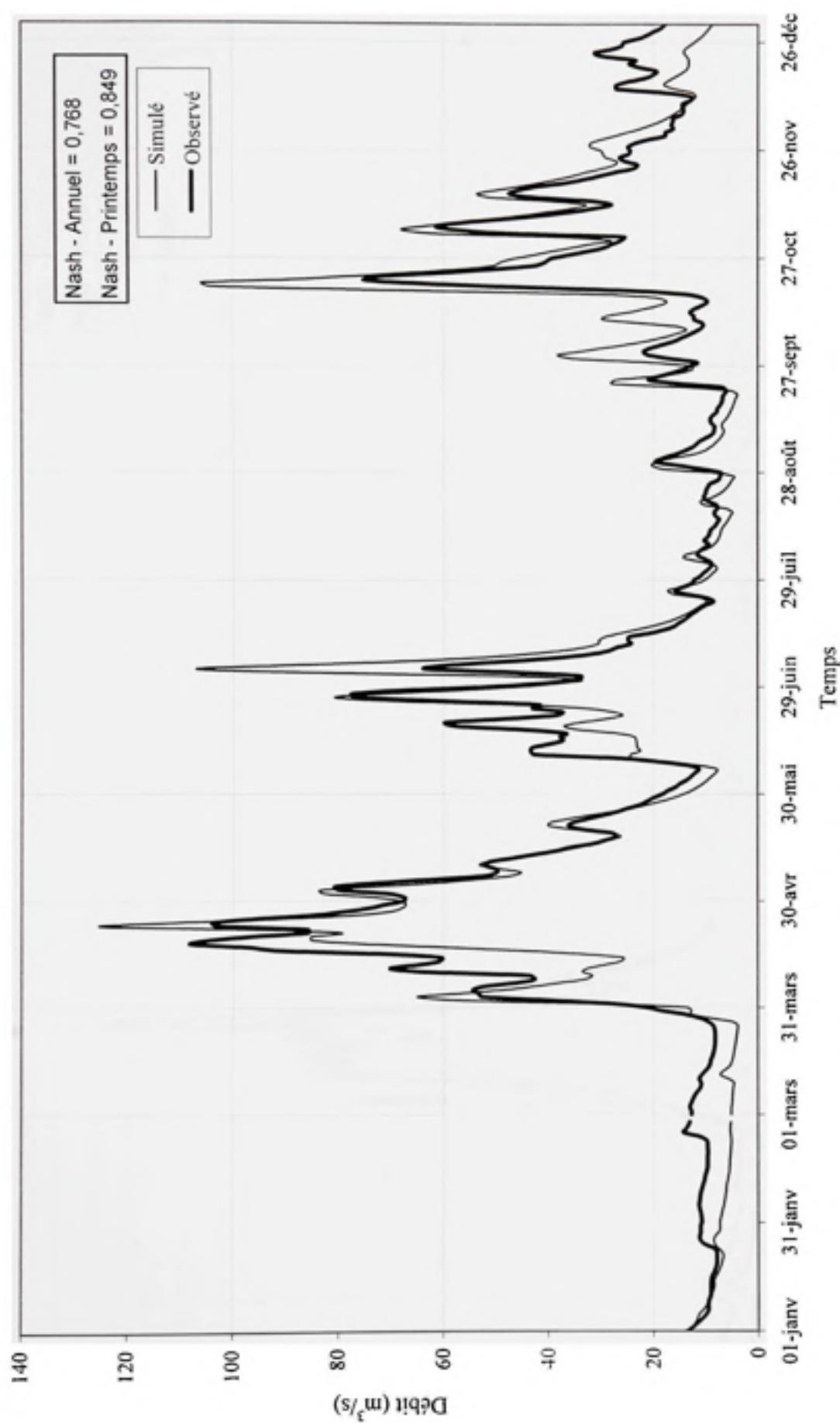


Figure A2.1 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1967.

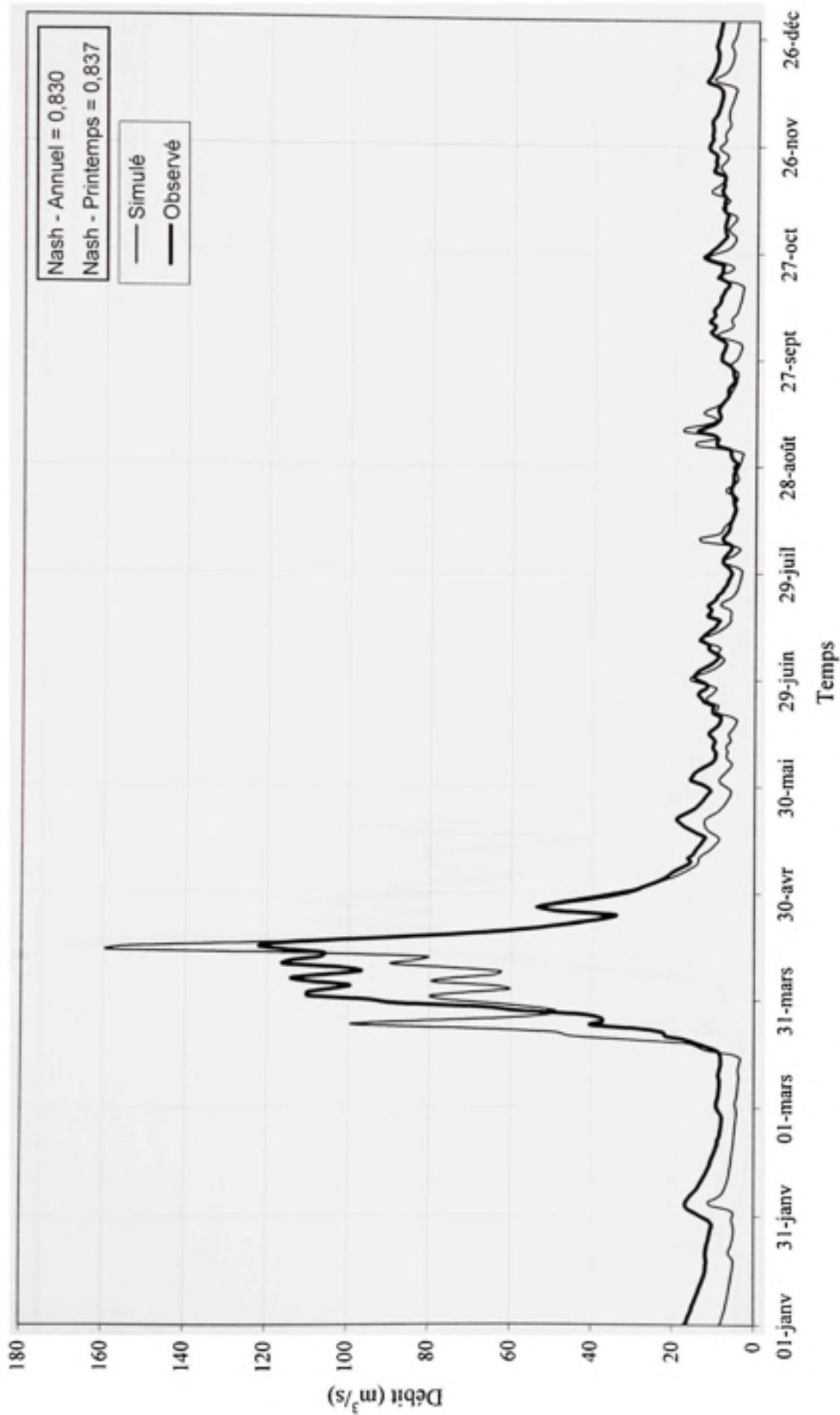


Figure A2.2 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1968.

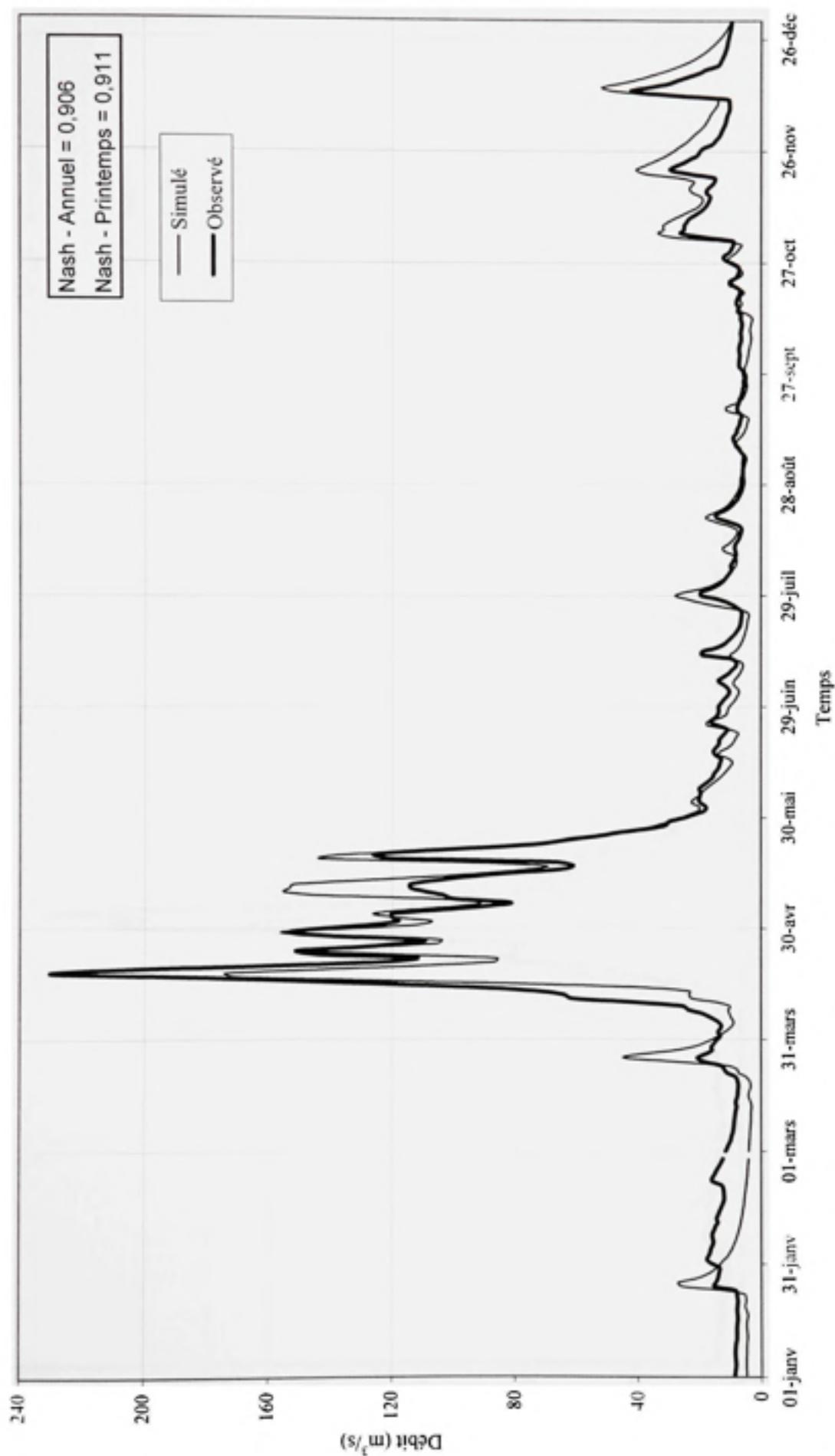


Figure A2.3 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1969.

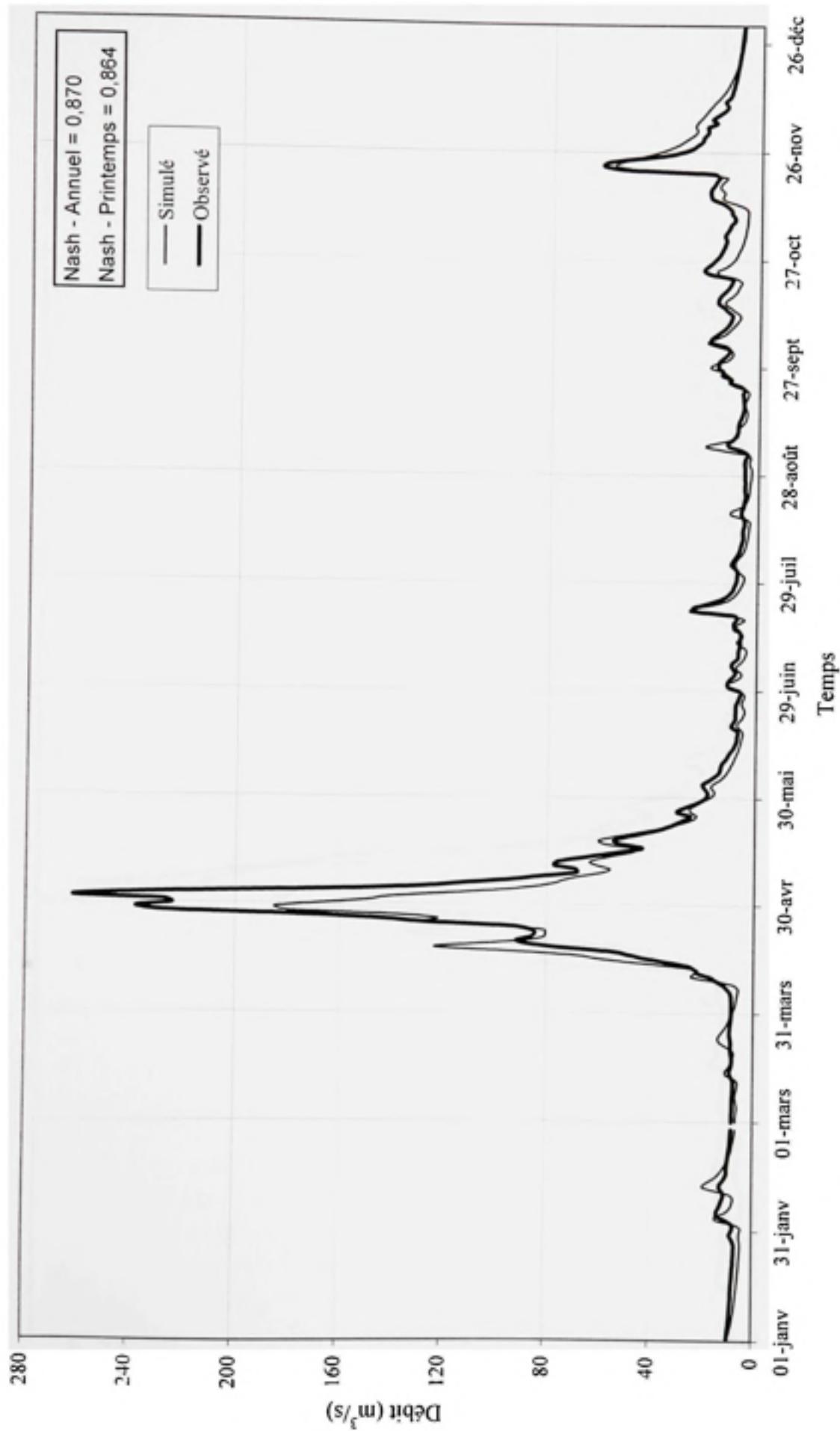


Figure A2.4 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1970.

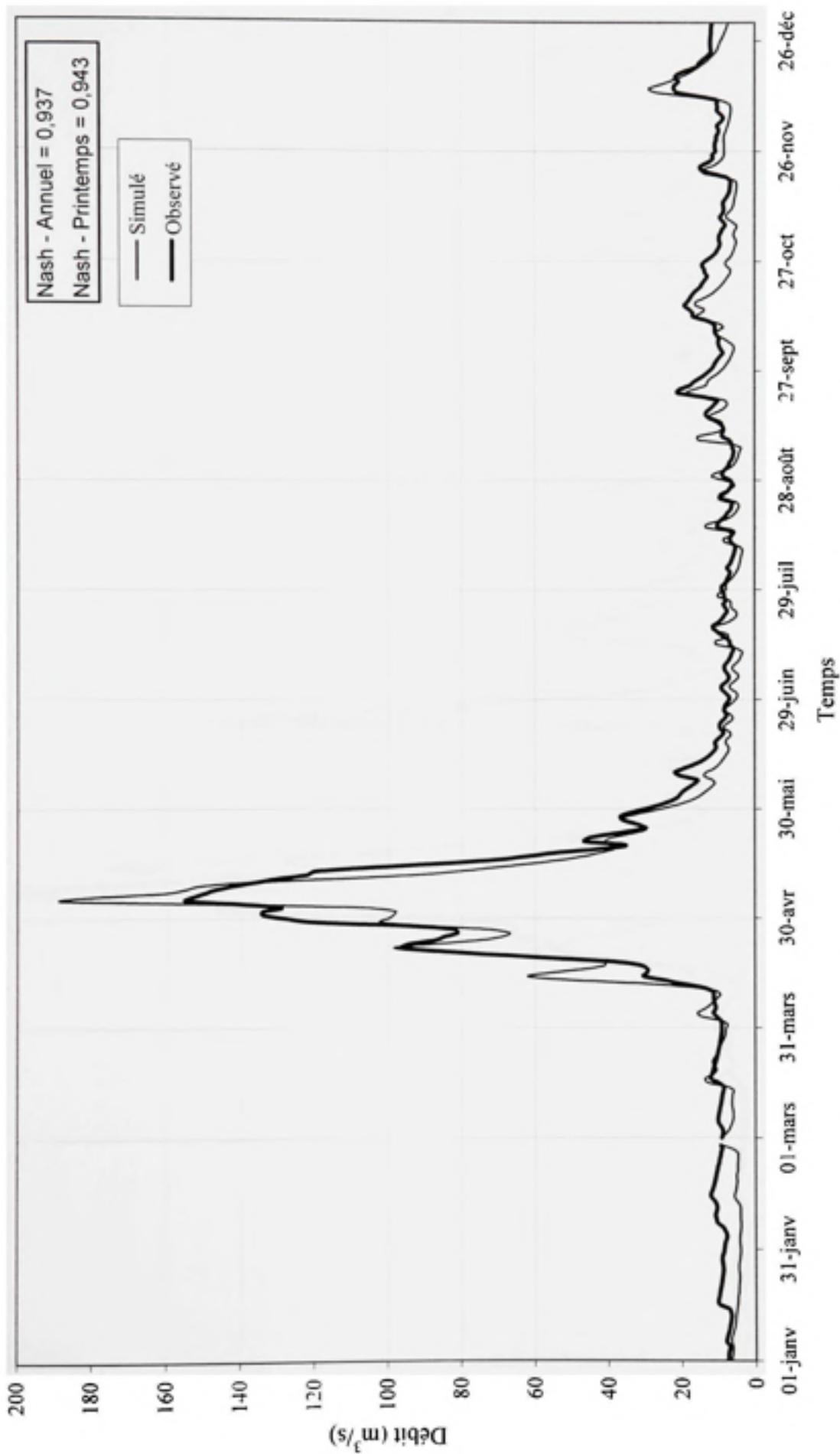


Figure A2.5 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1971.

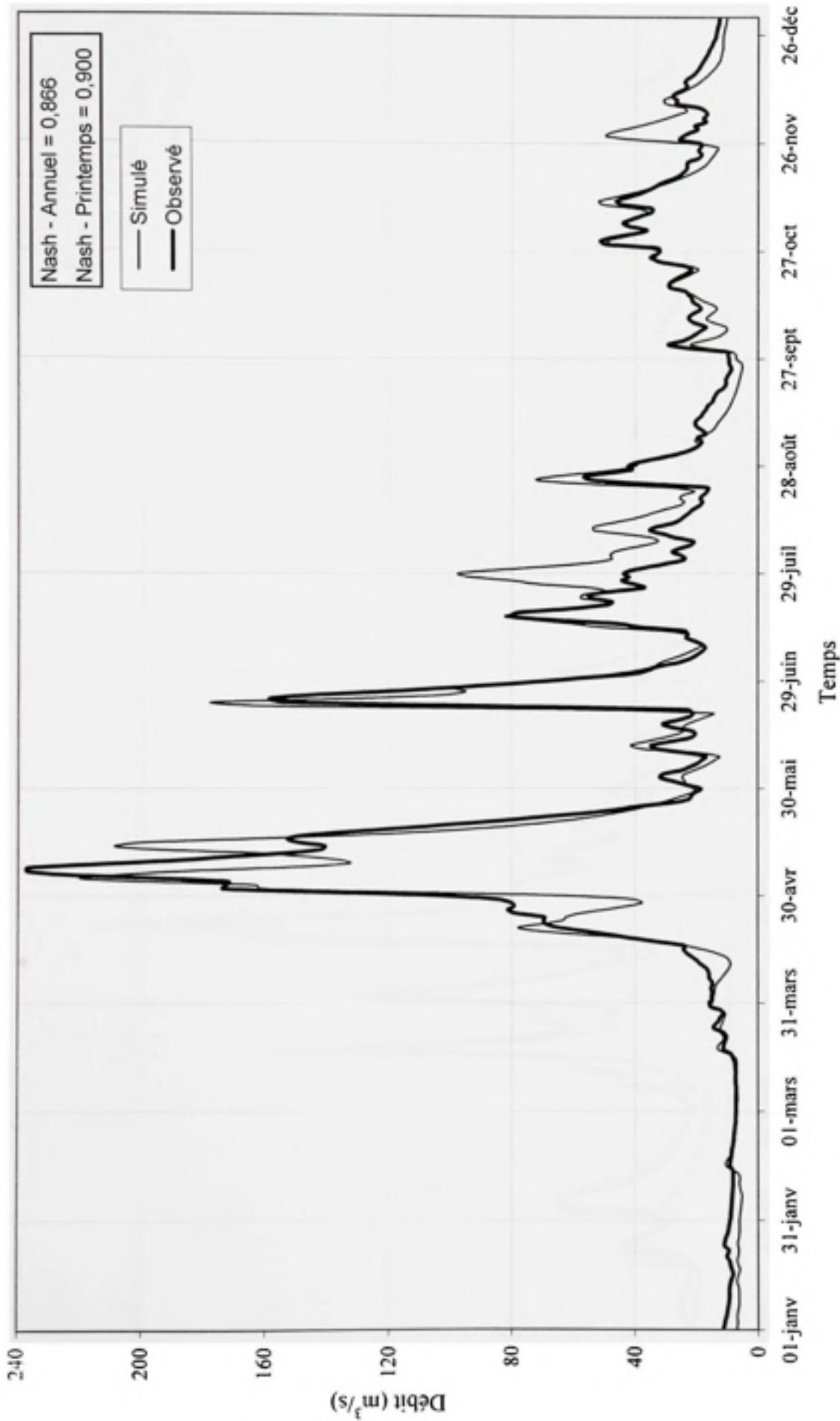


Figure A2.6 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1972.

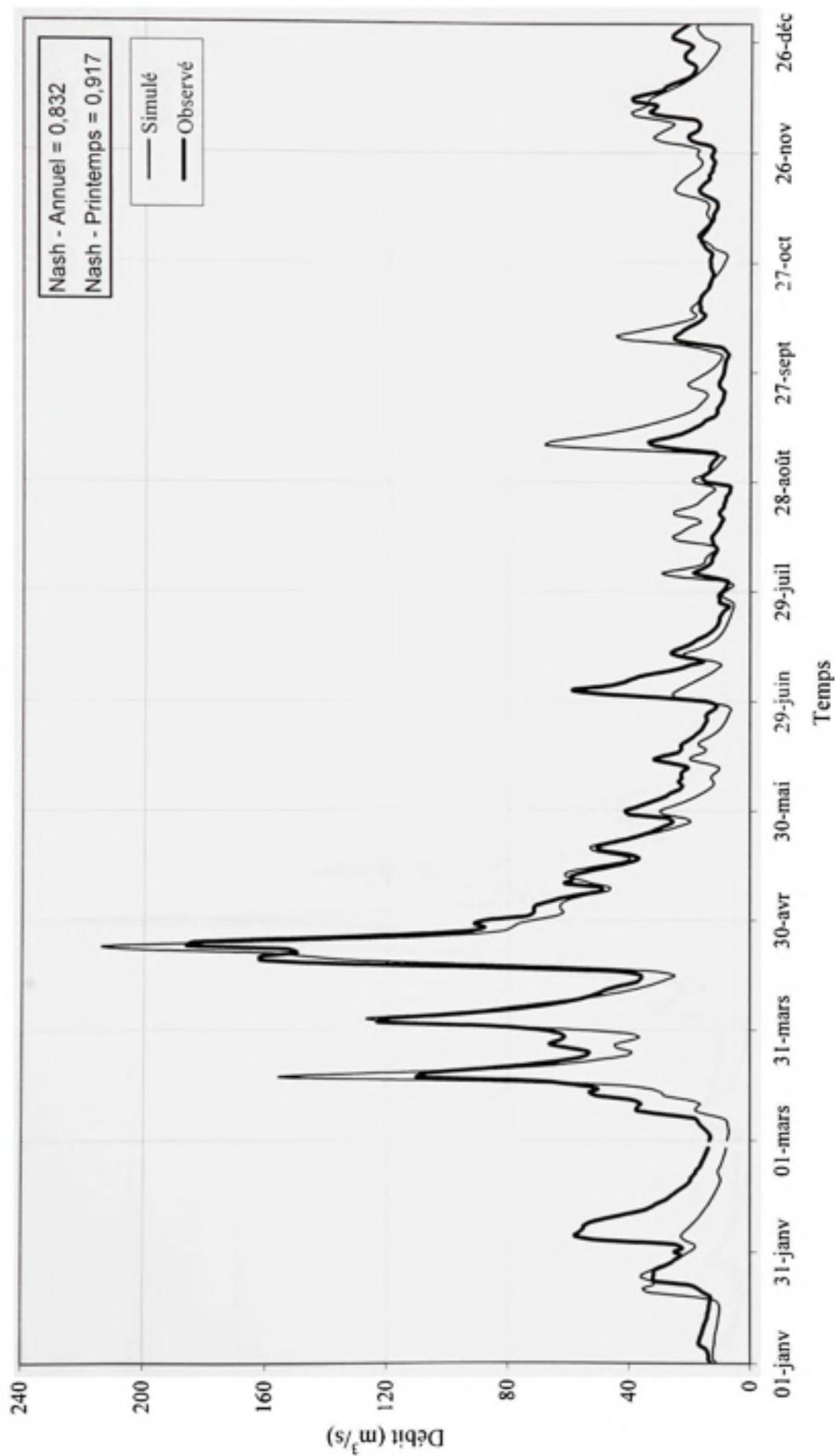


Figure A2.7 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1973.

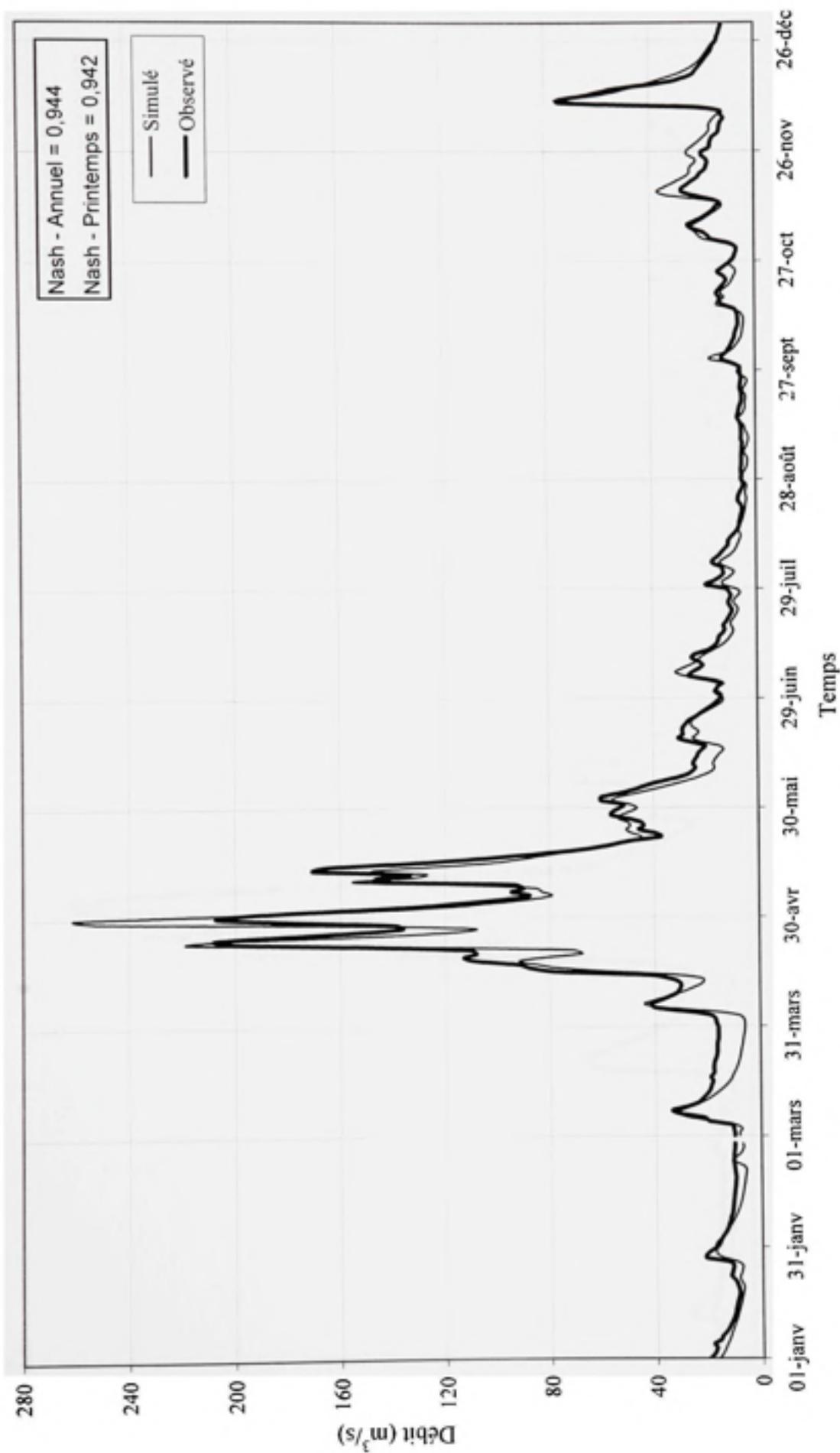


Figure A2.8 Hydrogrammes observés à la station 040110 et simulés par HYDROTEL pour l'année 1974.

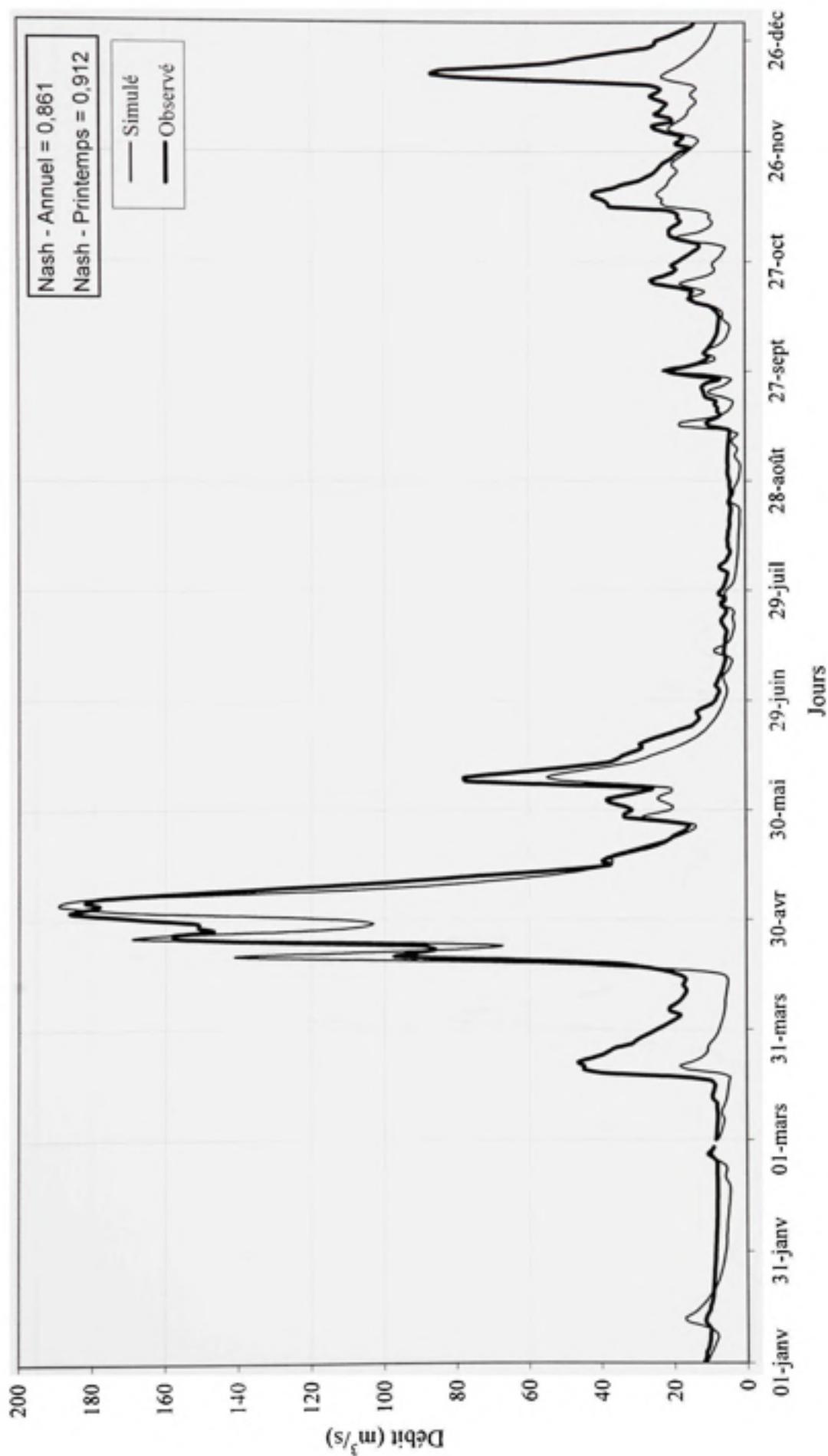


Figure A2.9 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1975.

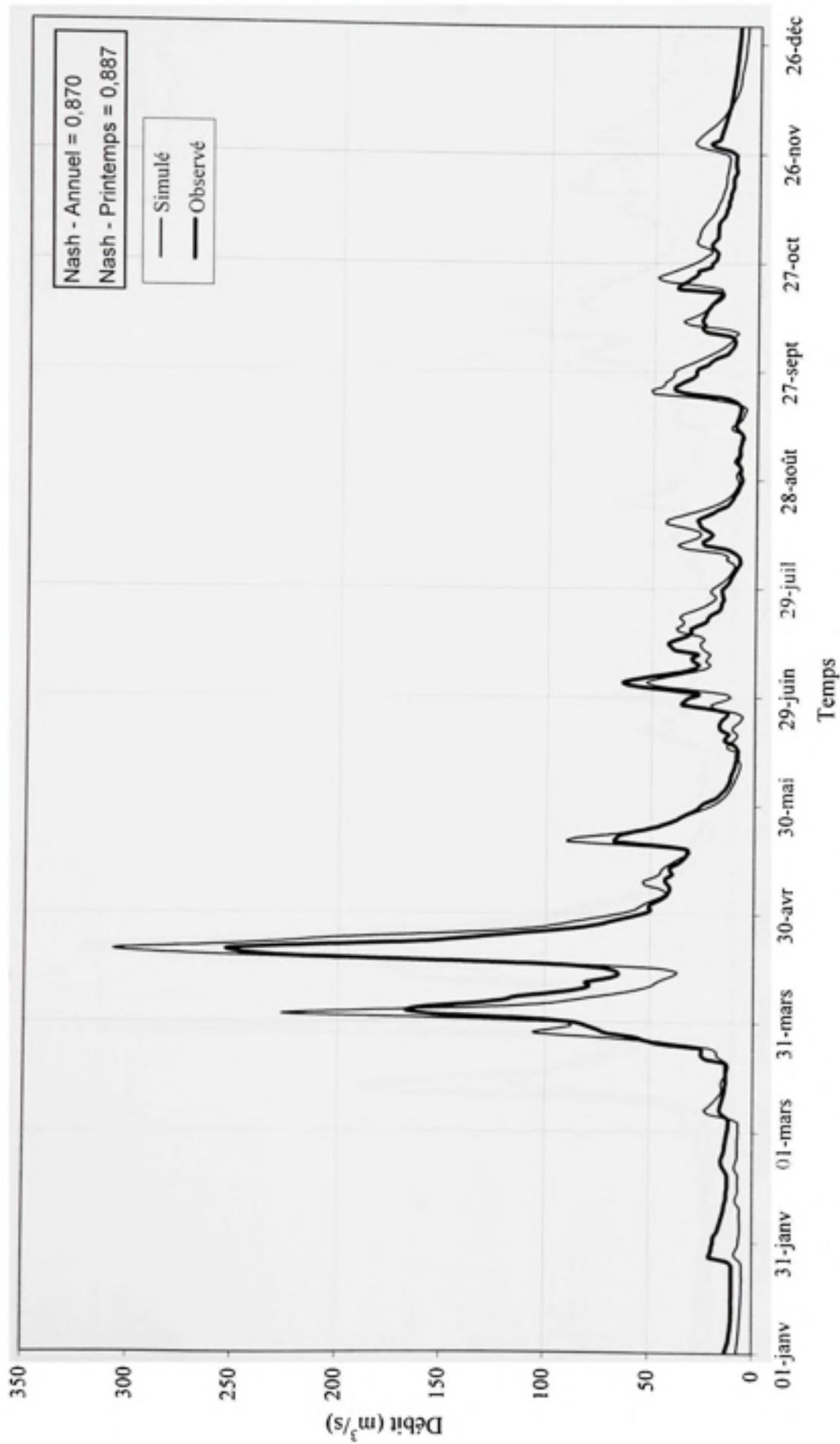


Figure A2.10 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1976.

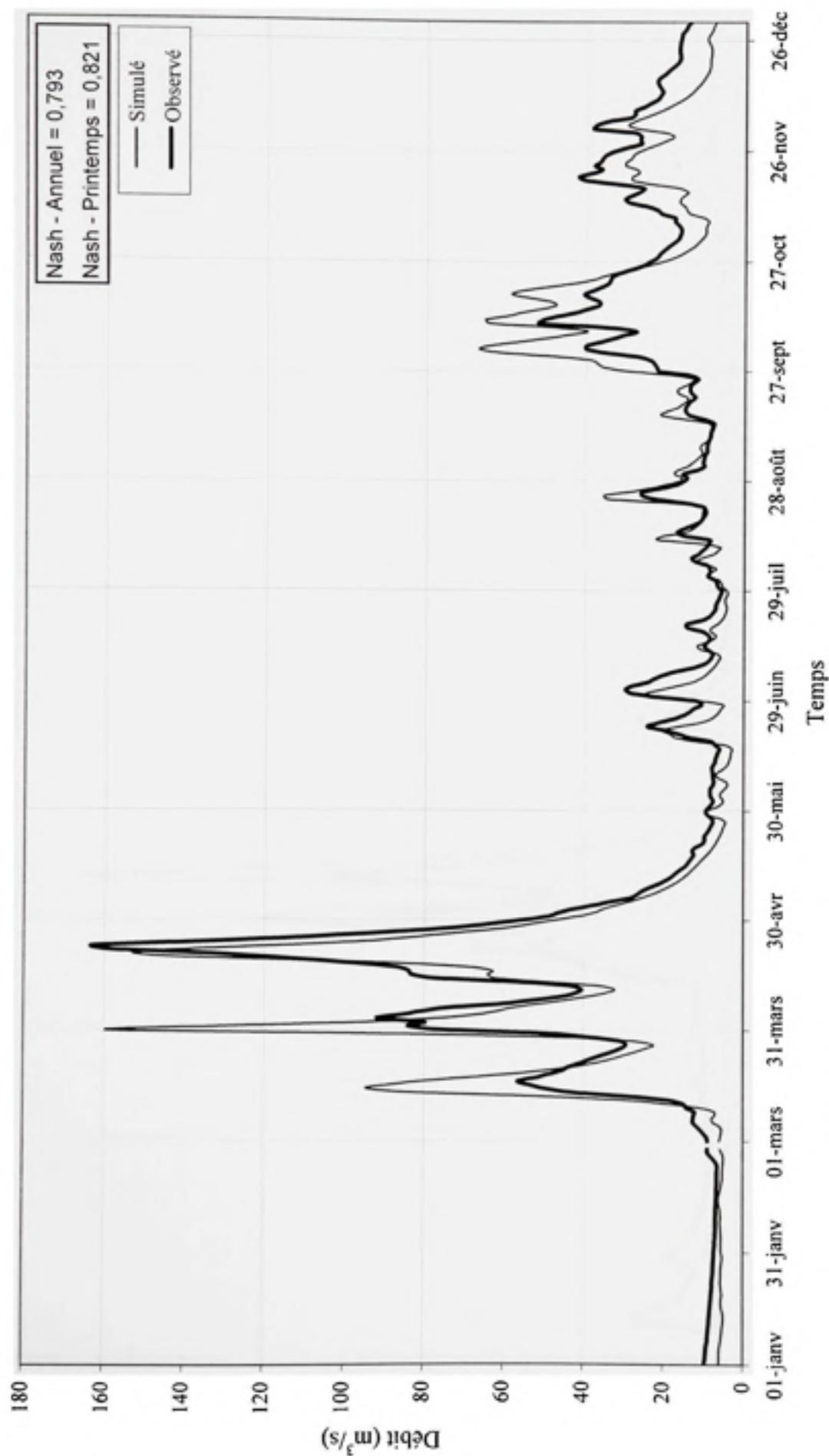


Figure A2.11 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1977.

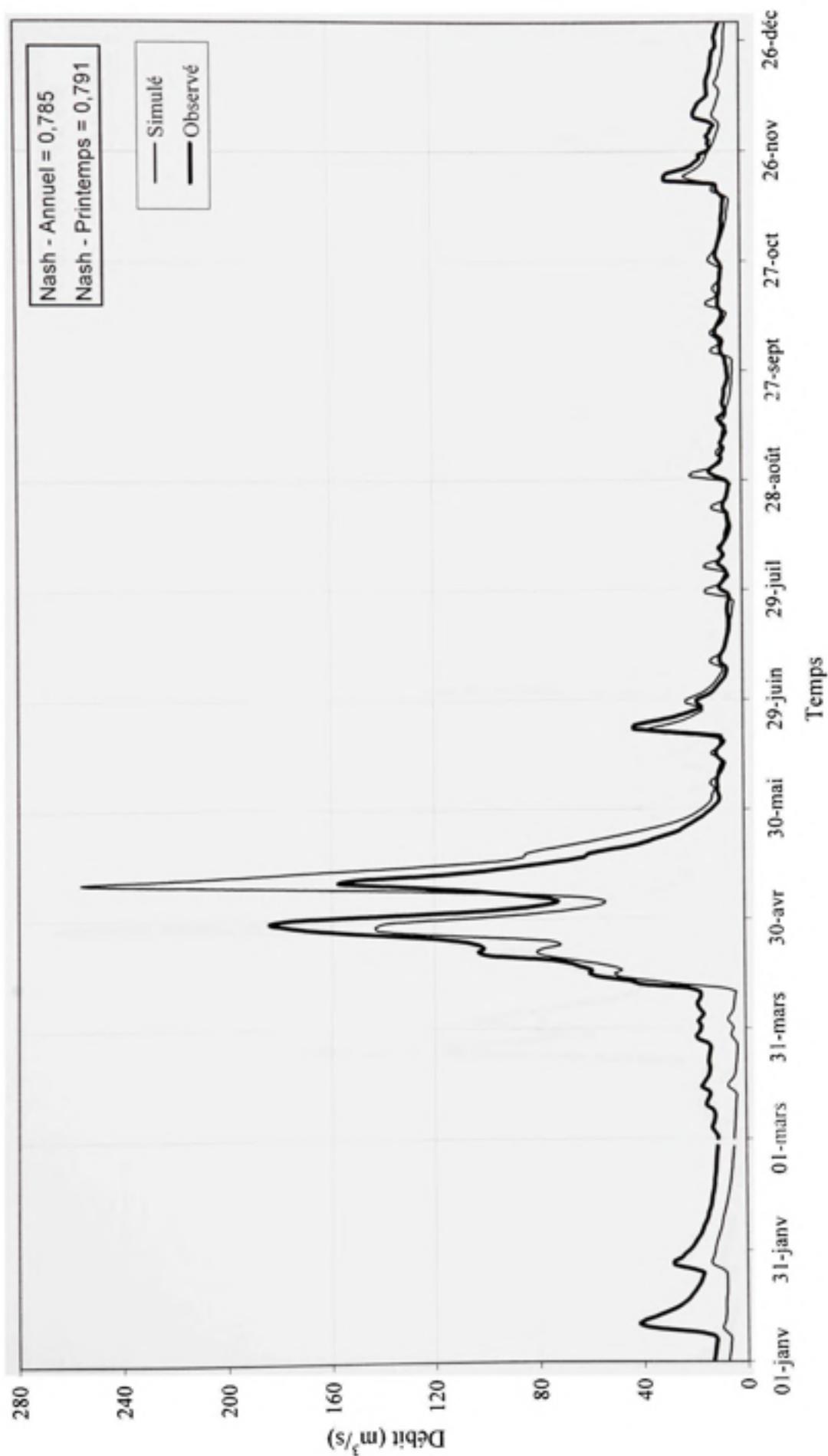


Figure A2.12 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1978.

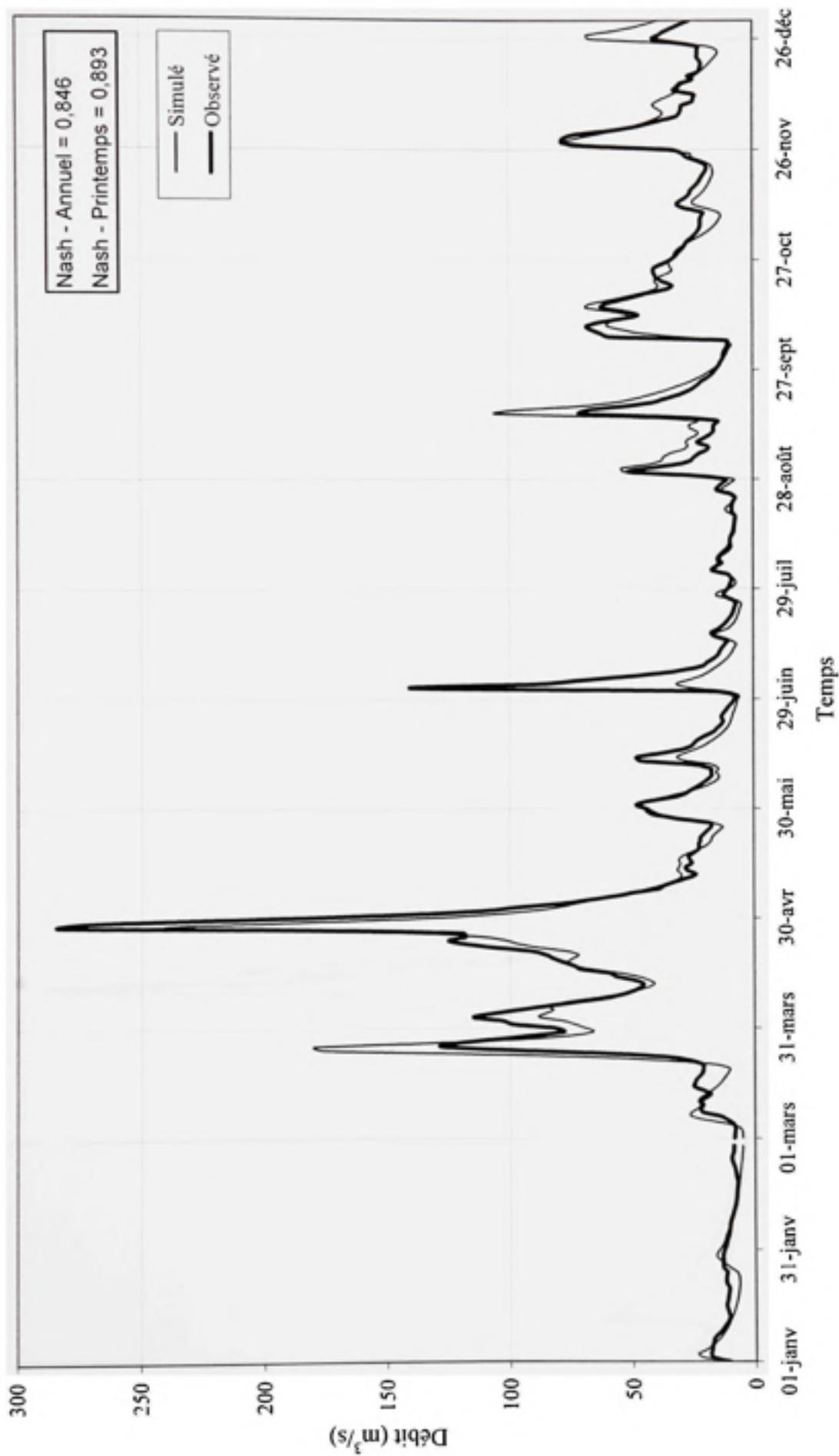


Figure A2.13 Hydrogrammes observés à la station 040110 et simulés par HYDROTEL pour l'année 1979.

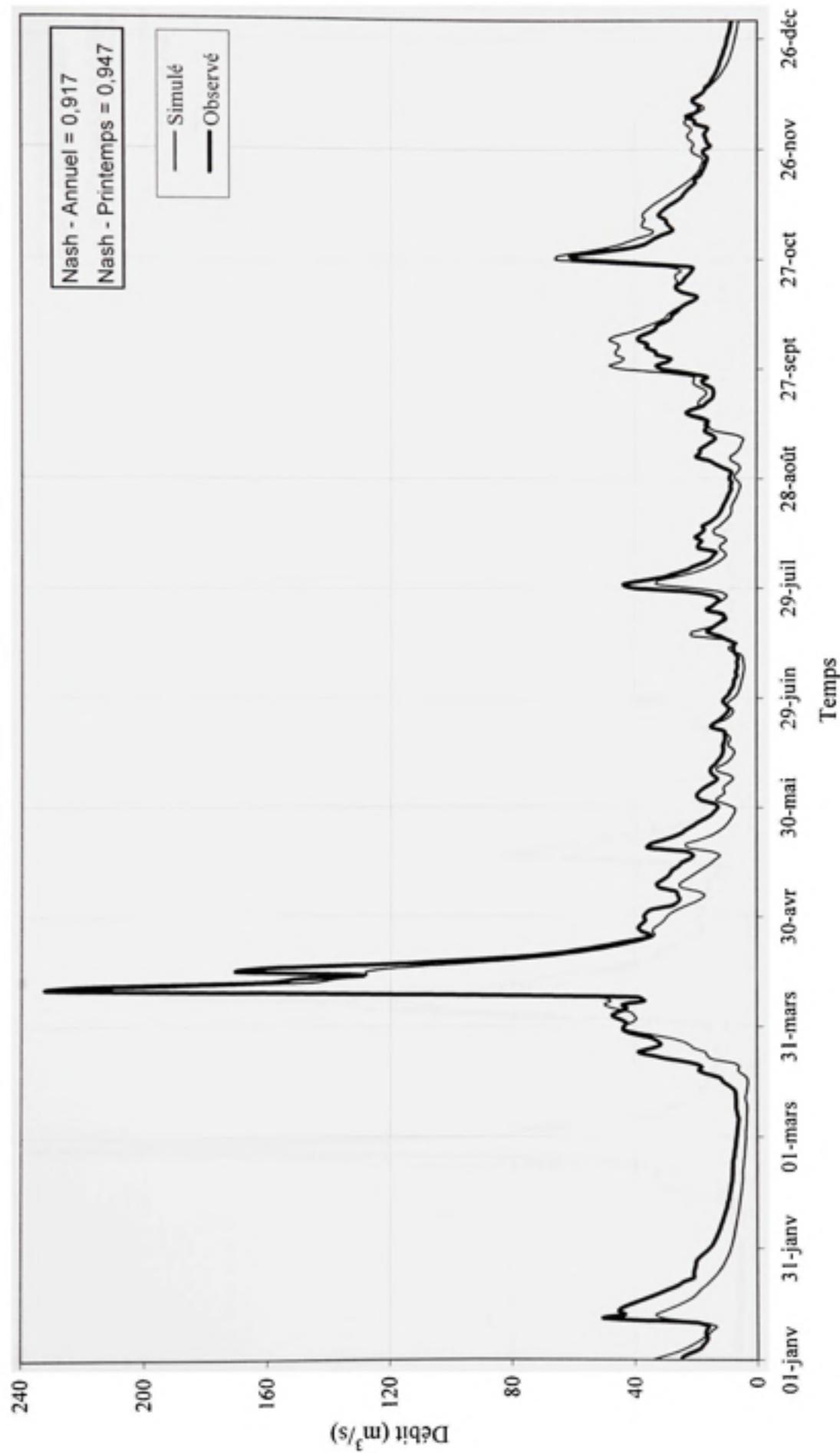


Figure A2.14 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1980.

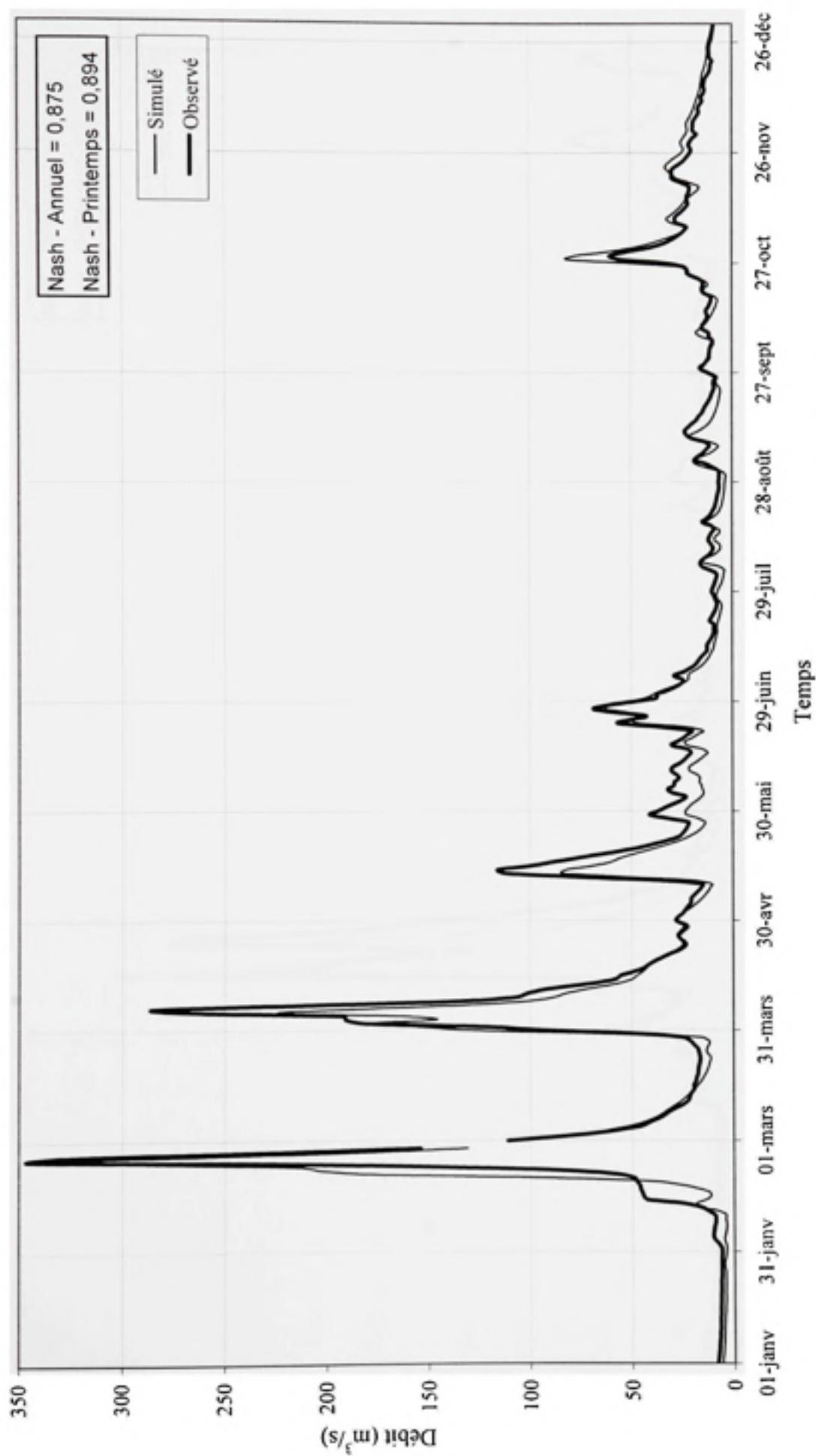


Figure A2.15 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1981.

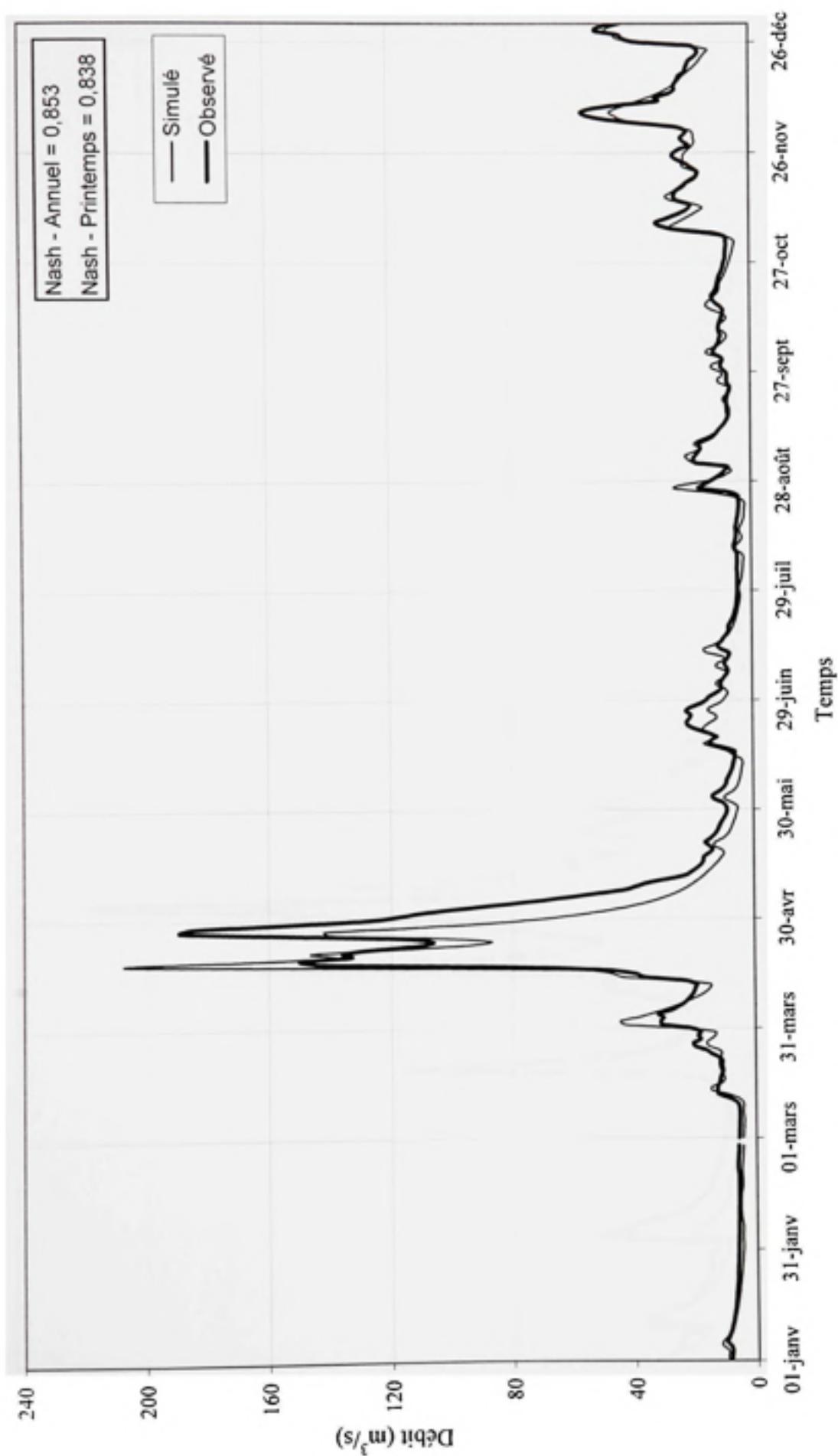


Figure A2.16 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1982.

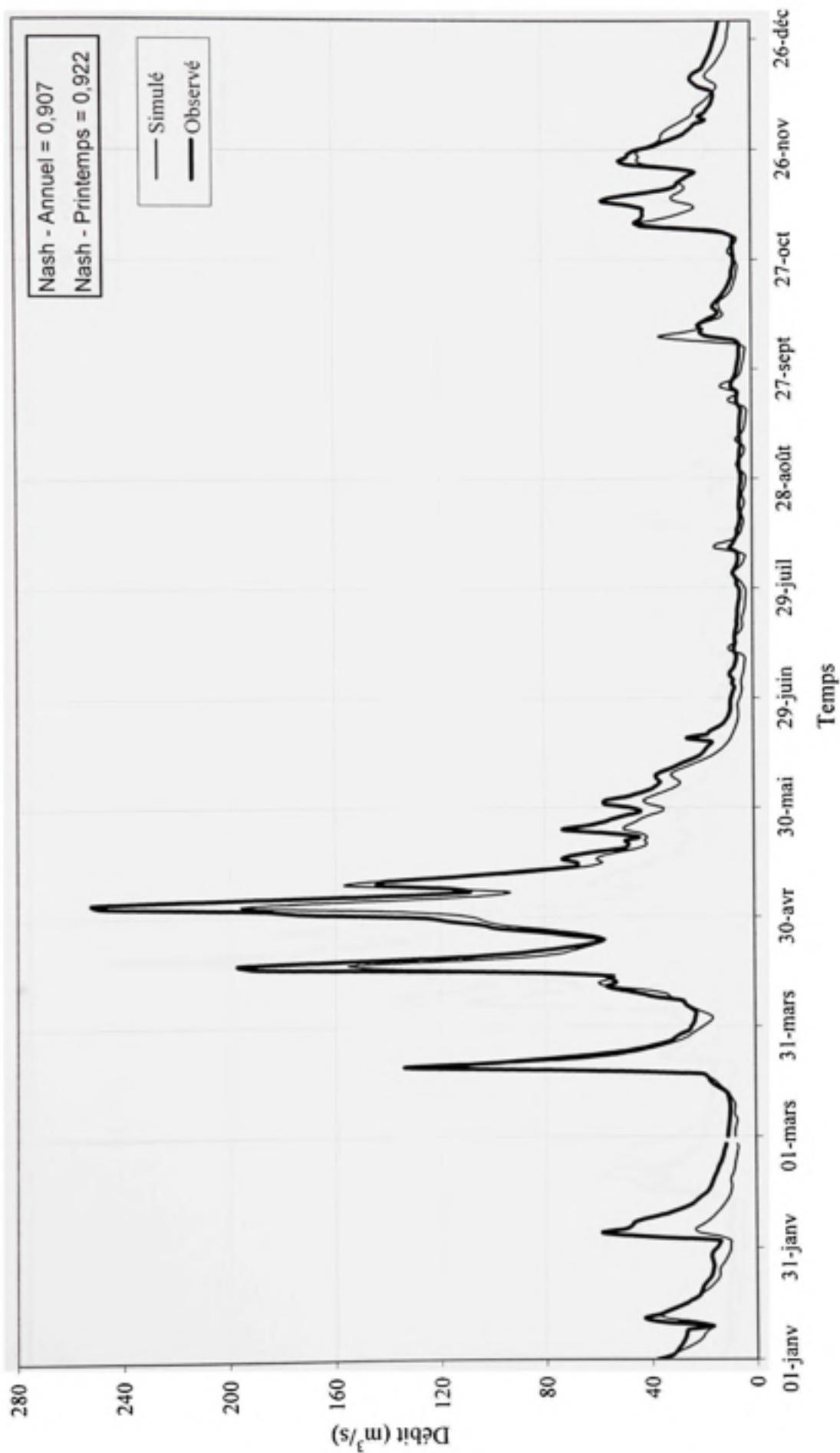


Figure A2.17 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1983.

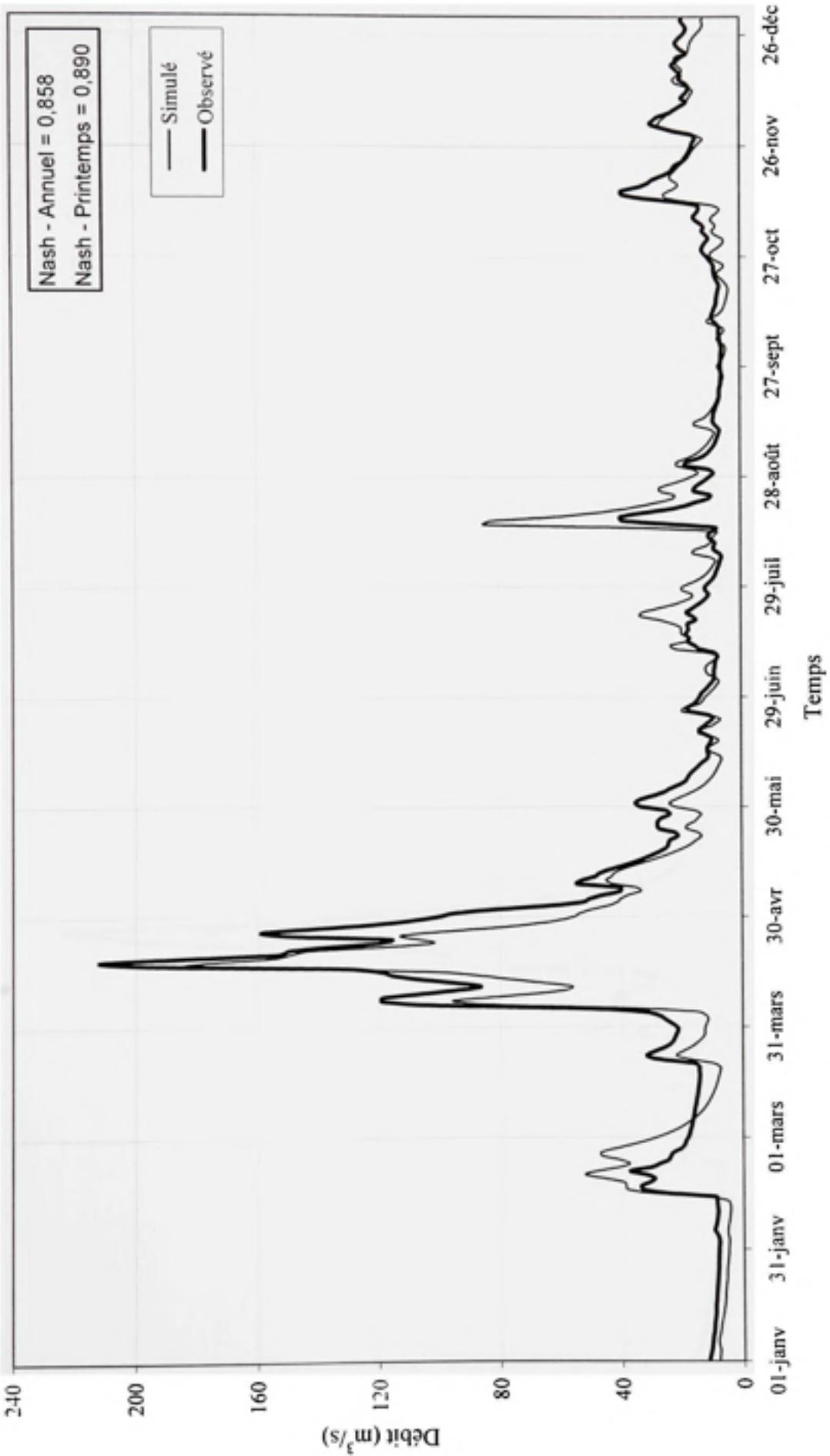


Figure A2.18 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1984.

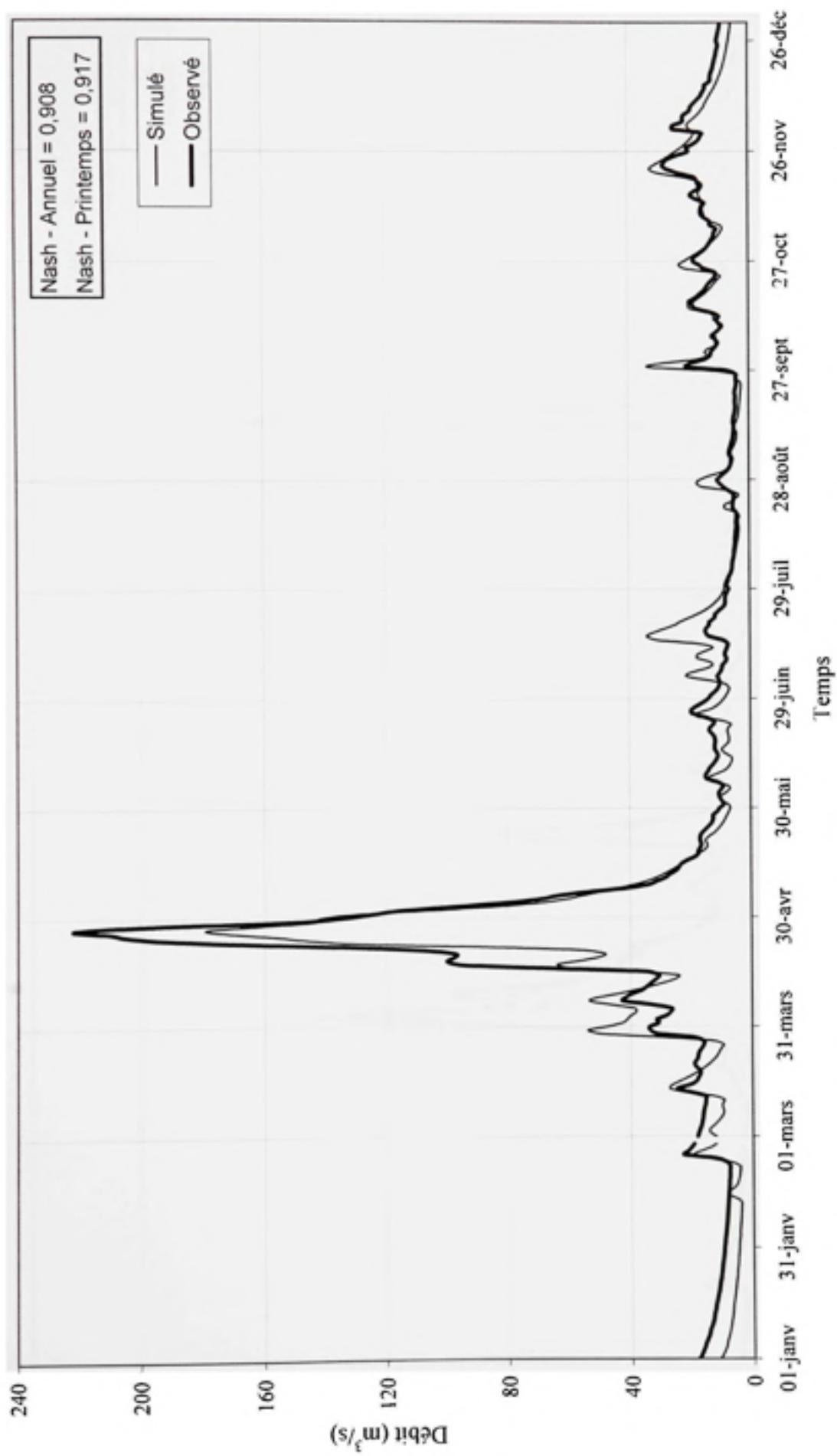


Figure A2.19 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1985.

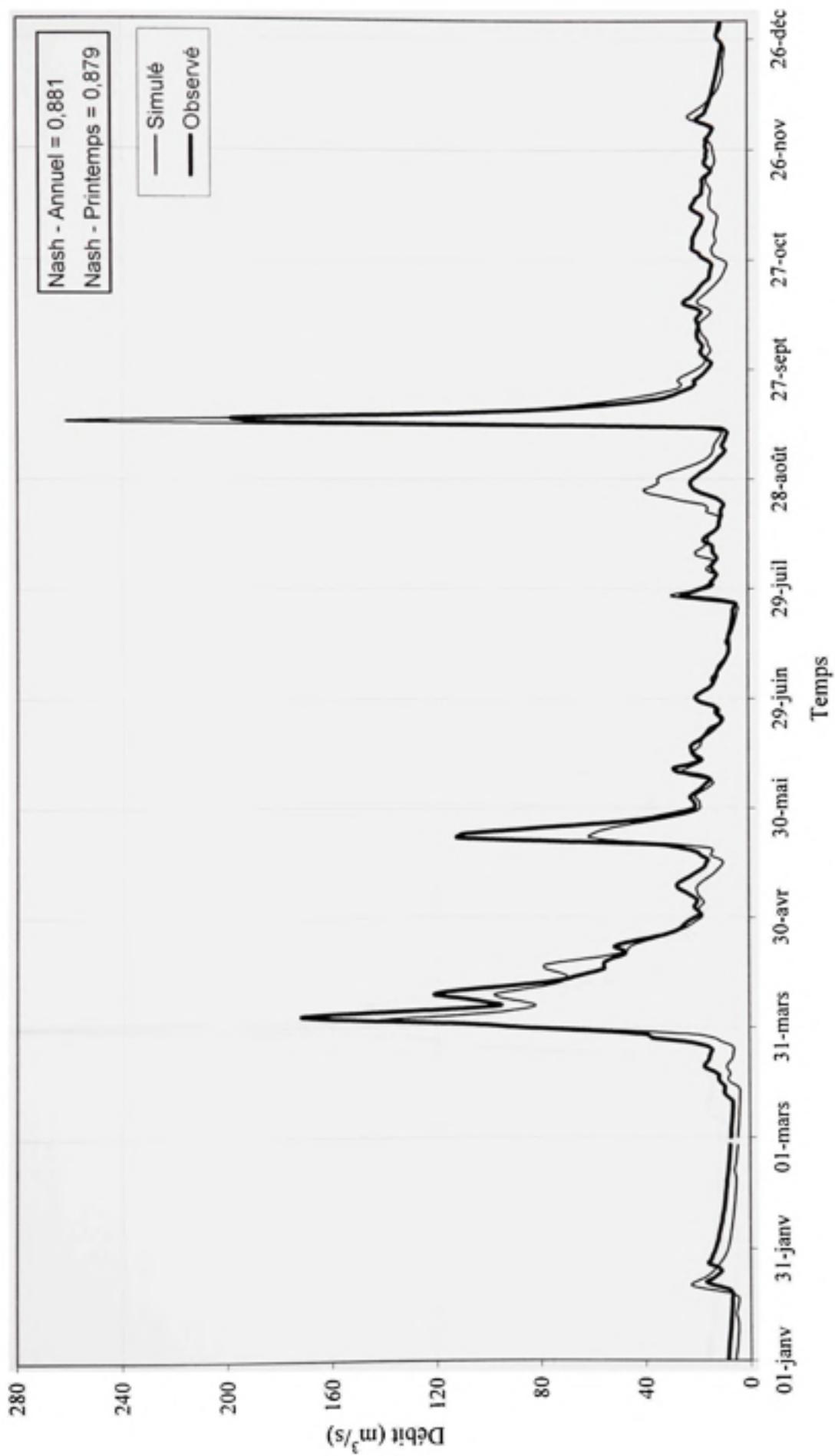


Figure A2.20 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1986.

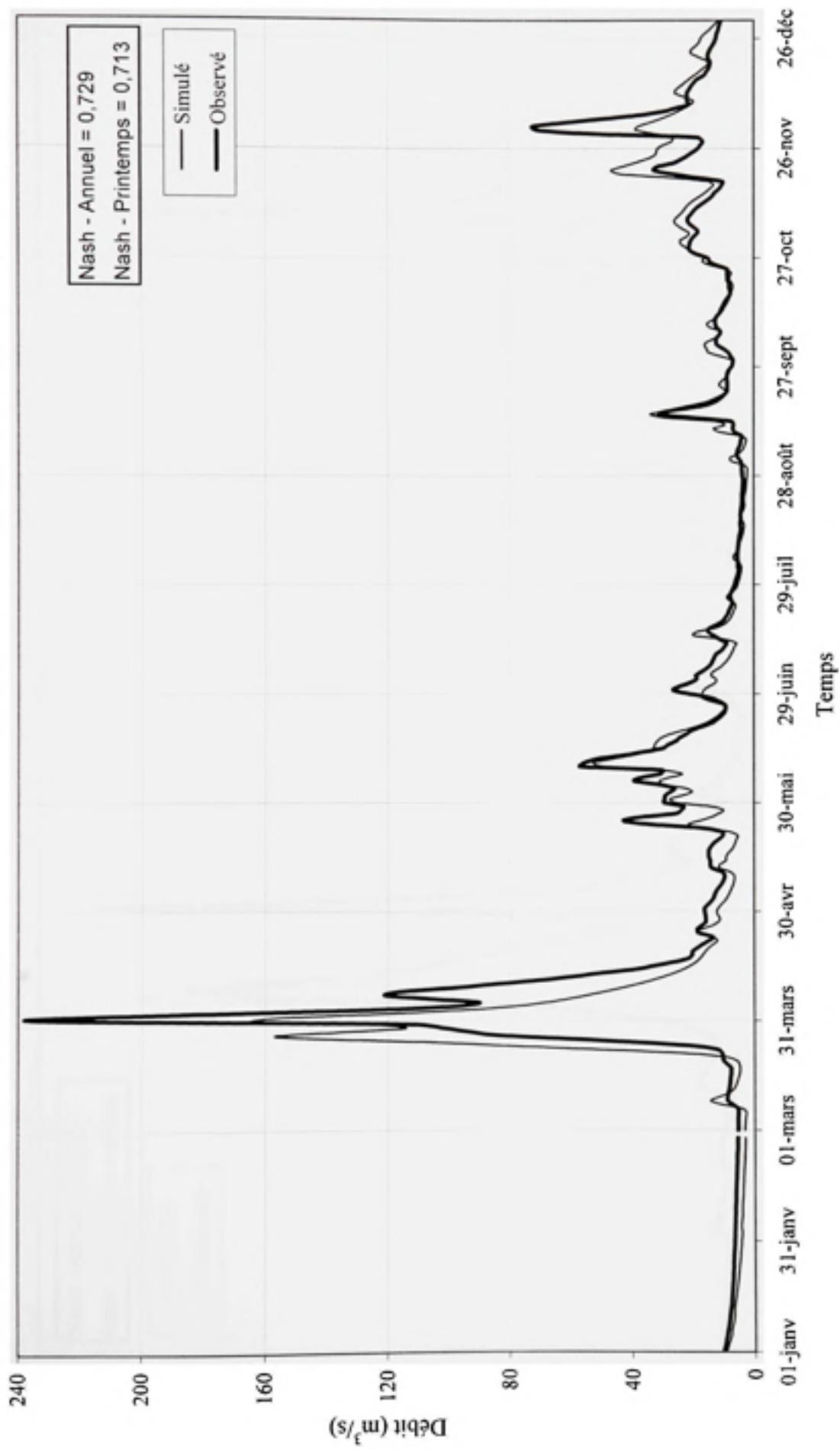


Figure A2.21 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1987.

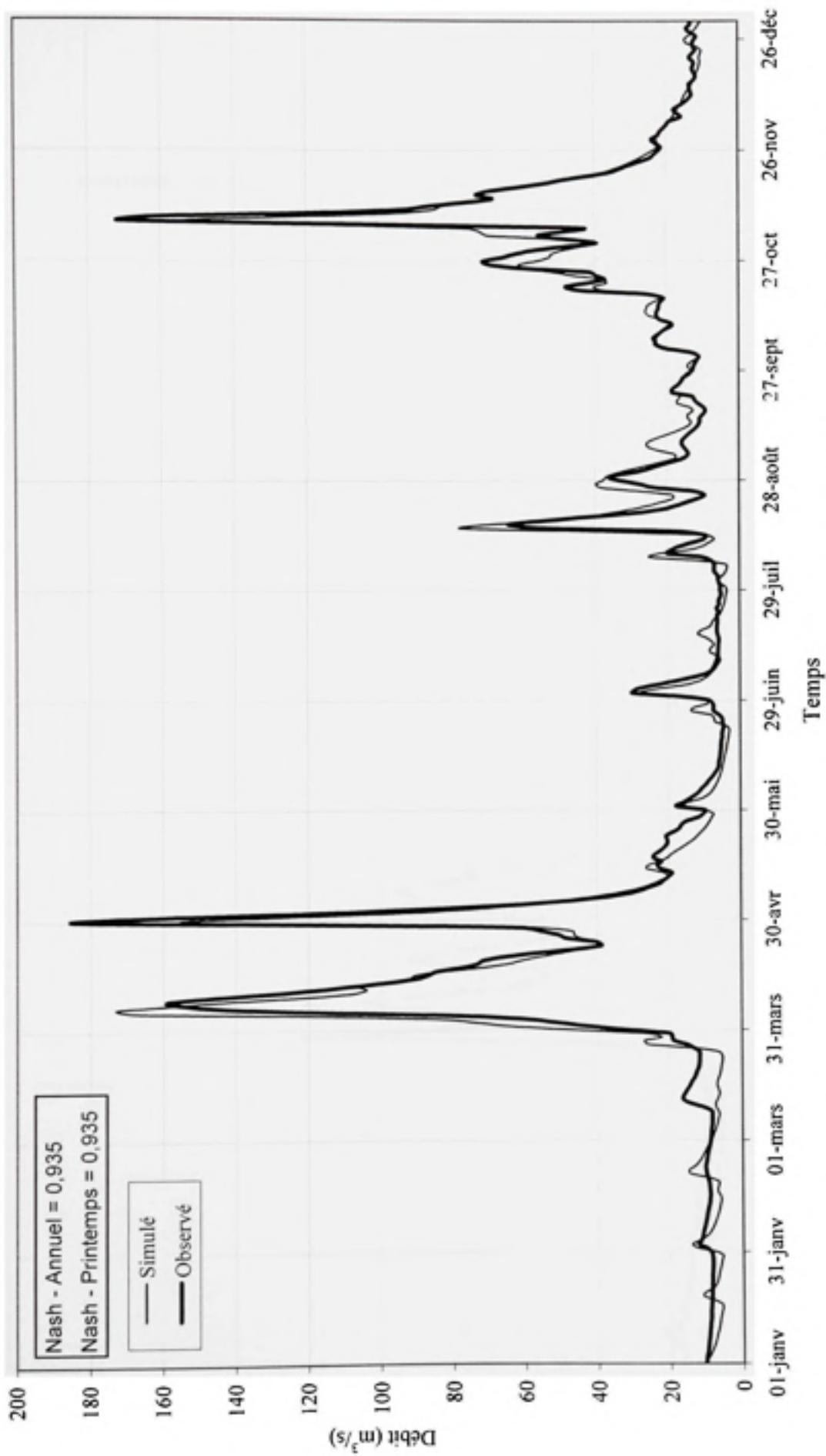


Figure A2.22 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1988.

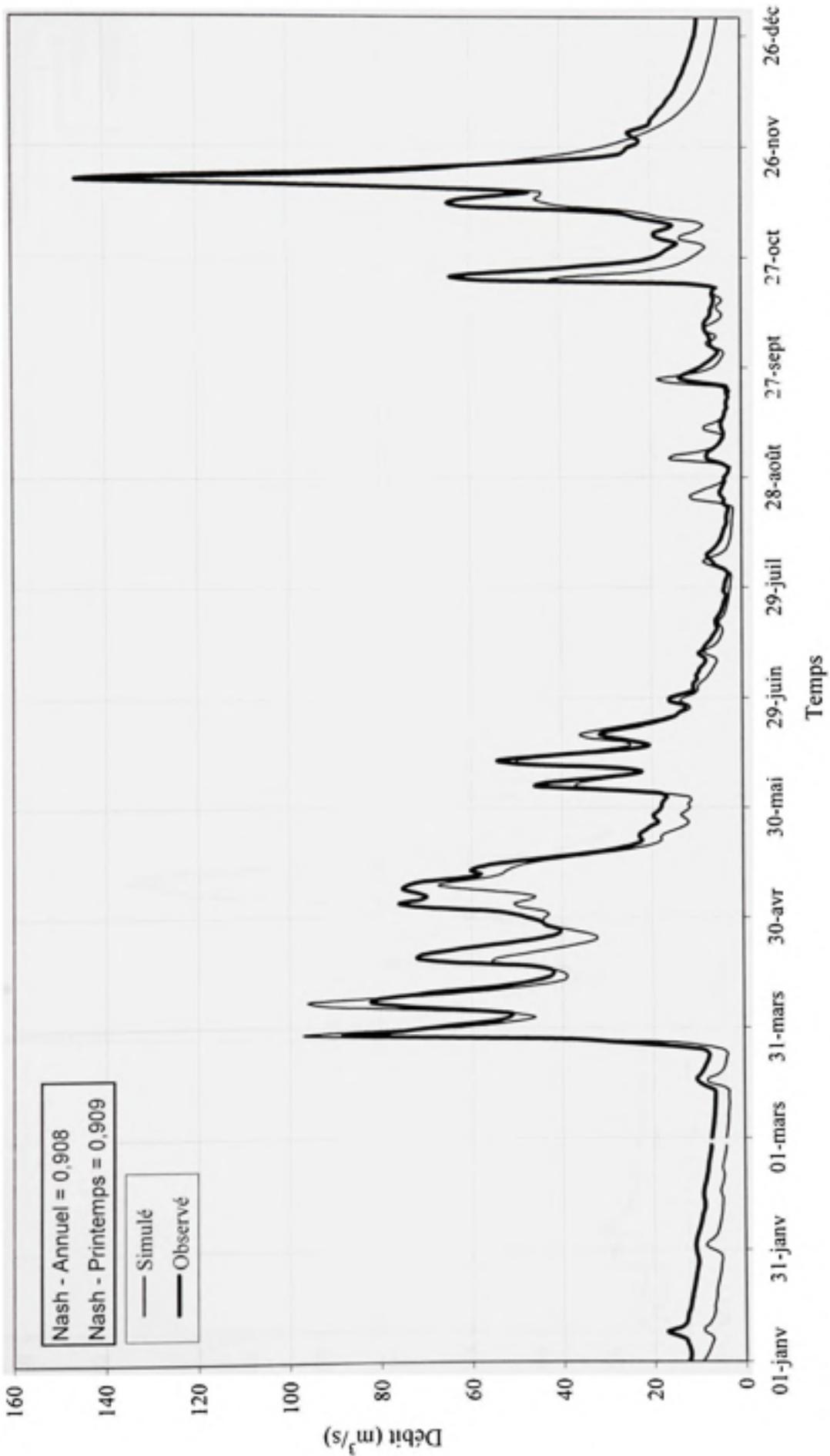


Figure A2.23 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1989.

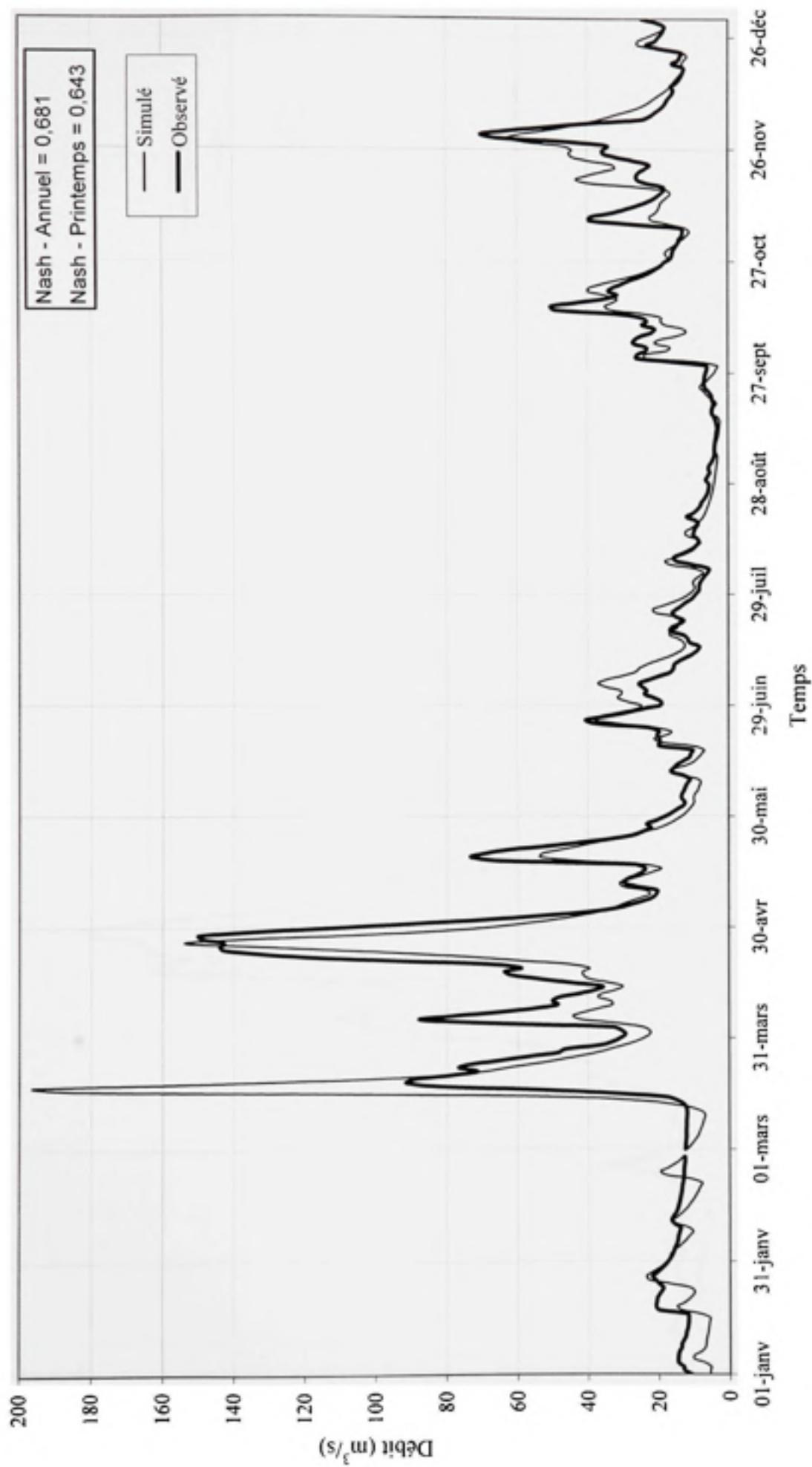


Figure A2.24 Hydrogrammes observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour l'année 1990.

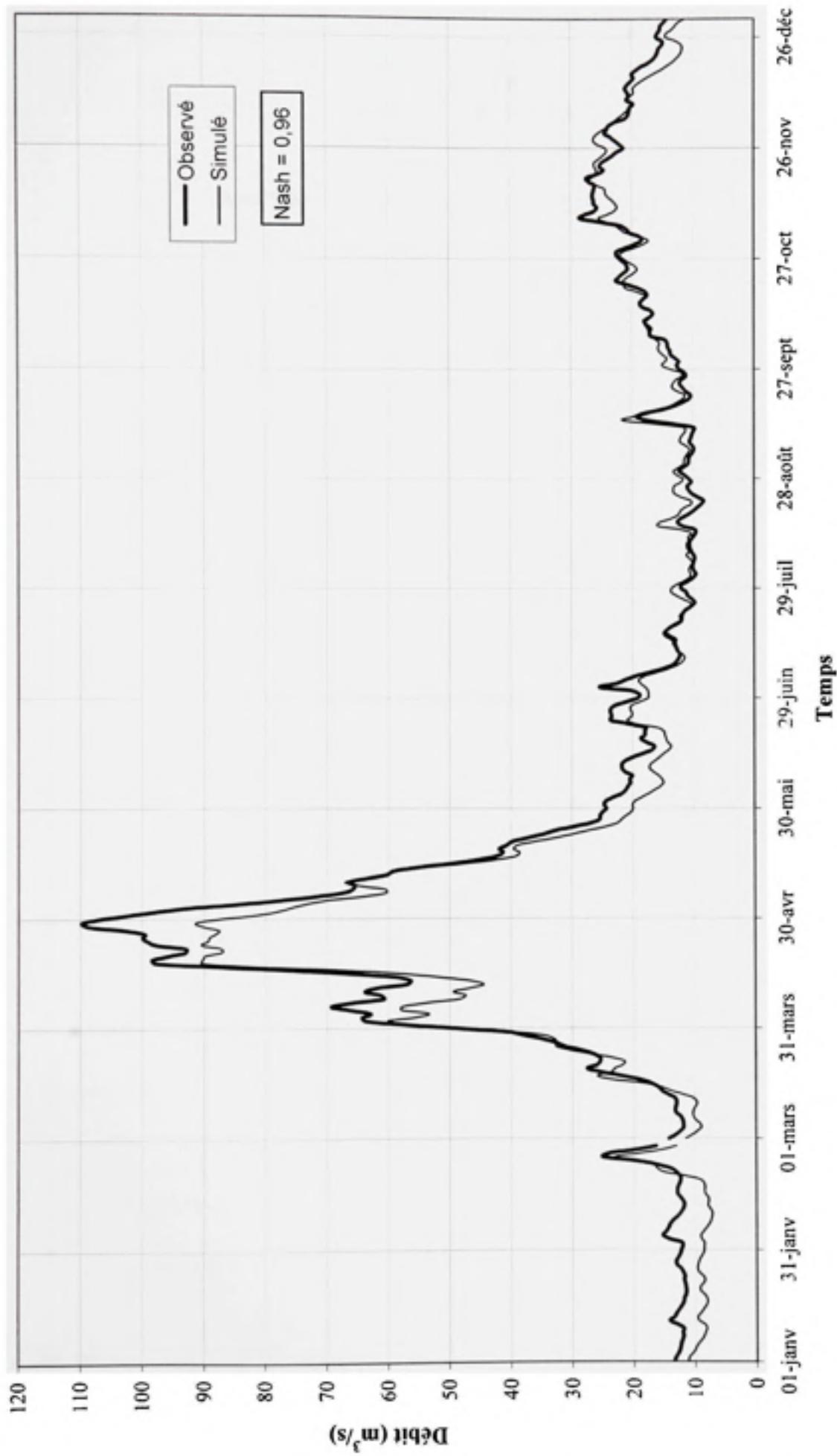


Figure A2.25 Hydrogrammes moyens observé à la station 040110 et simulé par HYDROTEL pour la période 1966-1990.

ANNEXE 3

Analyses de fréquences des crues de la période de référence

Analyse statistique des débits maximums annuels de la station 040110 (Rivière du Nord, Saint-Jérôme) de 1931 à 2000

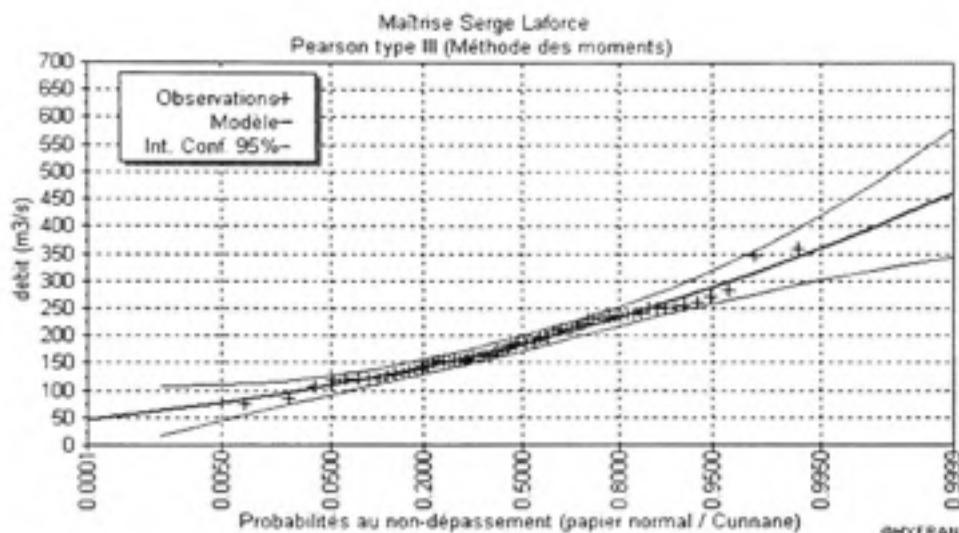
Résultats de l'ajustement

Pearson type III (Méthode des moments)

Nombre d'observations: 70

Paramètres

alpha 0.066041
 lambda 13.228652
 m -10.445169



Test d'adéquation

Pearson type III (Méthode des moments)

Hypothèses

H0 : L'échantillon provient d'une loi Pearson type III
 H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Pearson type III

Résultats

Résultat de la statistique : $\chi^2 = 6.00$
 p-value $p = 0.4232$
 Degrés de liberté : 6
 Nombre de classes : 10

Conclusion

Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5 %

Comparaison des caractéristiques de la loi et de l'échantillon

Pearson type III (Méthode des moments)

	Carac. de la loi	Carac. de l'échantillon
Minimum	-10.45	75.4
Maximum	Aucun	360
Moyenne	189.9	189.9
Ecart-type	55.07	55.07
Médiane	184.9	186
Coefficient de variation (Cv)	0.2901	0.2901
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0.5499	0.5499
Coefficient d'aplatissement (Ck)	3.454	3.445

Analyse statistique des débits maximums annuels de la station 040110 (Rivière du Nord, Saint-Jérôme) de 1967 à 1990

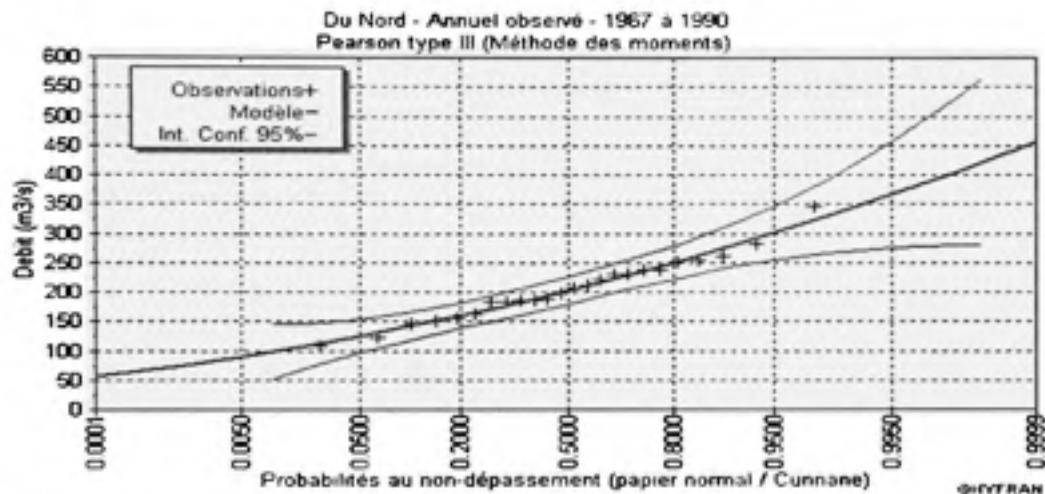
Résultats de l'ajustement

Pearson type III (Méthode des moments)

Nombre d'observations: 24

Paramètres

alpha 0.084847
 lambda 20.745952
 m -38.551964



Test d'adéquation

Pearson type III (Méthode des moments)

Hypothèses

H0 : L'échantillon provient d'une loi Pearson type III

H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Pearson type III

Résultats

Résultat de la statistique : $\chi^2 = 2.25$
 p-value $p = 0.5222$
 Degrés de liberté : 3
 Nombre de classes : 7

Conclusion

Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5 %

Comparaison des caractéristiques de la loi et de l'échantillon

Pearson type III (Méthode des moments)

	Carac. de la loi	Carac. de l'échantillon
Minimum	-38.55	108
Maximum	Aucun	345
Moyenne	206	206
Ecart-type	53.68	53.68
Médiane	202.1	203
Coefficient de variation (Cv)	0.2606	0.2606
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0.4391	0.4391
Coefficient d'aplatissement (Ck)	3.289	3.048

Analyse statistique des débits maximums annuels simulés par Hydrotel
à la station 040110 (Rivière du Nord, Saint-Jérôme) de 1967 à 1990

Résultats de l'ajustement

Pearson type III (Méthode des moments)

Nombre d'observations: 24

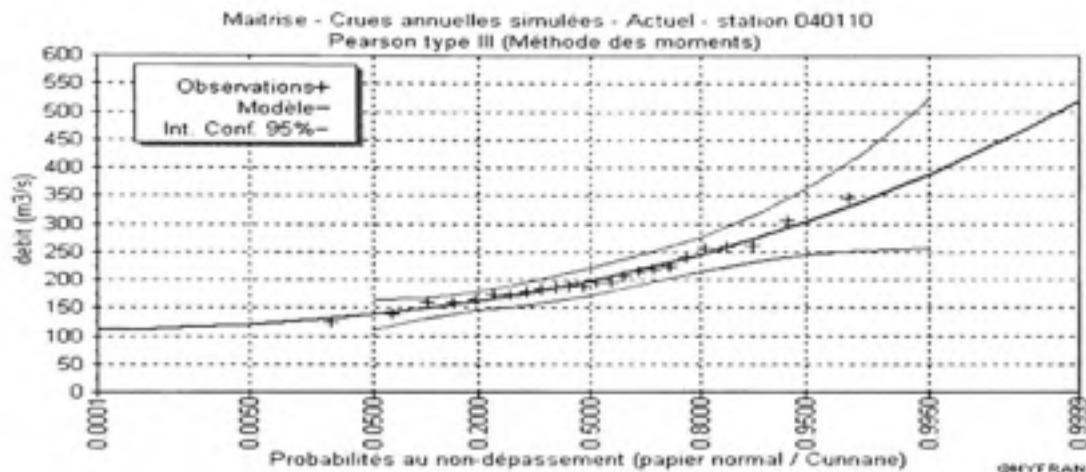
Paramètres

alpha 0.037267
lambda 3.73875
m 105.636131

Quantiles

q = F(X) (probabilité au non-dépassement)

T = 1/(1-q)



Test d'adéquation

Pearson type III(Méthode des moments)

Hypothèses

H0 : L'échantillon provient d'une loi Pearson type III

H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Pearson type III

Résultats

Résultat de la statistique : $\chi^2 = 3.42$
p-value $p = 0.3317$
Degrés de liberté : 3
Nombre de classes : 7

Conclusion

Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5 %

Comparaison des caractéristiques de la loi et de l'échantillon

Pearson type III(Méthode des moments)

	Carac. de la loi	Carac. de l'échantillon
Minimum	105.6	125
Maximum	Aucun	346
Moyenne	206	206
Ecart-type	51.88	51.88
Médiane	197.2	192
Coefficient de variation (Cv)	0.2519	0.2519
Coefficient d'asymétrie (Cs)	1.034	1.034
Coefficient d'aplatissement (Ck)	4.605	3.414

Analyse statistique des débits maximums printaniers observés
à la station 040110 (Rivière du Nord, Saint-Jérôme) de 1967 à 1990

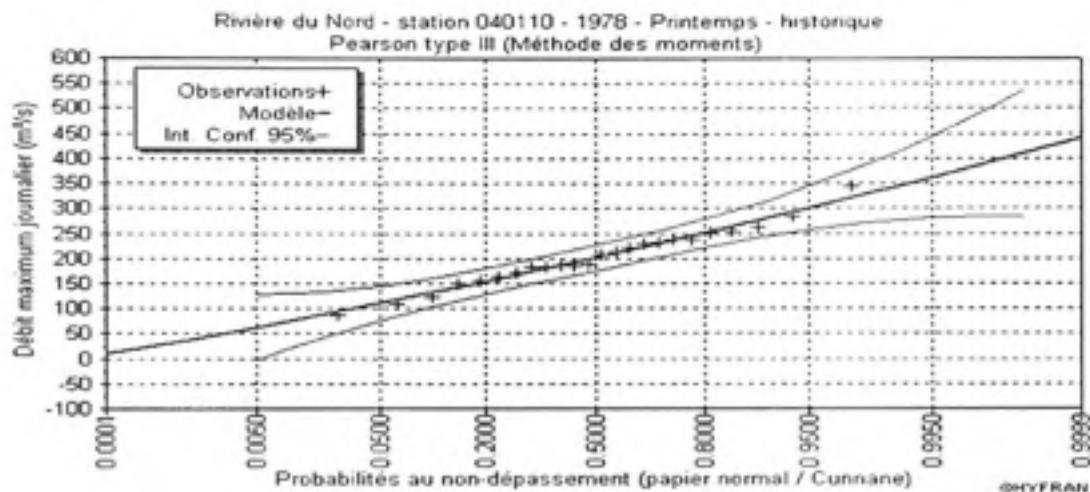
Résultats de l'ajustement

Pearson type III (Méthode des moments)

Nombre d'observations: 24

Paramètres

alpha	0.187463
lambda	118.362724
m	-428.924644



Test d'adéquation

Pearson type III (Méthode des moments)

Hypothèses

H0 : L'échantillon provient d'une loi Pearson type III

H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Pearson type III

Résultats

Résultat de la statistique :	$\chi^2 = 5,17$	
p-value	$p = 0,1600$	
Degrés de liberté :		3
Nombre de classes :		7

Conclusion

Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5 %

Comparaison des caractéristiques de la loi et de l'échantillon

Pearson type III (Méthode des moments)

	Carac. de la loi	Carac. de l'échantillon
Minimum	-429	87.2
Maximum	Aucun	345
Moyenne	202	202
Ecart-type	58	58
Médiane	201	199
Coefficient de variation (Cv)	0.287	0.287
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0.184	0.184
Coefficient d'aplatissement (Ck)	3.05	2.93

Analyse statistique des débits maximums printaniers simulés
à la station 040110 (Rivière du Nord, Saint-Jérôme) de 1967 à 1990

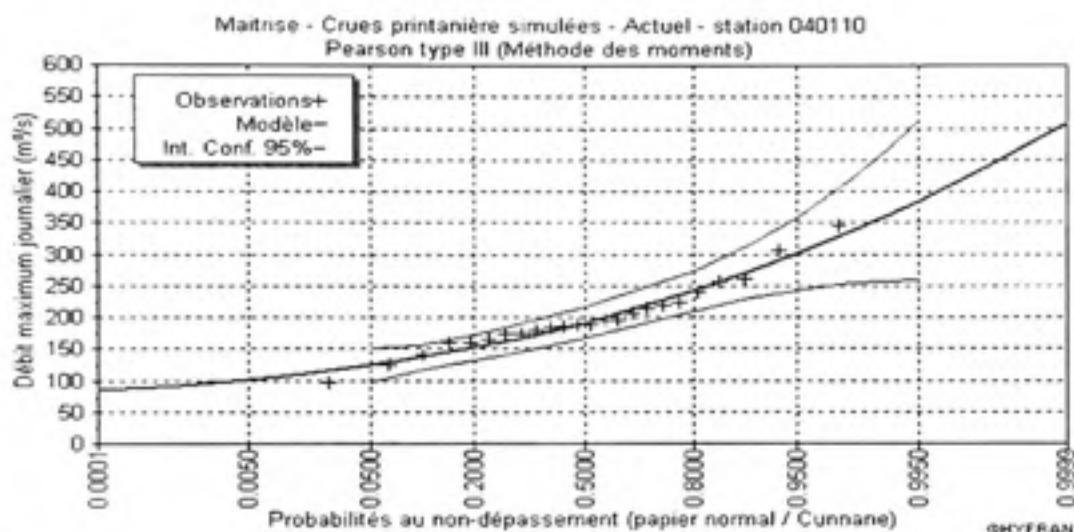
Résultats de l'ajustement

Pearson type III (Méthode des moments)

Nombre d'observations: 24

Paramètres

alpha	0.042466
lambda	5.458116
m	70.72102



Test d'adéquation

Pearson type III(Méthode des moments)

Hypothèses

H0 : L'échantillon provient d'une loi Pearson type III

H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Pearson type III

Résultats

Résultat de la statistique :	$\chi^2 = 3.42$
p-value	$p = 0.3317$
Degrés de liberté :	3
Nombre de classes :	7

Conclusion

Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5 %

Comparaison des caractéristiques de la loi et de l'échantillon

Pearson type III(Méthode des moments)

	Carac. de la loi	Carac. de l'échantillon
Minimum	70.7	96
Maximum	Aucun	346
Moyenne	199	199
Ecart-type	55	55
Médiane	191	189
Coefficient de variation (Cv)	0.276	0.276
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0.856	0.856
Coefficient d'aplatissement (Ck)	4.1	3.59

Analyse statistique des débits maximums été-automne observés
à la station 040110 (Rivière du Nord, Saint-Jérôme) de 1967 à 1990

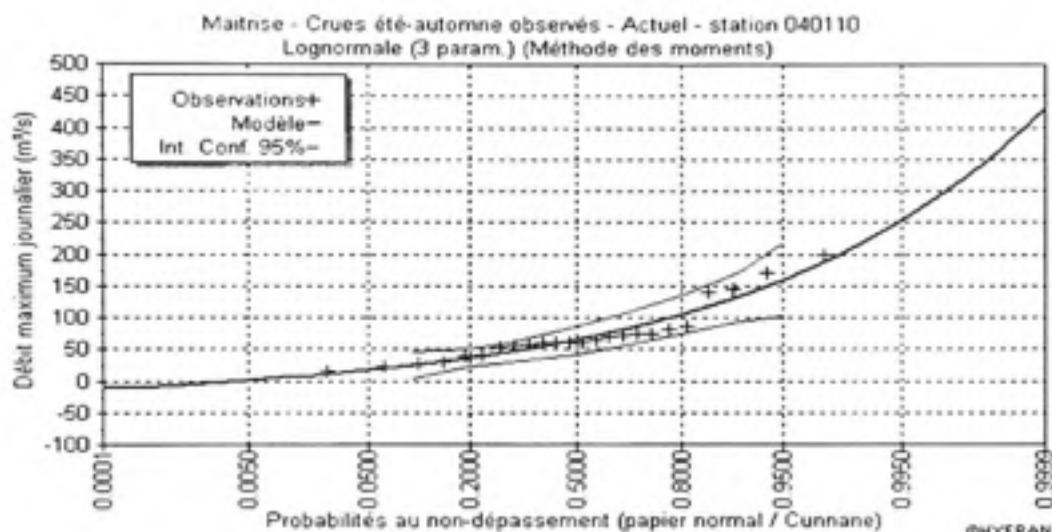
Résultats de l'ajustement

Lognormale (3 param.) (Méthode des moments)

Nombre d'observations: 24

Paramètres

m	-30.530024
mu	4.551485
sigma	0.424419



Test d'adéquation

Lognormale (3 param.) (Méthode des moments)

Hypothèses

H0 : L'échantillon provient d'une loi Lognormale (3 param.)

H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Lognormale (3 param.)

Résultats

p-value p = 0.0746

Degrés de liberté 3

Conclusion

Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5 %

Comparaison des caractéristiques de la loi et de l'échantillon

Lognormale (3 param.) (Méthode des moments)

	Carac. de la loi	Carac. de l'échantillon
Minimum	-30.5	14.5
Maximum	Aucun	198
Moyenne	73.2	73.2
Ecart-type	46.1	46.1
Mediane	64.2	61
Coefficient de variation (Cv)	0.63	0.63
Coefficient d'asymétrie (Cs)	1.42	1.42
Coefficient d'aplatissement (Ck)	6.79	3.78

Analyse statistique des débits maximums été-automne simulés
à la station 040110 (Rivière du Nord, Saint-Jérôme) de 1967 à 1990

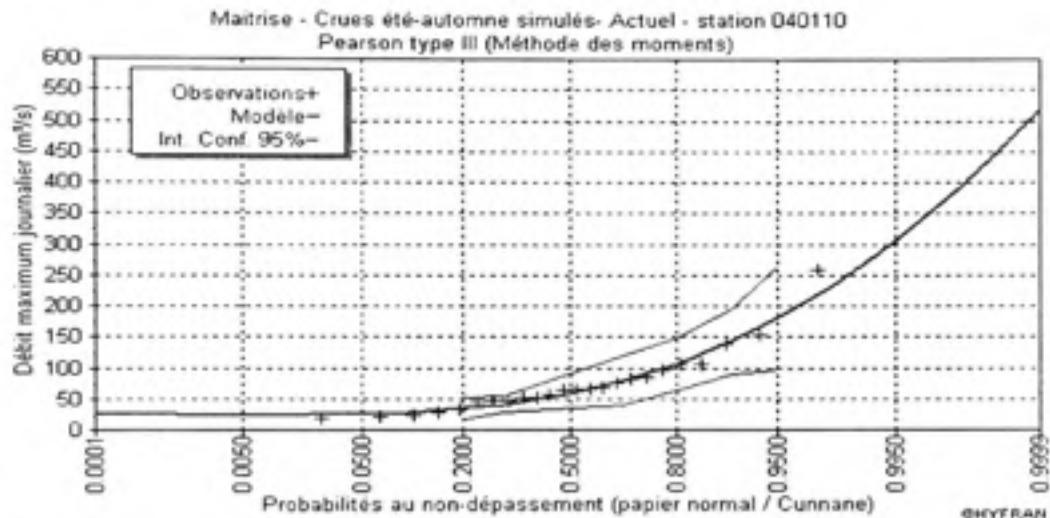
Résultats de l'ajustement

Pearson type III (Méthode des moments)

Nombre d'observations: 24

Paramètres

alpha	0.018088
lambda	0.907509
m	24.45203



Test d'adéquation

Pearson type III(Méthode des moments)

Hypothèses

H0 : L'échantillon provient d'une loi Pearson type III

H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Pearson type III

Résultats

Résultat de la statistique :	$\chi^2 = 4.00$
p-value	$p = 0.2615$
Degrés de liberté	3
Nombre de classes	7

Conclusion

Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5 %

Comparaison des caractéristiques de la loi et de l'échantillon

Pearson type III(Méthode des moments)

	Carac. de la loi	Carac. de l'échantillon
Minimum	24.5	17.9
Maximum	Aucun	260
Moyenne	74.6	74.6
Ecart-type	52.7	52.7
Médiane	57.9	64.1
Coefficient de variation (Cv)	0.706	0.706
Coefficient d'asymétrie (Cs)	2.1	2.1
Coefficient d'aplatissement (Ck)	9.61	6.89

Analyse statistique des débits maximums hivernaux observés
à la station 040110 (Rivière du Nord, Saint-Jérôme) de 1967 à 1990

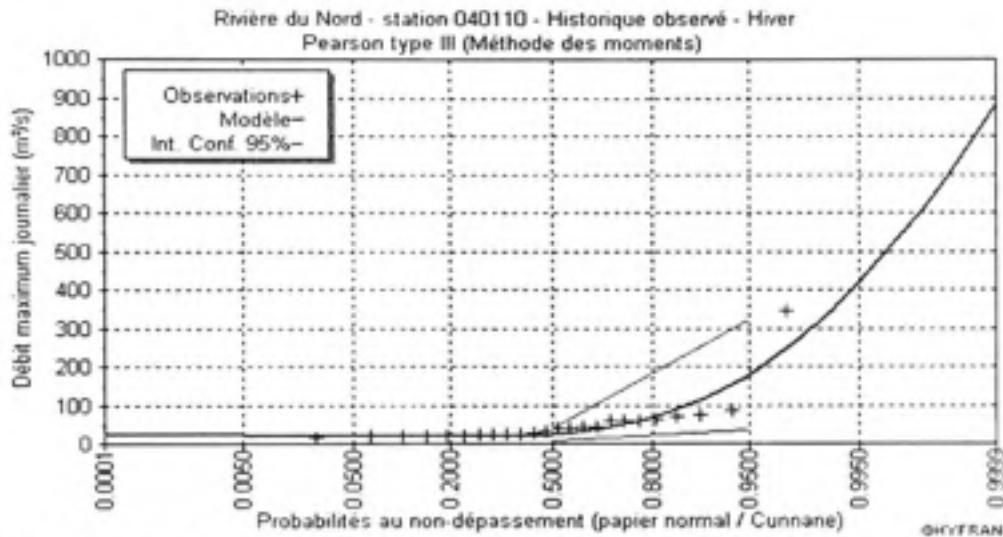
Résultats de l'ajustement

Pearson type III (Méthode des moments)

Nombre d'observations: 24

Paramètres

alpha	0.007329
lambda	0.232886
m	19.991568



Test d'adéquation

Pearson type III(Méthode des moments)

Hypothèses

H0 : L'échantillon provient d'une loi Pearson type III

H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Pearson type III

Résultats

Résultat de la statistique :	$\chi^2 = 9.83$	
p-value	$p = 0.0200$	
Degrés de liberté :		3
Nombre de classes :		7

Conclusion

Nous devons REJETER H0 au niveau de signification de 5 %, mais on l'accepte au niveau de signification de 1 %

Comparaison des caractéristiques de la loi et de l'échantillon

Pearson type III(Méthode des moments)

	Carac. de la loi	Carac. de l'échantillon
Minimum	20	17.6
Maximum	Aucun	345
Moyenne	51.8	51.8
Ecart-type	65.8	65.8
Médiane	24.9	34.2
Coefficient de variation (Cv)	1.27	1.27
Coefficient d'asymétrie (Cs)	4.14	4.14
Coefficient d'aplatissement (Ck)	28.8	16.4

Analyse statistique des débits maximums hivernaux simulés
à la station 040110 (Rivière du Nord, Saint-Jérôme) de 1967 à 1990

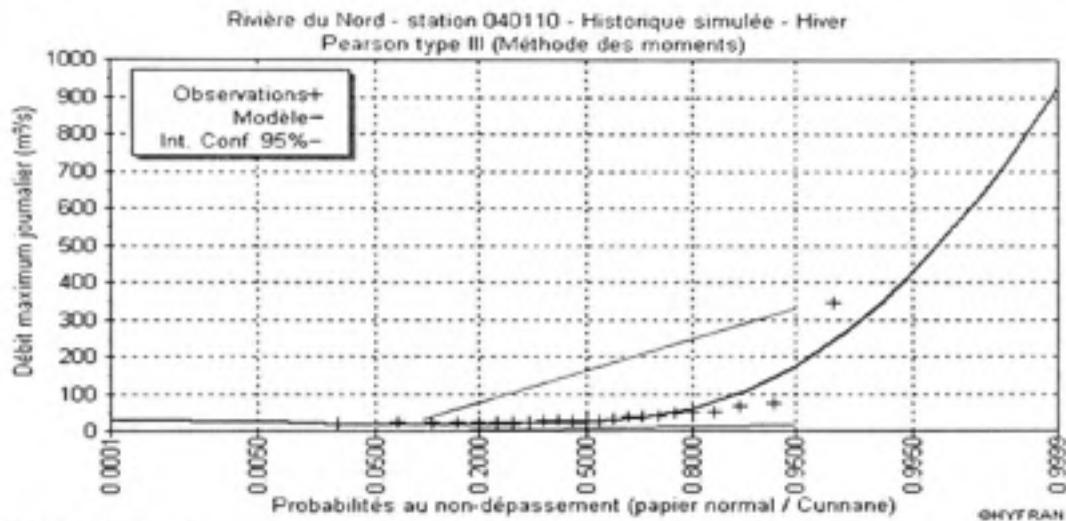
Résultats de l'ajustement

Pearson type III (Méthode des moments)

Nombre d'observations: 23

Paramètres

alpha 0.006792
lambda 0.204974
m 17.944165



Test d'adéquation

Pearson type III(Méthode des moments)

Hypothèses

H0 : L'échantillon provient d'une loi Pearson type III

H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Pearson type III

Résultats

Résultat de la statistique : $\chi^2 = 32.70$

p-value $p = 0.0000$

Degrés de liberté : 3

Nombre de classes : 7

Conclusion

Nous devons REJETER H0 au niveau de signification de 1 %

Comparaison des caractéristiques de la loi et de l'échantillon

Pearson type III(Méthode des moments)

	Carac. de la loi	Carac. de l'échantillon
Minimum	17.9	21.5
Maximum	Aucun	346
Moyenne	48.1	48.1
Ecart-type	66.7	66.7
Médiane	21.7	28.3
Coefficient de variation (Cv)	1.39	1.39
Coefficient d'asymétrie (Cs)	4.42	4.42
Coefficient d'aplatissement (Ck)	32.3	17.4

ANNEXE 4

Habilité des MCG-SEM à reproduire le climat de la période de référence

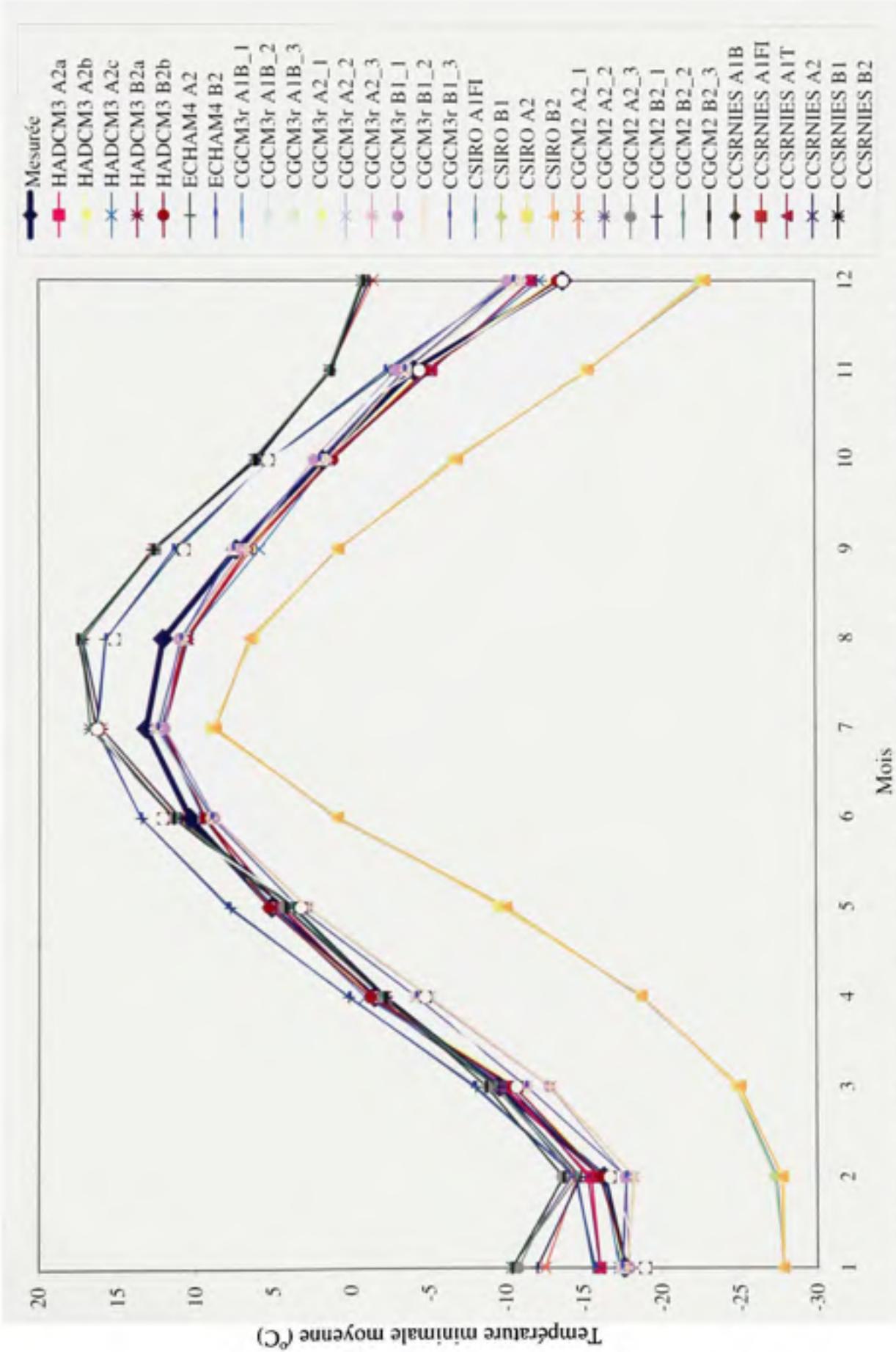


Figure A.4.1 Température minimale moyenne mesurée sur le bassin versant de la rivière du Nord et simulée par les différents MCG-SEM.

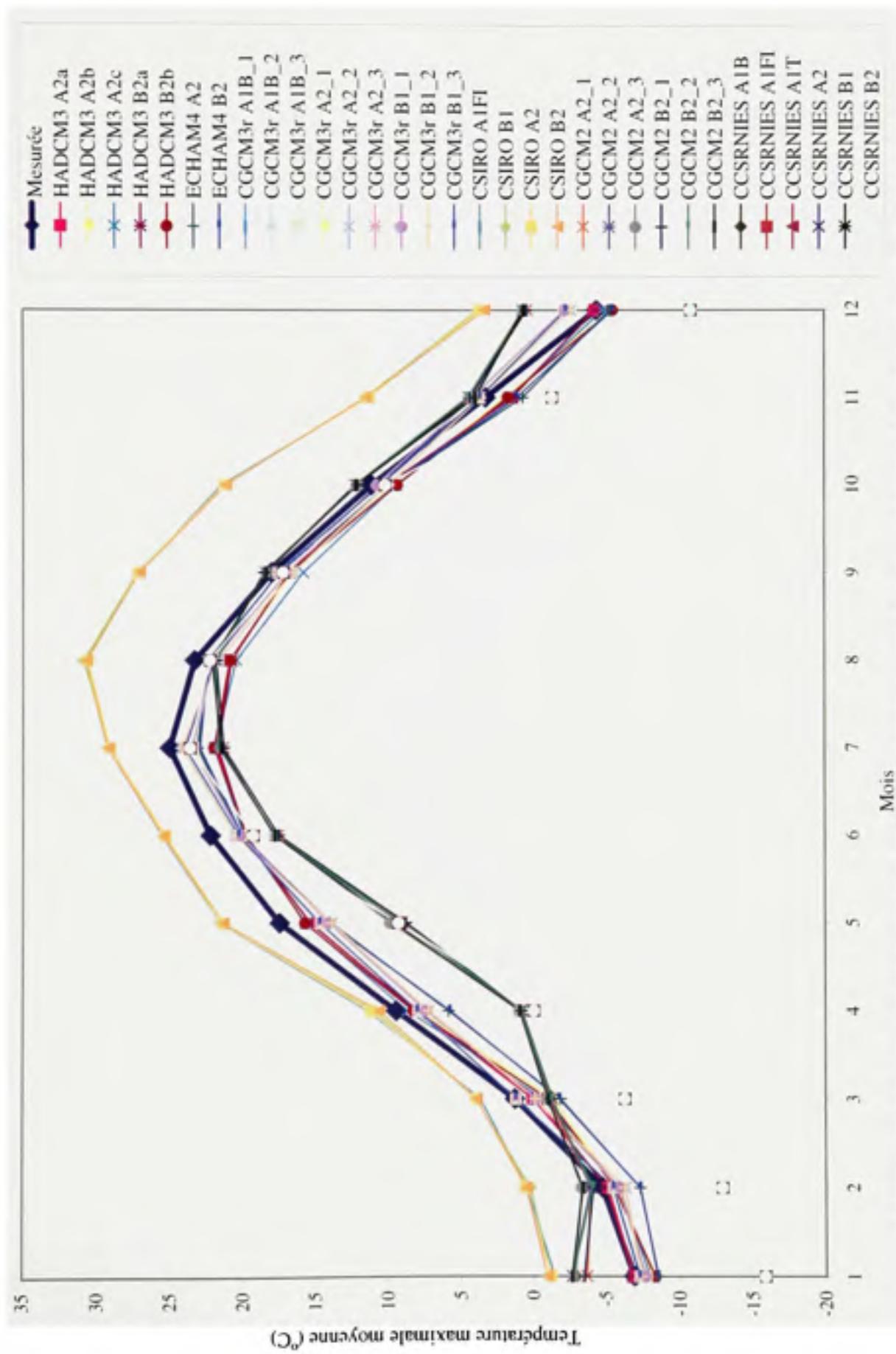


Figure A4.2 Température maximale moyenne mesurée sur le bassin versant de la rivière du Nord et simulée par les différents MCG-SEM.

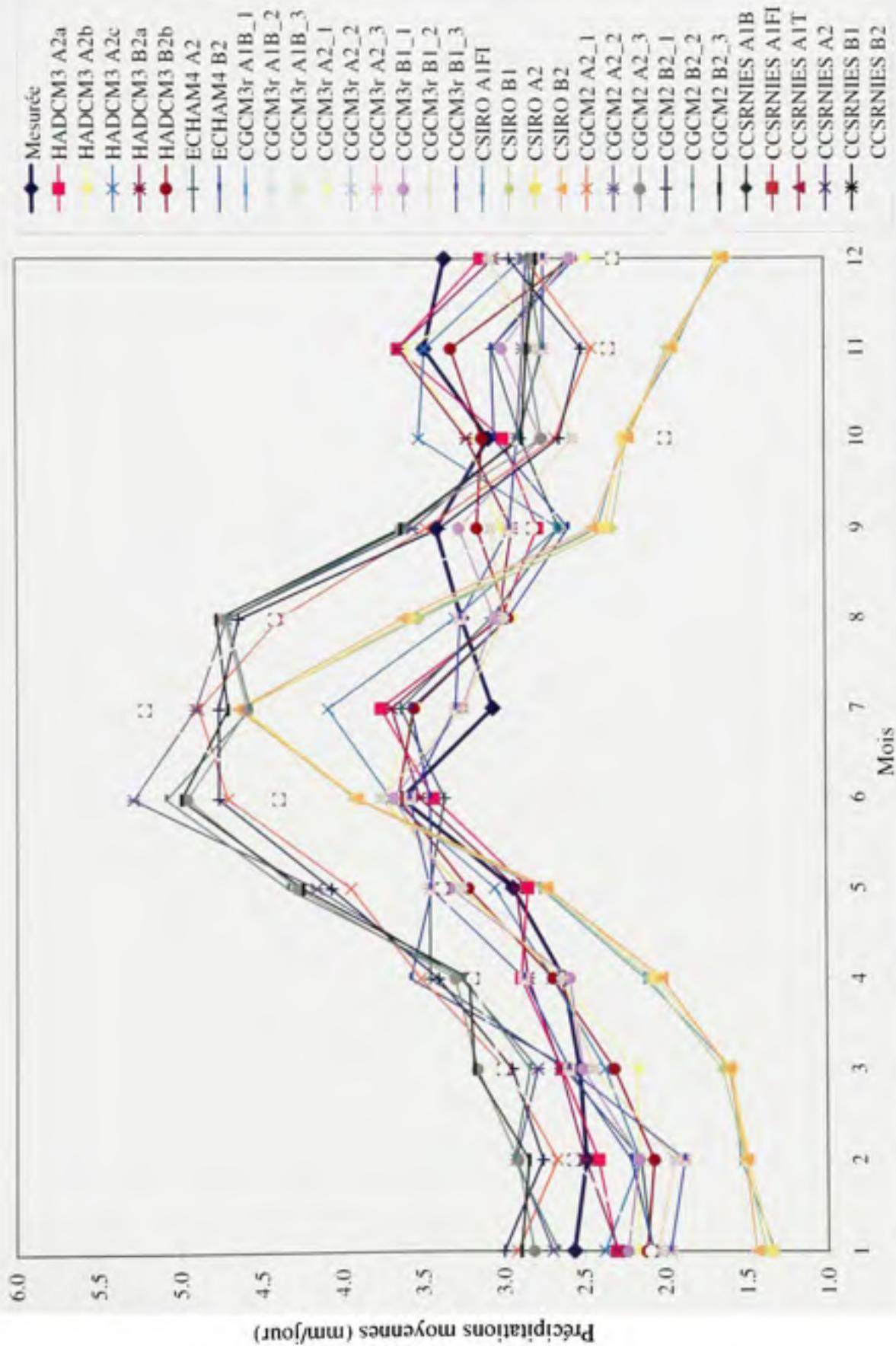


Figure A.4.3 Précipitations moyennes mesurées sur le bassin versant de la rivière du Nord et simulées par les différents MCG-SEM.

Tableau A4.1

Mesure de l'influence des MCG, par le coefficient de Nash-Sutcliffe, sur le régime hydrologique de la rivière du Nord à la station 040110 à la période printanière (mars à avril) par la comparaison entre les débits simulés à partir des données météorologique « observées » et « modifiées MCG »

Année	CGCM3	CGCM3	CGCM3	ECHAM4	ECHAM4	HADCM3	HADCM3
	A1B	A2	B1	A2	B2	A2	B2
1967	-0,20	-0,20	-0,21	0,75	0,74	0,92	0,91
1968	0,51	0,51	0,50	0,84	0,86	0,55	0,55
1969	0,31	0,32	0,31	0,91	0,90	0,96	0,96
1970	0,25	0,25	0,25	0,92	0,91	0,98	0,96
1971	0,02	0,02	0,02	0,93	0,93	0,94	0,93
1972	0,34	0,35	0,34	0,97	0,97	0,92	0,92
1973	0,26	0,27	0,24	0,57	0,73	0,48	0,45
1974	0,68	0,68	0,68	0,92	0,91	0,99	0,99
1975	0,38	0,38	0,38	0,89	0,91	0,88	0,84
1976	0,68	0,68	0,68	0,92	0,93	0,92	0,92
1977	0,43	0,43	0,42	0,81	0,82	0,76	0,73
1978	0,29	0,29	0,29	0,93	0,92	0,94	0,93
1979	0,45	0,46	0,44	0,74	0,74	0,79	0,77
1980	0,61	0,61	0,60	0,95	0,95	0,93	0,93
1981	0,67	0,67	0,67	0,73	0,73	0,87	0,86
1982	0,52	0,52	0,51	0,98	0,98	0,91	0,89
1983	0,45	0,45	0,44	0,72	0,68	0,93	0,92
1984	0,22	0,23	0,22	0,85	0,84	0,84	0,82
1985	0,58	0,58	0,58	0,95	0,95	0,94	0,94
1986	0,38	0,38	0,37	0,69	0,69	0,87	0,85
1987	0,51	0,51	0,50	0,87	0,88	0,83	0,82
1988	0,17	0,17	0,17	0,70	0,67	0,84	0,82
1989	-0,15	-0,14	-0,15	0,83	0,83	0,83	0,80
1990	0,16	0,17	0,15	0,74	0,76	0,65	0,65
Moyenne	0,36	0,36	0,35	0,84	0,84	0,85	0,84

ANNEXE 5

Calcul des deltas

Tableau A5.1

Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord pour l'horizon 2020 par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par CGCM3 pour les scénarios d'émissions B1, A1B et A2.

Mois	B1			A1B			A2		
	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)
Janvier	15,9	1,9	1,6	8,4	1,8	1,3	15,9	2,4	1,8
Février	12,7	1,5	1,2	13,4	2,0	1,4	9,5	1,6	1,0
Mars	5,5	1,0	0,7	6,9	1,2	0,9	5,0	1,9	1,3
Avril	16,5	1,3	0,9	12,6	1,7	1,3	17,8	1,8	1,3
Mai	13,0	1,5	1,4	10,3	1,9	1,8	8,8	1,4	1,4
Juin	1,1	1,3	1,4	-0,4	1,5	1,5	1,0	1,5	1,6
Juillet	-2,8	1,0	1,0	0,5	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0
Août	-4,8	1,1	1,1	-6,2	1,3	1,3	-4,7	1,5	1,6
Septembre	-7,4	1,2	1,3	-2,9	1,4	1,3	-2,8	2,1	2,3
Octobre	-0,4	1,7	1,7	0,5	1,3	1,3	4,5	1,3	1,4
Novembre	16,4	1,0	0,9	20,4	1,5	1,4	12,9	1,5	1,5
Décembre	5,3	0,9	0,7	12,2	1,1	0,7	9,0	1,8	1,3

Tableau A5.2

Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord pour l'horizon 2050 par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par CGCM3 pour les scénarios d'émissions B1, A1B et A2.

Mois	B1			A1B			A2		
	ΔP	ΔT	ΔT	ΔP	ΔT	ΔT	ΔP	ΔT	ΔT
	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
Janvier	13,8	2,7	2,1	29,6	4,3	3,3	24,0	4,4	3,3
Février	26,4	2,6	2,0	18,4	3,9	3,0	29,5	4,2	3,1
Mars	10,4	2,2	1,8	16,4	3,0	2,3	20,6	3,5	2,5
Avril	19,0	2,4	1,8	18,3	3,0	2,3	23,2	3,3	2,3
Mai	13,8	2,3	2,3	14,9	2,9	2,7	15,2	3,2	3,1
Juin	-1,1	2,0	2,1	2,4	2,7	2,7	-2,4	2,7	2,7
Juillet	-5,3	1,8	1,8	-1,0	2,1	2,1	-6,3	2,5	2,5
Août	-4,4	2,4	2,5	-7,5	2,6	2,6	-2,2	2,5	2,7
Septembre	2,4	1,9	2,0	-7,2	2,9	2,9	-3,8	2,6	2,5
Octobre	4,7	2,0	2,0	2,1	2,4	2,4	8,3	2,9	2,9
Novembre	18,4	1,9	1,9	23,5	2,0	1,9	37,1	2,2	2,2
Décembre	12,9	1,8	1,5	19,5	2,8	2,2	17,4	3,2	2,4

Tableau A5.3

Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord pour l'horizon 2080 par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par CGCM3 pour les scénarios d'émissions B1, A1B et A2.

Mois	B1			A1B			A2		
	ΔP	ΔT	ΔT	ΔP	ΔT	ΔT	ΔP	ΔT	ΔT
	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	(%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
Janvier	23,3	4,4	3,6	34,5	5,6	4,2	44,5	6,8	5,3
Février	28,8	3,5	2,7	39,9	5,5	4,3	46,5	6,4	4,9
Mars	13,0	2,9	2,2	16,7	4,3	3,4	28,6	5,3	4,0
Avril	30,1	3,3	2,4	33,0	4,2	3,2	39,6	5,5	4,1
Mai	13,2	2,8	2,8	18,0	4,1	3,9	21,8	4,9	4,8
Juin	0,2	2,3	2,5	-2,4	3,5	3,5	-2,1	4,6	4,6
Juillet	-1,9	2,6	2,6	-4,9	3,3	3,3	-9,3	4,6	4,6
Août	-4,7	2,7	2,7	-4,0	3,5	3,5	-15,5	4,4	4,6
Septembre	-6,3	2,9	3,0	-1,7	3,6	3,5	-8,6	4,7	4,5
Octobre	3,9	3,1	3,1	2,8	3,6	3,6	6,4	4,8	4,9
Novembre	25,2	2,2	2,1	33,1	3,0	2,8	33,8	4,2	4,1
Décembre	17,5	2,6	2,2	27,0	4,0	3,1	25,5	7,2	5,5

Tableau A5.4

Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord pour l'horizon 2020 par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par ECHAM4 pour les scénarios d'émissions B2 et A2.

Mois	B2			A2		
	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)
Janvier	17,7	2,5	1,7	7,7	3,1	2,4
Février	5,9	3,0	2,5	2,9	1,3	1,2
Mars	9,4	1,6	1,4	4,1	1,7	1,6
Avril	-2,9	1,6	1,6	-5,8	1,9	1,7
Mai	-8,3	1,3	1,3	-6,7	1,8	2,1
Juin	-1,3	1,3	1,5	5,4	1,3	1,3
Juillet	3,8	1,7	1,7	-6,5	1,6	1,9
Août	8,4	1,9	1,8	-9,5	2,0	2,5
Septembre	-1,1	1,4	1,5	7,8	2,1	2,3
Octobre	-14,5	1,3	1,4	-10,3	1,3	1,5
Novembre	-8,6	1,9	2,2	2,9	2,2	2,3
Décembre	8,7	3,3	2,4	-6,6	2,4	1,7

Tableau A5.5

Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord pour l'horizon 2050 par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par ECHAM4 pour les scénarios d'émissions B2 et A2.

Mois	B2			A2		
	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)
Janvier	4,6	5,7	2,4	4,1	5,7	3,9
Février	15,4	5,5	4,1	14,5	3,6	2,8
Mars	12,6	4,1	3,6	6,8	2,6	2,4
Avril	-4,0	3,3	3,2	-2,3	3,9	3,8
Mai	4,2	2,2	2,2	-2,7	3,0	3,0
Juin	-4,0	2,2	2,4	0,2	2,6	2,6
Juillet	2,5	3,0	3,2	-3,7	3,0	3,2
Août	-0,6	3,1	3,2	-7,1	3,7	4,2
Septembre	7,1	2,9	3,0	-0,1	3,7	4,1
Octobre	-13,8	2,4	2,6	-4,2	3,1	3,4
Novembre	3,5	3,2	3,3	4,2	3,4	3,7
Décembre	3,0	5,7	3,9	21,4	5,4	4,0

Tableau A5.6

Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord pour l'horizon 2080 par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par ECHAM4 pour les scénarios d'émissions B2 et A2.

Mois	B2			A2		
	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)
Janvier	22,5	7,7	4,9	23,4	9,2	6,2
Février	24,7	6,1	4,7	18,1	7,2	5,2
Mars	20,6	5,0	4,2	13,6	5,2	4,5
Avril	-1,4	4,8	4,7	3,0	5,7	5,5
Mai	-4,9	3,5	3,5	-4,5	4,8	4,9
Juin	-3,9	3,4	3,7	3,2	4,7	4,7
Juillet	3,4	4,2	4,3	2,2	5,1	5,1
Août	-4,1	4,6	5,1	2,2	5,6	5,8
Septembre	-9,4	4,4	4,8	-3,2	5,9	6,1
Octobre	-3,1	3,1	3,4	-4,5	4,5	4,6
Novembre	5,8	4,2	4,3	19,7	5,2	5,2
Décembre	9,5	6,1	4,3	27,5	7,2	5,5

Tableau A5.7

Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord pour l'horizon 2020 par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par HadCM3 pour les scénarios d'émissions B2 et A2.

Mois	B2			A2		
	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)
Janvier	8,4	1,7	1,2	9,1	1,9	1,4
Février	9,8	0,4	0,2	3,5	1,1	0,7
Mars	8,9	1,4	0,8	6,3	1,3	0,6
Avril	8,3	1,4	1,8	7,1	0,9	1,3
Mai	-0,3	1,0	1,5	13,3	1,0	1,2
Juin	7,9	1,3	1,3	5,7	1,2	1,0
Juillet	10,3	1,7	1,7	4,7	1,2	1,3
Août	8,8	1,7	1,7	-2,0	1,5	1,6
Septembre	2,4	1,9	1,9	9,6	1,9	1,9
Octobre	12,5	0,8	1,0	-3,7	0,7	1,2
Novembre	8,8	1,6	1,4	2,7	1,1	1,0
Décembre	9,3	2,2	1,6	0,5	1,1	0,9

Tableau A5.8

Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord pour l'horizon 2050 par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par HadCM3 pour les scénarios d'émissions B2 et A2.

Mois	B2			A2		
	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)
Janvier	11,6	3,0	2,2	15,0	3,2	2,3
Février	8,3	2,1	1,2	15,6	2,5	1,6
Mars	15,6	2,4	1,4	22,9	2,6	1,6
Avril	14,8	1,8	2,4	12,7	1,9	2,6
Mai	8,9	2,1	2,5	9,3	2,4	2,8
Juin	8,5	2,6	2,6	8,6	2,6	2,6
Juillet	9,1	2,6	2,9	9,9	2,8	3,0
Août	7,4	3,1	3,2	3,3	3,1	3,5
Septembre	-6,6	1,9	2,4	13,3	3,2	3,3
Octobre	-0,9	1,5	2,2	5,0	2,2	2,8
Novembre	7,5	2,1	1,9	7,6	2,5	2,3
Décembre	14,2	3,2	2,4	14,3	2,8	2,0

Tableau A5.9

Différentiels climatiques pour le bassin versant de la rivière du Nord pour l'horizon 2080 par rapport à la période 1967-1990 tel que simulé par HadCM3 pour les scénarios d'émissions B2 et A2.

Mois	B2			A2		
	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)	ΔP (%)	ΔT Tmin (°C)	ΔT Tmax (°C)
Janvier	23,7	4,3	3,0	21,1	5,5	4,0
Février	14,6	3,9	2,4	20,4	5,3	3,3
Mars	23,9	3,9	2,4	36,0	5,2	3,8
Avril	18,1	2,7	3,6	22,1	3,8	5,0
Mai	12,3	3,2	3,6	14,5	4,1	4,8
Juin	8,0	3,8	4,0	1,8	4,5	4,9
Juillet	14,6	3,8	4,0	-5,3	5,2	6,4
Août	5,8	4,5	4,9	-3,8	5,7	6,8
Septembre	-5,6	3,8	4,4	5,5	5,5	6,2
Octobre	5,1	3,1	4,0	4,2	4,1	5,0
Novembre	17,1	3,5	3,5	15,3	4,3	4,3
Décembre	21,5	4,5	3,3	24,6	5,1	3,8

ANNEXE 6

Analyses de fréquence des crues futures

A6.1 Période printanière

A6.1.1 Période printanière – CGCM3

Pour les périodes hivernale et printanière, le modèle CGCM3 se démarque des deux autres MCG par une augmentation des précipitations (ΔP) plus importante. En regard des hausses de température (ΔT), il est inférieur à ECHAM4 mais supérieur à HadCM3. Ces particularités du modèle demeurent observables tant pour les scénarios de la famille que pessimistes (A).

Pour les trois SE employés, il appert que les crues moyennes demeurent similaires à celle de la période de référence (1967-1990) et aucune évolution significative n'est remarquée. Une autre tendance remarquable pour les trois SE est le devancement de la date moyenne de la crue, donc des crues plus hâtives.

A6.1.1.1 Période printanière – CGCM3 – B1

Le scénario B1 se caractérise de façon générale par une légère tendance à la baisse de la crue 2 ans, tandis que la crue de récurrence 5 ans semble se maintenir. Toutefois, pour les crues plus importantes, une augmentation des quantiles de crues est observée. Plus la récurrence est importante, plus l'augmentation par rapport au quantile de la période de référence est importante. Par exemple, pour la crue de récurrence 10 ans, l'augmentation est de 4,8% tandis qu'elle est de 20,5% pour la crue de récurrence 100 ans.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs de l'échantillon des crues printanières pour l'horizon 2020 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Pour les horizons 2050 et 2080, les hypothèses d'indépendances et de stationnarité des échantillons sont acceptées à un niveau de signification de 5%, mais de 1% pour l'homogénéité.

Parmi les fonctions de distributions utilisées, celle fournissant le meilleur ajustement est la loi de Pearson type III. Le tableau A6.1 résume les observations pour ce SE.

Tableau A6.1

Évolution des quantiles de crues printaniers à la station 040110 simulés par CGCM3 selon le scénario d'émission B1

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver / ΔP printemps (%)	0	11,3 / 11,6	17,7 / 14,4	23,2 / 18,8
ΔT hiver / ΔT printemps (°C)	0	1,3 / 1,1	2,1 / 2,1	3,2 / 2,7
Crue moyenne (m ³ /s)	199	196	205	202
Écart-type (m ³ /s)	55	48,5	57,8	64,7
Coefficient de variation	0,276	0,247	0,282	0,321
Coefficient d'asymétrie	0,856	2,26	2,34	1,99
Date moyenne de la crue	16 avril	9 avril	6 avril	7 avril
Crue 2 ans	191	180	185	182
Crue 5 ans	242	224	237	241
Crue 10 ans	273	258	279	286
Crue 20 ans	301	294	322	331
Crue 50 ans	336	341	379	390
Crue 100 ans	360	377	424	434

A6.1.1.2 Période printanière – CGCM3 – A1B

Le scénario A1B est plus humide et plus chaud que le scénario B1. Cependant, les mêmes tendances sont observables soit une légère diminution de la crue 2 ans et la crue 5 ans n'évolue presque pas. Parallèlement, une augmentation des quantiles de crue de plus grande récurrence est observée mais celle-ci est moins prononcée que lors du scénario B1.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons des crues printanières pour les horizons 2020 et 2050 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Pour l'horizon 2080, les hypothèses d'indépendance et de

stationnarité des valeurs de l'échantillon sont acceptées à un niveau de signification de 5%, mais de 1% pour l'homogénéité.

Pour les horizons 2020, 2050 et 2080, la fonction de distribution de Pearson type III fournie le meilleur ajustement. Le tableau A6.2 résume les observations pour ce SE.

Tableau A6.2

Évolution des quantiles de crues printaniers à la station 040110 simulés par CGCM3 selon le scénario d'émission A1B

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver / ΔP printemps (%)	0	11,3 / 9,9	22,5 / 16,5	33,8 / 22,6
ΔT hiver / ΔT printemps ($^{\circ}C$)	0	1,4 / 1,5	3,2 / 2,7	4,4 / 3,8
Crue moyenne (m^3/s)	199	196	195	198
Écart-type (m^3/s)	55	50,9	62,5	70,7
Coefficient de variation	0,276	0,26	0,32	0,357
Coefficient d'asymétrie	0,856	2,29	1,5	1,04
Date moyenne de la crue	16 avril	8 avril	4 avril	20 mars
Crue 2 ans	191	178	180	186
Crue 5 ans	242	224	239	251
Crue 10 ans	273	261	279	293
Crue 20 ans	301	298	317	331
Crue 50 ans	336	348	367	379
Crue 100 ans	360	386	404	414

A6.1.1.3 Période printanière – CGCM3 – A2

Le scénario A2 est le plus humide mais également le plus chaud. La principale distinction de ce SE par rapport au deux autres se situe au niveau de l'horizon 2050 puisque les quantiles les plus élevés pour les plus grandes récurrences se produisent à cet horizon. À l'horizon 2080, une baisse des quantiles est observée par rapport à 2050 mais ceux-ci demeure toutefois supérieur à la période de référence.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons des crues printanières pour les horizons 2020 et 2050 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Pour l'horizon 2080, l'hypothèse d'indépendance de l'échantillon est acceptée à un niveau de signification de 5%, mais de 1% pour la stationnarité et l'homogénéité.

Pour les horizons 2020 et 2050, la fonction de distribution de Pearson type III fournit le meilleur ajustement. Pour l'horizon 2080, le meilleur ajustement est fourni avec la loi de distribution GEV. Le tableau A6.3 résume les observations pour ce SE.

Tableau A6.3

Évolution des quantiles de crues printaniers à la station 040110 simulés par CGCM3 selon le scénario d'émission A2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver / ΔP printemps (%)	0	11,5 / 10,6	23,7 / 19,7	38,9 / 30,0
ΔT hiver / ΔT printemps ($^{\circ}C$)	0	1,6 / 1,5	3,4 / 3,0	6,0 / 4,8
Crue moyenne (m^3/s)	199	195	200	195
Écart-type (m^3/s)	55	47,7	69,6	65,1
Coefficient de variation	0,276	0,245	0,348	0,334
Coefficient d'asymétrie	0,856	2,02	1,48	0,65
Date moyenne de la crue	16 avril	5 avril	3 avril	16 mars
Crue 2 ans	191	180	184	188
Crue 5 ans	242	224	249	247
Crue 10 ans	273	257	293	282
Crue 20 ans	301	290	336	314
Crue 50 ans	336	334	391	352
Crue 100 ans	360	367	431	378

A6.1.2 Période printanière – ECHAM4

Le modèle ECHAM4 se démarque des autres MCG puisqu'il est le modèle le plus chaud mais également le plus sec, tant pour les SE optimiste et pessimiste. De façon générale, pour les deux SE utilisés, l'augmentation des températures par rapport à l'augmentation des précipitations fait en sorte de diminuer tout les quantiles de crues par rapport à la période de référence. Pour les deux SE employés, les crues sont de plus en plus hâtives.

A6.1.2.1 Période printanière – ECHAM4 – B2

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs de l'échantillon des crues printanières pour l'horizon 2020 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Pour l'horizon 2050, les hypothèses d'indépendance des valeurs de l'échantillon est acceptée à un niveau de signification de 5%, mais de 1% pour la stationnarité et l'homogénéité. Enfin, pour l'horizon 2080, l'hypothèse selon laquelle les valeurs de l'échantillon sont indépendantes est acceptée à un niveau de signification de 5%, l'hypothèse de stationnarité est acceptée à un niveau de 1% et l'hypothèse d'homogénéité est rejetée. Cette situation peut être causée par le mélange de crues provenant de la fonte de neige et de crues pluviales.

Pour les horizons 2020 et 2080, la fonction de distribution de Pearson type III. Pour l'horizon 2050, le meilleur ajustement est fourni avec la loi de distribution GEV. Le tableau A6.4 résume les observations pour ce SE.

Tableau A6.4

Évolution des quantiles de crues printaniers à la station 040110 simulés par ECHAM4 selon le scénario d'émission B2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver / ΔP printemps (%)	0	10,7 / -0,6	7,6 / 4,2	18,9 / 4,8
ΔT hiver / ΔT printemps (°C)	0	2,6 / 1,5	4,6 / 3,1	5,6 / 4,3
Crue moyenne (m ³ /s)	199	170	145	153
Écart-type (m ³ /s)	55	52,7	64,6	60,2
Coefficient de variation	0,276	0,31	0,445	0,395
Coefficient d'asymétrie	0,856	1,34	0,683	0,783
Date moyenne de la crue	16 avril	3 avril	19 mars	5 mars
Crue 2 ans	191	158	138	145
Crue 5 ans	242	208	196	200
Crue 10 ans	273	241	231	233
Crue 20 ans	301	272	263	263
Crue 50 ans	336	311	301	300
Crue 100 ans	360	340	328	326

A6.1.2.2 Période printanière – ECHAM4 – A2

Ce scénario d'émission est particulièrement intéressant en regard des changements importants qu'il induit au régime des crues. Ainsi, pour les horizons 2020 et 2080 les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons des crues printanières sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Cependant pour l'horizon 2050, l'hypothèse selon laquelle les valeurs de l'échantillon sont indépendantes est acceptée à un niveau de signification de 5%, l'hypothèse de stationnarité est acceptée à un niveau de 1% et l'hypothèse d'homogénéité est rejetée.

Ces changements en regard de l'homogénéité des échantillons semblent indiqués un changement dans les types de crues. Ainsi à l'horizon 2020, les crues sont principalement causées par la fonte des neiges. À l'horizon 2050 un mélange de crues issues de la fonte du couvert nival et de crues pluviales cause la non-homogénéité de l'échantillon. Enfin, à l'horizon 2080 l'homogénéité de l'échantillon est retrouvée possiblement en raison de la prééminence des crues pluviales. Les quantiles de crues de forte récurrence ce cet horizon sont d'ailleurs plus similaire aux quantiles de crues d'été-automne de la période de référence. Enfin la date de la crue moyenne (17 février) semble indiquée que les « hivers » seront bien différents de ceux actuels.

Pour les horizons 2020 et 2080, la fonction de loi de Pearson type III fournit le meilleur ajustement. Pour l'horizon 2050, le meilleur ajustement est fourni par la loi de distribution GEV. Le tableau A6.5 résume les observations pour ce SE.

Tableau A6.5

Évolution des quantiles de crues printaniers à la station 040110 simulés par ECHAM4 selon le scénario d'émission A2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver / ΔP printemps (%)	0	1,4 / -2,8	13,4 / 0,6	23,0 / 4,0
ΔT hiver / ΔT printemps ($^{\circ}C$)	0	2,0 / 1,8	4,2 / 3,1	6,7 / 5,1
Crue moyenne (m^3/s)	199	164	151	139
Écart-type (m^3/s)	55	52	66,4	52,5
Coefficient de variation	0,276	0,318	0,439	0,377
Coefficient d'asymétrie	0,856	1,43	0,849	0,405
Date moyenne de la crue	16 avril	5 avril	26 mars	17 février
Crue 2 ans	191	152	142	135
Crue 5 ans	242	200	203	182
Crue 10 ans	273	233	240	209
Crue 20 ans	301	265	274	232
Crue 50 ans	336	305	316	258
Crue 100 ans	360	335	346	276

A6.1.3 Période printanière – HadCM3

Le modèle HadCM3 se caractérise par des précipitations plus importantes qu'ECHAM4 mais inférieures à CGCM3. L'augmentation des températures est moins importante qu'ECHAM4, mais assez similaire à CGCM3.

Pour les deux SE employés, il appert que les crues moyennes diminuent légèrement par rapport à la période de référence. Comme pour les autres MCG, le devancement de la date moyenne de la crue est observé.

A6.1.3.1 Période printanière – HadCM3 – B2

Le SE B2 se caractérise par une baisse de tous les quantiles de crues à l’horizon 2020 par rapport à la période de référence. Par la suite, mis-à-part pour les crues de récurrence 2 et 5 ans, les quantiles de crues augmentent et dépassent ceux de la période de référence à l’horizon 2080.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues printanières pour les horizons 2020 et 2050 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Pour l’horizon 2080, les hypothèses d’indépendances et de stationnarité des échantillons sont acceptées à un niveau de signification de 5%, mais de 1% pour l’homogénéité.

Parmi les fonctions de distributions utilisées, celle fournissant le meilleur ajustement est la loi de Pearson type III pour les 3 horizons considérés. Le tableau A6.6 résume les observations pour ce scénario d’émission.

Tableau A6.6

Évolution des quantiles de crues printaniers à la station 040110 simulés par HADCM3 selon le scénario d'émission B2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver / ΔP printemps (%)	0	9,2 / 5,6	11,4 / 13,1	19,9 / 18,1
ΔT hiver / ΔT printemps (°C)	0	1,2 / 1,3	2,4 / 2,1	3,6 / 3,2
Crue moyenne (m ³ /s)	199	189	190	188
Écart-type (m ³ /s)	55	44,5	53,4	70,7
Coefficient de variation	0,276	0,235	0,281	0,375
Coefficient d'asymétrie	0,856	1,89	1,51	0,917
Date moyenne de la crue	16 avril	6 avril	7 avril	3 avril
Crue 2 ans	191	176	178	178
Crue 5 ans	242	217	227	243
Crue 10 ans	273	248	262	283
Crue 20 ans	301	278	295	320
Crue 50 ans	336	318	337	366
Crue 100 ans	360	347	369	398

A6.1.3.2 Période printanière – HadCM3 – A2

Le SE A2 se caractérise par une baisse de tous les quantiles de crues à l'horizon 2020 par rapport à la période de référence. Par la suite, mis-à-part pour les crues de récurrence 2 et 5 ans, les quantiles de crues augmentent et dépassent ceux de la période de référence dès l'horizon 2050.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues printanières pour les horizons 2020 et 2050 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Pour l'horizon 2080, l'hypothèse d'indépendance des valeurs

des échantillons de crues printanières est acceptée à un niveau de signification de 5% et les hypothèses de stationnarité et d'homogénéité des échantillons sont acceptées à un niveau de signification de 1%.

Parmi les fonctions de distributions utilisées, celle fournissant le meilleur ajustement est la loi de Pearson type III pour les 3 horizons considérés. Le tableau A6.7 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.7

Évolution des quantiles de crues printaniers à la station 040110 simulés par HADCM3 selon le scénario d'émission A2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver / ΔP printemps (%)	0	4,3 / 8,9	15,0 / 15,0	22,0 / 24,2
ΔT hiver / ΔT printemps (°C)	0	1,2 / 1,1	2,4 / 2,3	4,5 / 4,4
Crue moyenne (m ³ /s)	199	184	197	181
Écart-type (m ³ /s)	55	43,4	60,3	77,1
Coefficient de variation	0,276	0,236	0,306	0,427
Coefficient d'asymétrie	0,856	2,07	1,43	0,831
Date moyenne de la crue	16 avril	9 avril	6 avril	24 mars
Crue 2 ans	191	170	183	170
Crue 5 ans	242	210	239	241
Crue 10 ans	273	240	277	284
Crue 20 ans	301	271	314	323
Crue 50 ans	336	311	361	371
Crue 100 ans	360	342	395	405

A6.2 Période été-automne

A6.2.1 Période été-automne – Modèle CGCM3

Pour les trois SE, le modèle CGCM3 se caractérise par des baisses de précipitations durant l'été et des hausses pour l'automne. Les hausses de températures sont cependant relativement similaires pour les deux saisons.

A6.2.1.1 Période été-automne – Modèle CGCM3 – B1

Le SE B1 est marqué par une tendance à la baisse de la crue moyenne, mais en même temps une hausse de la crue 2 ans est observée. Toutefois, les quantiles de crues de plus fortes récurrences diminuent.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues d'été-automne pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Parmi les fonctions de distributions utilisées, celle fournissant le meilleur ajustement est la loi de Pearson type III pour les horizons 2020 et 2050. Pour l'horizon 2080, le meilleur ajustement est obtenu par la loi GEV. Le tableau A6.8 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.8

Évolution des quantiles de crues d'été-automne à la station 040110 simulés par CGCM3 selon le scénario d'émission B1

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP été/ ΔP automne (%)	0	-2,2 / 2,9	-3,6 / 8,5	-2,2 / 7,6
ΔT été / ΔT automne (°C)	0	1,1 / 1,3	2,1 / 2,0	2,6 / 2,7
Crue moyenne (m ³ /s)	74,6	62,7	67,9	68,5
Écart-type (m ³ /s)	52,7	42,5	42,7	40,9
Coefficient de variation	0,706	0,679	0,63	0,598
Coefficient d'asymétrie	2,1	1,53	1,29	0,972
Crue 2 ans	57,9	52,3	58,9	62,4
Crue 5 ans	106	91,9	98,7	98,9
Crue 10 ans	143	119	125	122
Crue 20 ans	180	146	150	144
Crue 50 ans	230	180	182	172
Crue 100 ans	267	205	205	193

A6.2.1.2 Période été-automne – Modèle CGCM3 – A1B

Le scénario d'émission A1B est marqué par une tendance à la baisse de la crue moyenne à l'horizon 2050 mais à une remontée à l'horizon 2080. Parallèlement, une tendance à la hausse est observée pour les crues de faible récurrence. Toutefois, les quantiles de crues de plus fortes récurrences diminuent.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues d'été-automne pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Pour les trois horizons, la loi fournissant le meilleur ajustement est celle de Pearson type III. Le tableau A6.9 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.9

Évolution des quantiles de crues d'été-automne à la station 040110 simulés par CGCM3 selon le scénario d'émission A1B

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP été/ ΔP automne (%)	0	-2,0 / 6,0	-2,1 / 6,1	-3,8 / 11,4
ΔT été / ΔT automne (°C)	0	1,3 / 1,4	2,5 / 2,4	3,5 / 3,4
Crue moyenne (m ³ /s)	74,6	68,1	69,6	79,9
Écart-type (m ³ /s)	52,7	45,5	41,2	44,1
Coefficient de variation	0,706	0,667	0,592	0,552
Coefficient d'asymétrie	2,1	1,51	0,904	0,722
Crue 2 ans	57,9	57,1	63,5	74,7
Crue 5 ans	106	99,5	101	115
Crue 10 ans	143	129	125	139
Crue 20 ans	180	157	146	160
Crue 50 ans	230	193	173	186
Crue 100 ans	267	220	192	205

A6.2.1.3 Période été-automne – Modèle CGCM3 – A2

Le scénario d'émission A2 est marqué par une tendance à la hausse de la crue moyenne à l'horizon 2050 mais à une remontée à l'horizon 2080. Parallèlement, une tendance à la hausse est observée pour les crues de faible récurrence. Comme pour les autres SE, les quantiles de crues de plus fortes récurrences diminuent.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues d'été-automne pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Pour les horizons 2020 et 2050, la loi fournissant le meilleur ajustement est celle de Pearson type III. Pour l'horizon 2080, la loi de GEV fournit le meilleur ajustement. Le tableau A6.10 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.10

Évolution des quantiles de crues d'été-automne à la station 040110 simulés par CGCM3 selon le scénario d'émission A2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP été/ ΔP automne (%)	0	-0,9 / 4,9	-3,6 / 13,9	-9,0 / 10,5
ΔT été / ΔT automne (°C)	0	1,4 / 1,7	2,6 / 2,6	4,5 / 4,5
Crue moyenne (m ³ /s)	74,6	66,6	79,3	78,9
Écart-type (m ³ /s)	52,7	42	47,2	37,5
Coefficient de variation	0,706	0,631	0,595	0,475
Coefficient d'asymétrie	2,1	1,38	1,12	0,054
Crue 2 ans	57,9	57,2	70,6	78,3
Crue 5 ans	106	96,3	114	111
Crue 10 ans	143	123	143	128
Crue 20 ans	180	148	169	142
Crue 50 ans	230	180	202	156
Crue 100 ans	267	203	226	165

A6.2.2 Période été-automne – Modèle ECHAM4

Pour cette période de l'année, ECHAM4 se remarque par une hausse des températures plus importante que le modèle CGCM3. Par ailleurs, les précipitations prévues sont moins importantes comparativement aux deux autres MCG.

A6.2.2.1 Période été-automne – Modèle ECHAM4 – B2

Le scénario d'émission B2 est marqué par une tendance à la baisse de la crue moyenne. Par ailleurs, une tendance à la baisse est observée pour tous les quantiles de crues. Les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues d'été-automne pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Pour les horizons 2020 et 2050, la loi fournissant le meilleur ajustement est celle de Pearson type III. Pour l'horizon 2080, la loi GEV fourni le meilleur ajustement. Le tableau A6.11 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.11

Évolution des quantiles de crues d'été-automne à la station 040110 simulés par ECHAM4 selon le scénario d'émission B2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP été/ ΔP automne (%)	0	3,6 / -8,1	-0,7 / -1,1	-1,5 / -2,2
ΔT été / ΔT automne (°C)	0	1,7 / 1,6	2,9 / 2,9	4,2 / 4,0
Crue moyenne (m ³ /s)	74,6	61,5	60,5	51,9
Écart-type (m ³ /s)	52,7	39,6	33,5	27,4
Coefficient de variation	0,706	0,645	0,553	0,527
Coefficient d'asymétrie	2,1	2,05	1,42	0,635
Crue 2 ans	57,9	49,1	52,8	48,8
Crue 5 ans	106	85,3	84	73,5
Crue 10 ans	143	113	105	88,4
Crue 20 ans	180	141	125	102
Crue 50 ans	230	177	151	117
Crue 100 ans	267	205	170	128

A6.2.2.2 Période été-automne – Modèle ECHAM4 – A2

Le scénario d'émission A2 est marqué par une tendance à la baisse de la crue moyenne, bien qu'une tendance à la hausse soit observée pour la crue de récurrence 2 ans. Parallèlement, pour tous les quantiles de crues de récurrence supérieure une tendance à la baisse est observée.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues d'été-automne pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Pour les horizons 2020 et 2050, la loi fournissant le meilleur ajustement est celle de Pearson type III. Pour l'horizon 2080, la loi GEV fourni le meilleur ajustement. Le tableau A6.12 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.12

Évolution des quantiles de crues d'été-automne à la station 040110 simulés par ECHAM4 selon le scénario d'émission A2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP été/ ΔP automne (%)	0	-3,5 / 0,1	-3,5 / 0,0	2,6 / 4,0
ΔT été / ΔT automne (°C)	0	1,8 / 2,0	3,2 / 3,6	5,2 / 5,3
Crue moyenne (m ³ /s)	74,6	53,7	61	69,6
Écart-type (m ³ /s)	52,7	34,8	32	36
Coefficient de variation	0,706	0,648	0,526	0,518
Coefficient d'asymétrie	2,1	2,03	0,788	0,389
Crue 2 ans	57,9	42,9	56,8	66,9
Crue 5 ans	106	74,7	86	99,4
Crue 10 ans	143	98,9	104	118
Crue 20 ans	180	123	120	134
Crue 50 ans	230	155	139	151
Crue 100 ans	267	180	153	163

A6.2.3 Période été-automne – Modèle HadCM3

Pour cette période de l'année, le modèle HadCM3 est de façon générale le plus humide des trois MCG employés, puisque celui-ci suggère une hausse des précipitations tant pour l'été que l'automne. En regard des hausses de températures, celui-ci est en général plus chaud que CGCM3 mais plus froid qu'ECHAM4.

A6.2.3.1 Période été-automne – Modèle HadCM3 – B2

Le SE B2 se caractérise par une tendance à la baisse de la crue moyenne, mais parallèlement une tendance à la hausse de la crue de récurrence 2 ans est observée. Pour les crues de plus fortes récurrences, une tendance à la baisse est observée.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues d'été-automne pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Pour les horizons 2020 et 2050, la loi fournissant le meilleur ajustement est celle de Pearson type III. Pour l'horizon 2080, la loi GEV fourni le meilleur ajustement. Le tableau A6.13 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.13

Évolution des quantiles de crues d'été-automne à la station 040110 simulés par HadCM3 selon le scénario d'émission B2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP été/ ΔP automne (%)	0	9,0 / 7,9	8,3 / 0,0	9,5 / 5,6
ΔT été / ΔT automne (°C)	0	1,6 / 1,4	2,9 / 2,0	4,2 / 3,7
Crue moyenne (m ³ /s)	74,6	76,7	65,4	69
Écart-type (m ³ /s)	52,7	46	38	36,3
Coefficient de variation	0,706	0,6	0,581	0,525
Coefficient d'asymétrie	2,1	1,56	0,929	0,613
Crue 2 ans	57,9	65,2	59,6	65,1
Crue 5 ans	106	108	94,5	97,9
Crue 10 ans	143	138	116	117
Crue 20 ans	180	167	136	135
Crue 50 ans	230	204	161	156
Crue 100 ans	267	232	178	170

A6.2.3.2 Période été-automne – Modèle HadCM3 – A2

Le SE A2 se caractérise par une tendance à la baisse de la crue moyenne, ainsi que de tous les quantiles de crues. Les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues d'été-automne pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Pour les horizons 2020 et 2050, la loi fournissant le meilleur ajustement est celle de Pearson type III. Pour l'horizon 2080, la loi GEV fourni le meilleur ajustement. Le tableau A6.14 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.14

Évolution des quantiles de crues d'été-automne à la station 040110 simulés par HadCM3 selon le scénario d'émission A2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP été / ΔP automne (%)	0	2,8 / 2,9	7,3 / 8,6	-2,5 / 8,4
ΔT été / ΔT automne (°C)	0	1,3 / 1,3	2,9 / 2,7	5,6 / 4,9
Crue moyenne (m ³ /s)	74,6	65,1	70,8	55,3
Écart-type (m ³ /s)	52,7	47,6	45,2	31,7
Coefficient de variation	0,706	0,732	0,639	0,573
Coefficient d'asymétrie	2,1	2,19	1,66	1,26
Crue 2 ans	57,9	49,5	58,9	48,8
Crue 5 ans	106	92,5	101	78,2
Crue 10 ans	143	126	131	97,7
Crue 20 ans	180	161	160	116
Crue 50 ans	230	206	197	139
Crue 100 ans	267	241	226	156

A6.3 Période hivernale

A6.3.1 Période hivernale – Modèle CGCM3

Tel que mentionné à la section portant sur la période printanière, parmi les trois MCG employés, le modèle CGCM3 est celui induisant les plus importantes précipitations durant la période hivernale. En regard aux températures, ce modèle prévoit des hausses plus importantes que HadCM3 mais inférieure à ECHAM4.

Pour les trois SE disponibles une hausse de la crue moyenne est observée. Pour tous les quantiles de crues une tendance à la hausse est également observée, notamment pour les plus faibles récurrences.

A6.3.1.1 Période hivernale – Modèle CGCM3 – B1

Pour le SE B1, les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues hivernales pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Pour l'horizon 2020, la loi fournissant le meilleur ajustement est celle de Pearson type III. Pour l'horizon 2050, toutes les lois de distribution employées fournissent un mauvais ajustement puisqu'elles échouent le test du Khi-Carré. La loi lognormale à trois paramètres est toutefois retenue car elle fournit le meilleur ajustement en regard des paramètres employés. Pour l'horizon 2080, la loi lognormale à trois paramètres fournit le meilleur ajustement. Le tableau A6.15 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.15

Évolution des quantiles de crues hivernales à la station 040110 simulés par CGCM3 selon le scénario d'émission B1

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver (%)	0	11,3	17,7	23,2
ΔT hiver ($^{\circ}C$)	0	1,3	2,1	3,2
Crue moyenne (m^3/s)	48,1	56,0	68,8	85,9
Écart-type (m^3/s)	66,7	72,3	81,1	79,3
Coefficient de variation	1,39	1,29	1,18	0,924
Coefficient d'asymétrie	4,42	4,25	3,92	3,42
Crue 2 ans	21,7	26,8	45,1	63,3
Crue 5 ans	58,5	69,1	104	123
Crue 10 ans	109	125	155	174
Crue 20 ans	173	192	214	230
Crue 50 ans	268	294	305	317
Crue 100 ans	346	376	385	391

A6.3.1.2 Période hivernale – Modèle CGCM3 – A1B

Pour le SE A1B, les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues hivernales pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Pour l'horizon 2020, la loi fournissant le meilleur ajustement est celle de Pearson type III. Pour les horizons 2050 et 2080, la loi lognormale à trois paramètres fournit le meilleur ajustement. Le tableau A6.16 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.16

Évolution des quantiles de crues hivernales à la station 040110 simulés par CGCM3 selon le scénario d'émission A1B

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver (%)	0	11,3	22,5	33,8
ΔT hiver (°C)	0	1,4	3,2	4,4
Crue moyenne (m ³ /s)	48,1	60,6	85,3	120
Écart-type (m ³ /s)	66,7	74,1	72,7	73,1
Coefficient de variation	1,39	1,22	0,85	0,61
Coefficient d'asymétrie	4,42	4,07	3,12	1,85
Crue 2 ans	21,7	30,2	65,1	98,9
Crue 5 ans	58,5	76,4	121	166
Crue 10 ans	109	134	168	216
Crue 20 ans	173	202	219	265
Crue 50 ans	268	304	296	330
Crue 100 ans	346	386	362	378

A6.3.1.3 Période hivernale – Modèle CGCM3 – A2

Pour le SE A2, les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues hivernales pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Pour l'horizon 2020, toutes les lois de distribution employées fournissent un mauvais ajustement puisqu'elles échouent le test du Khi-Carré. La loi de Pearson type III est toutefois retenue car elle fourni le meilleur ajustement. Pour l'horizon 2050, la loi lognormale à trois paramètres fournit le meilleur ajustement. Enfin, pour l'horizon 2080 la loi de Pearson type III fournit le meilleur ajustement. Le tableau A6.17 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.17

Évolution des quantiles de crues hivernales à la station 040110 simulés par CGCM3 selon le scénario d'émission A2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver (%)	0	11,5	23,7	38,9
ΔT hiver ($^{\circ}C$)	0	1,6	3,4	6,0
Crue moyenne (m^3/s)	48,1	60,8	91,5	139
Écart-type (m^3/s)	66,7	69,3	76,1	65,5
Coefficient de variation	1,39	1,14	0,832	0,472
Coefficient d'asymétrie	4,42	4	3,15	1,53
Crue 2 ans	21,7	32,3	70,2	123
Crue 5 ans	58,5	76,5	129	184
Crue 10 ans	109	130	178	226
Crue 20 ans	173	194	232	267
Crue 50 ans	268	288	312	319
Crue 100 ans	346	364	381	358

A6.3.2 Période hivernale – Modèle ECHAM4

Tel que mentionné à la section portant sur période printanière, parmi les trois MCG employés, ECHAM4 est celui induisant les plus importantes hausses de température durant la période hivernale. En regard aux précipitations, ce modèle prévoit les plus faibles hausses des MCG utilisés.

Pour les deux SE disponibles une hausse des crues moyennes est observée. Pour les quantiles de crues, une tendance à la hausse est également observée pour les faibles récurrences mais une baisse est observée pour les plus fortes (50 et 100 ans).

A6.3.2.1 Période hivernale – Modèle ECHAM4 – B2

Pour le SE B2, les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues hivernales pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Pour l'horizon 2020, toutes les lois de distribution employées fournissent un mauvais ajustement puisqu'elles échouent le test du Khi-Carré. La loi de Pearson type III est toutefois retenue car elle fournit le meilleur ajustement. Pour les horizons 2050 et 2080, la loi de Pearson type III fournit le meilleur ajustement. Le tableau A6.18 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.18

Évolution des quantiles de crues hivernales à la station 040110 simulés par ECHAM4 selon le scénario d'émission B2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver (%)	0	10,7	7,6	18,9
ΔT hiver (°C)	0	2,6	4,6	5,6
Crue moyenne (m ³ /s)	48,1	62,4	84	112
Écart-type (m ³ /s)	66,7	65,7	52,4	54,6
Coefficient de variation	1,39	1,05	0,624	0,49
Coefficient d'asymétrie	4,42	3,54	2,27	1,42
Crue 2 ans	21,7	35,3	66,4	99,1
Crue 5 ans	58,5	83	113	150
Crue 10 ans	109	134	151	185
Crue 20 ans	173	192	189	218
Crue 50 ans	268	275	241	260
Crue 100 ans	346	341	280	291

A6.3.2.2 Période hivernale – Modèle ECHAM4 – A2

Pour le SE A2, les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues hivernales pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Pour l'horizon 2020, toutes les lois de distribution employées fournissent un mauvais ajustement puisqu'elles échouent le test du Khi-Carré. La loi de Pearson type III est toutefois retenue car elle fournit le meilleur ajustement. Pour les horizons 2050 et 2080, la loi lognormale à trois paramètres fournit le meilleur ajustement. Le tableau A6.19 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.19

Évolution des quantiles de crues hivernales à la station 040110 simulés par ECHAM4 selon le scénario d'émission A2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver (%)	0	1,4	13,4	23,0
ΔT hiver (°C)	0	2,0	4,2	6,7
Crue moyenne (m ³ /s)	48,1	54,3	81,2	121
Écart-type (m ³ /s)	66,7	62,2	57,1	47,5
Coefficient de variation	1,39	1,15	0,703	0,391
Coefficient d'asymétrie	4,42	4,14	2,67	1,01
Crue 2 ans	21,7	28,9	66	114
Crue 5 ans	58,5	66,9	112	157
Crue 10 ans	109	115	149	184
Crue 20 ans	173	173	188	209
Crue 50 ans	268	259	245	242
Crue 100 ans	346	328	293	266

A6.3.3 Période hivernale – Modèle Hadcm3

Parmi les trois MCG employés, le modèle HadCM3 est celui induisant les plus importantes hausses de températures durant la période hivernale. En regard aux précipitations, le modèle en général supérieur à ECHAM4, mais inférieur à CGCM3.

A6.3.3.1 Période hivernale – Modèle Hadcm3 – B2

Pour le scénario d'émission B2, une tendance à la hausse est observée pour la crue moyenne. Par ailleurs, une hausse des quantiles est observée pour les crues de plus faibles récurrences mais une diminution est notée pour les plus fortes (50 et 100 ans).

Pour ce SE, les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues hivernales pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Pour l'horizon 2020, toutes les lois de distribution employées fournissent un mauvais ajustement puisqu'elles échouent le test du Khi-Carré. La loi de Pearson type III est toutefois retenue car elle fournit le meilleur ajustement. Pour les horizons 2050 et 2080, la loi lognormale à trois paramètres fournit le meilleur ajustement. Le tableau A6.20 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.20

Évolution des quantiles de crues hivernales à la station 040110 simulés par HadCM3 selon le scénario d'émission B2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver (%)	0	9,2	11,4	19,9
ΔT hiver (°C)	0	1,2	2,4	3,6
Crue moyenne (m^3/s)	48,1	59,2	65,9	81,5
Écart-type (m^3/s)	66,7	65,3	68,8	63
Coefficient de variation	1,39	1,1	1,04	0,772
Coefficient d'asymétrie	4,42	4,02	3,59	2,88
Crue 2 ans	21,7	32,3	46,1	64,3
Crue 5 ans	58,5	73,8	97,2	114
Crue 10 ans	109	124	141	154
Crue 20 ans	173	185	190	198
Crue 50 ans	268	273	266	263
Crue 100 ans	346	345	332	318

A6.3.3.2 Période hivernale – Modèle Hadcm3 – A2

Pour le scénario d'émission A2, une tendance à la hausse est observée pour la crue moyenne. Par ailleurs, une hausse des quantiles de crues est observée pour les crues de plus faibles récurrences mais une diminution est notée pour la crue de récurrence 100 ans.

Pour ce SE, les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons de crues hivernales pour les horizons 2020, 2050 et 2080 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%.

Pour les horizons 2020 et 2080, la loi de Pearson type III est retenue car elle fournit le meilleur ajustement. Pour l'horizon 2050, la loi lognormale à trois paramètres fournit le meilleur ajustement. Le tableau A6.21 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.21
Évolution des quantiles de crues hivernales à la station 040110 simulés par HadCM3 selon le scénario d'émission A2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP hiver (%)	0	4,3	15,0	22,0
ΔT hiver (°C)	0	1,2	2,4	4,5
Crue moyenne (m ³ /s)	48,1	51,3	69,7	92
Écart-type (m ³ /s)	66,7	64,7	73,2	61,1
Coefficient de variation	1,39	1,26	1,05	0,665
Coefficient d'asymétrie	4,42	4,3	3,68	2,07
Crue 2 ans	21,7	25,3	48,6	72,7
Crue 5 ans	58,5	62,6	103	129
Crue 10 ans	109	112	149	171
Crue 20 ans	173	173	202	214
Crue 50 ans	268	264	283	271
Crue 100 ans	346	339	353	315

A6.4 Période annuelle

A6.4.1 Période annuelle – Modèle CGCM3

Parmi les trois MCG employés, le modèle CGCM3 est celui induisant les plus importantes précipitations durant les périodes hivernale et printanière. Par conséquent, les plus importantes crues annuelles demeurent essentiellement printanières. Même si les quantiles de crues sont légèrement supérieurs, les tendances observées pour les crues annuelles sont similaires à celles observées pour les crues printanières.

A6.4.1.1 Période annuelle – Modèle CGCM3 – B1

Pour ce SE, aucune évolution significative de la crue moyenne n'est observée. Parallèlement une légère diminution des crues de faible récurrence est observée mais pour les quantiles de crues de plus fortes récurrences, une hausse est notée.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs de l'échantillon de crues annuelles pour l'horizon 2020 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Pour les horizons 2050 et 2080, les hypothèses d'indépendance et de stationnarité sont acceptées à un niveau de signification de 5% alors que l'hypothèse d'homogénéité est acceptée à 1%.

Pour les horizons 2020 et 2080, la loi de Pearson type III est retenue car elle fournit le meilleur ajustement. Pour l'horizon 2050, la loi lognormale à trois paramètres fournit le meilleur ajustement. Le tableau A6.22 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.22

Évolution des quantiles de crues annuelles à la station 040110 simulés par CGCM3 selon le scénario d'émission B1

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP annuelle (%)	0	5,9	9,3	11,9
ΔT annuelle (°C)	0	1,2	2,1	2,8
Crue moyenne (m ³ /s)	206	198	206	202
Écart-type (m ³ /s)	51,9	46,8	57,5	64,7
Coefficient de variation	0,252	0,237	0,279	0,321
Coefficient d'asymétrie	1,034	2,5	2,37	1,99
Crue 2 ans	197	181	191	182
Crue 5 ans	245	222	239	241
Crue 10 ans	276	257	275	286
Crue 20 ans	304	292	314	331
Crue 50 ans	339	341	369	390
Crue 100 ans	364	378	415	434

A6.4.1.2 Période annuelle – Modèle CGCM3 –A1B

Pour le SE A1B, une légère évolution à la baisse de la crue moyenne est observée. Parallèlement une légère diminution de la crue 2 ans est envisagée mais pour les quantiles de crues de plus fortes récurrences, une hausse est observée.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs de l'échantillon de crues annuelles pour les horizons 2020 et 2050 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Pour l'horizon 2080, les hypothèses d'indépendance et de stationnarité sont acceptées à un niveau de signification de 5% alors que l'hypothèse d'homogénéité est acceptée à 1%.

Pour les trois horizons, la loi de Pearson type III est retenue car elle fournit le meilleur ajustement. Le tableau A6.23 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.23

Évolution des quantiles de crues annuelles à la station 040110 simulés par CGCM3 selon le scénario d'émission A1B

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP annuelle (%)	0	6,3	10,8	16,0
ΔT annuelle (°C)	0	1,4	2,7	3,8
Crue moyenne (m ³ /s)	206	198	195	198
Écart-type (m ³ /s)	51,9	49,4	62,5	70,5
Coefficient de variation	0,252	0,249	0,32	0,355
Coefficient d'asymétrie	1,034	2,42	1,5	1,05
Crue 2 ans	197	181	180	186
Crue 5 ans	245	224	239	251
Crue 10 ans	276	260	279	293
Crue 20 ans	304	297	317	331
Crue 50 ans	339	347	367	379
Crue 100 ans	364	386	404	414

A6.4.1.3 Période annuelle – Modèle CGCM3 – A2

Pour le SE A2, une légère évolution à la baisse de la crue moyenne est observée. Parallèlement une légère diminution de la crue 2 ans est envisagée mais pour les quantiles de crues de plus fortes récurrences, une hausse est observée. Comme pour les crues printanières, le rapport entre la hausse des précipitations et des précipitations fait en sorte que les plus importantes crues sont observées à l'horizon 2050, pour par la suite diminuer à l'horizon 2080.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs de l'échantillon de crues annuelles pour les horizons 2020 et 2050 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Pour l'horizon 2080, l'hypothèse d'indépendance est acceptée à un niveau de signification de 5% alors que les hypothèses de stationnarité et d'homogénéité sont acceptées à 1%.

Pour les trois horizons, la loi de Pearson type III est retenue car elle fournit le meilleur ajustement. Le tableau A6.24 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.24

Évolution des quantiles de crues annuelles à la station 040110 simulés par CGCM3 selon le scénario d'émission A2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP annuelle (%)	0	6,5	13,4	17,6
ΔT annuelle (°C)	0	1,5	2,9	5,0
Crue moyenne (m ³ /s)	206	196	201	196
Écart-type (m ³ /s)	51,9	47,1	69,5	63,9
Coefficient de variation	0,252	0,241	0,346	0,327
Coefficient d'asymétrie	1,034	2,07	1,47	0,772
Crue 2 ans	197	181	184	188
Crue 5 ans	245	224	249	246
Crue 10 ans	276	257	293	281
Crue 20 ans	304	290	336	313
Crue 50 ans	339	334	391	352
Crue 100 ans	364	367	431	379

A6.4.2 Période annuelle – Modèle ECHAM4

Pour le plus chaud et le plus sec des MCG employés, comme pour les crues printanières une diminution de tous les quantiles de crues annuelles est observée.

A6.4.2.1 Période annuelle – Modèle ECHAM4 – B2

Pour ce SE, une évolution à la baisse de la crue moyenne est observée. Si une tendance généralisée à la baisse est observée pour toutes les crues, pour les plus fortes récurrences (50 et 100 ans) cette tendance à la baisse n'est pas linéaire puisque les plus faibles quantiles sont observés à l'horizon 2050, pour par la suite remontée à l'horizon 2080.

Pour l'horizon 2020, les hypothèses selon lesquelles les valeurs de l'échantillon de crues annuelles sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Pour l'horizon 2050, les hypothèses d'indépendance et de stationnarité sont acceptées à un niveau de signification de 5% tandis que l'hypothèse d'homogénéité est acceptée à 1%. Enfin, pour l'horizon 2080, l'hypothèse d'indépendance des valeurs de l'échantillon est acceptée à un niveau de signification de 5%, l'hypothèse de stationnarité est acceptée à 1% et l'hypothèse d'homogénéité des données est rejetée. Le même phénomène était observé lors de l'analyse des crues printanières.

Pour les horizons 2020 et 2080, la loi de Pearson type III est retenue car elle fournit le meilleur ajustement. À l'horizon 2050, la loi de GEV est retenue. Le tableau A6.25 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.25

Évolution des quantiles de crues annuelles à la station 040110 simulés par ECHAM4 selon le scénario d'émission B2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP annuelle (%)	0	1,4	2,5	5,0
ΔT annuelle (°C)	0	1,8	3,4	4,5
Crue moyenne (m ³ /s)	206	172	150	154
Écart-type (m ³ /s)	51,9	52,7	61,8	58,6
Coefficient de variation	0,252	0,306	0,412	0,38
Coefficient d'asymétrie	1,034	1,2	0,635	0,905
Crue 2 ans	197	162	143	145
Crue 5 ans	245	211	199	199
Crue 10 ans	276	243	233	232
Crue 20 ans	304	273	263	263
Crue 50 ans	339	311	298	300
Crue 100 ans	364	339	323	327

A6.4.2.2 Période annuelle – Modèle ECHAM4 – A2

L'analyse des crues annuelles pour ce SE est relativement similaire à l'analyse des crues printanières. Comme lors de l'analyse des crues printanières, pour les horizons 2020 et 2080 les hypothèses selon lesquelles les valeurs des échantillons des crues printanières sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Cependant pour l'horizon 2050, l'hypothèse selon laquelle les valeurs de l'échantillon sont indépendantes est acceptée à un niveau de signification de 5%, l'hypothèse de stationnarité est acceptée à un niveau de 1% et l'hypothèse d'homogénéité est rejetée.

Pour les horizons 2020 et 2050, la fonction de loi de Pearson type III fournie le meilleur ajustement. Pour l'horizon 2080, le meilleur ajustement est fourni par la loi de distribution GEV. Le tableau A6.26 résume les observations pour ce SE.

Tableau A6.26

Évolution des quantiles de crues annuelles à la station 040110 simulés par ECHAM4 selon le scénario d'émission A2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP annuelle (%)	0	-1,2	2,6	8,4
ΔT annuelle (°C)	0	1,9	3,5	5,6
Crue moyenne (m ³ /s)	206	166	154	143
Écart-type (m ³ /s)	51,9	51,3	64,9	48,7
Coefficient de variation	0,252	0,31	0,422	0,341
Coefficient d'asymétrie	1,034	1,41	0,831	0,634
Crue 2 ans	197	154	145	137
Crue 5 ans	245	202	204	181
Crue 10 ans	276	234	241	208
Crue 20 ans	304	265	274	231
Crue 50 ans	339	304	314	259
Crue 100 ans	364	334	343	279

A6.4.3 Période annuelle – Modèle HadCM3

Comme pour les autres MCG employés, les simulations effectuées à partir du HadCM3 prévoient une baisse de la crue moyenne annuelle ainsi que des quantiles de crues de faible récurrence. Parallèlement, une hausse des quantiles de plus fortes récurrences est observée.

A6.4.3.1 Période annuelle – Modèle HadCM3 – B2

Pour ce SE, une tendance à la baisse est observée pour la crue moyenne ainsi que les faibles quantiles. Pour les plus fortes récurrences, si une tendance à la baisse est observée dans un horizon rapproché, leur hausse est par ailleurs observée pour les horizons plus lointains.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs de l'échantillon de crues annuelles pour les horizons 2020 et 2050 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Pour l'horizon 2080, les hypothèses d'indépendance et de stationnarité sont acceptées à un niveau de signification de 5% alors que l'hypothèse d'homogénéité est acceptée à 1%.

Pour les trois horizons, la loi de Pearson type III est retenue car elle fournit le meilleur ajustement. Le tableau A6.27 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.27

Évolution des quantiles de crues annuelles à la station 040110 simulés par HadCM3 selon le scénario d'émission B2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP annuelle (%)	0	7,9	8,2	13,3
ΔT annuelle (°C)	0	1,4	2,3	3,7
Crue moyenne (m ³ /s)	206	193	191	188
Écart-type (m ³ /s)	51,9	43,6	53,3	70,7
Coefficient de variation	0,252	0,226	0,28	0,375
Coefficient d'asymétrie	1,034	1,84	1,51	0,917
Crue 2 ans	197	180	178	178
Crue 5 ans	245	221	227	243
Crue 10 ans	276	250	262	283
Crue 20 ans	304	279	295	320
Crue 50 ans	339	317	337	366
Crue 100 ans	364	346	369	398

A6.4.3.2 Période annuelle – Modèle HadCM3 – A2

Pour le SE A2, une tendance à la baisse est observée pour la crue moyenne et pour les faibles récurrences. Comme pour le scénario B2, si une tendance à la baisse est observée dans un horizon rapproché pour les plus fortes récurrences, leur hausse est observée pour les horizons 2050 et 2080.

Les hypothèses selon lesquelles les valeurs de l'échantillon de crues annuelles pour les horizons 2020 et 2050 sont indépendantes, stationnaires et homogènes sont acceptées à un niveau de signification de 5%. Pour l'horizon 2080, l'hypothèse d'indépendance est acceptée à un niveau de signification de 5% alors que les hypothèses de stationnarité et d'homogénéité sont acceptées à un niveau de signification de 1%.

Pour les trois horizons, la loi de Pearson type III est retenue car elle fournit le meilleur ajustement. Le tableau A6.28 résume les observations pour ce scénario d'émission.

Tableau A6.28

Évolution des quantiles de crues annuelles à la station 040110 simulés par HadCM3 selon le scénario d'émission A2

Caractéristiques	Horizon			
	1967-1990	2020	2050	2080
ΔP annuelle (%)	0	4,7	11,5	13,0
ΔT annuelle (°C)	0	1,2	2,6	4,9
Crue moyenne (m ³ /s)	206	188	199	181
Écart-type (m ³ /s)	51,9	43,7	59,8	77,1
Coefficient de variation	0,252	0,233	0,3	0,427
Coefficient d'asymétrie	1,034	1,85	1,35	0,831
Crue 2 ans	197	175	186	170
Crue 5 ans	245	215	242	241
Crue 10 ans	276	245	279	284
Crue 20 ans	304	274	315	323
Crue 50 ans	339	313	360	371
Crue 100 ans	364	342	393	405

ANNEXE 7

Détermination de l'évolution « Probable »

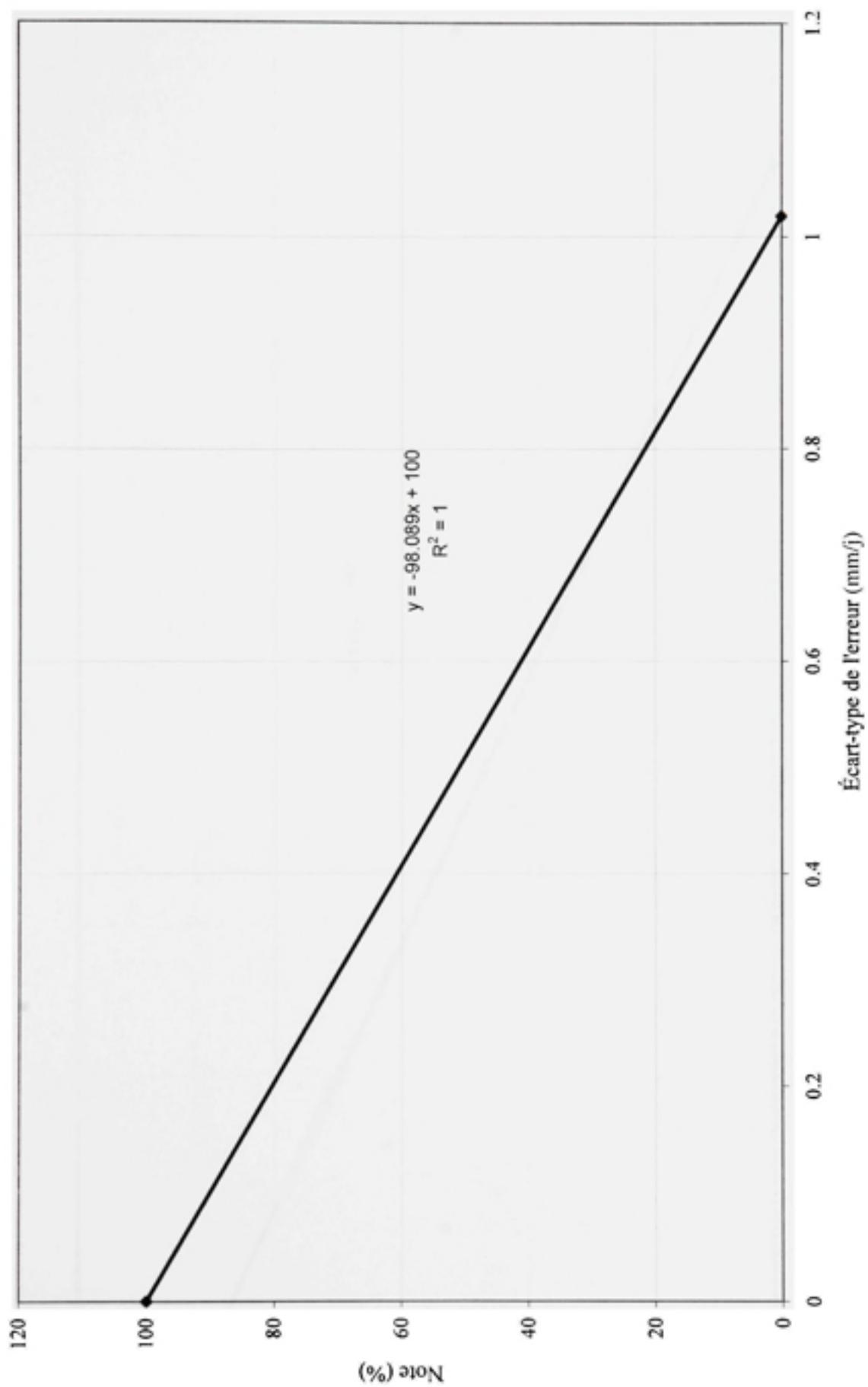


Figure A7.1 Écart-type de l'erreur - Précipitation.

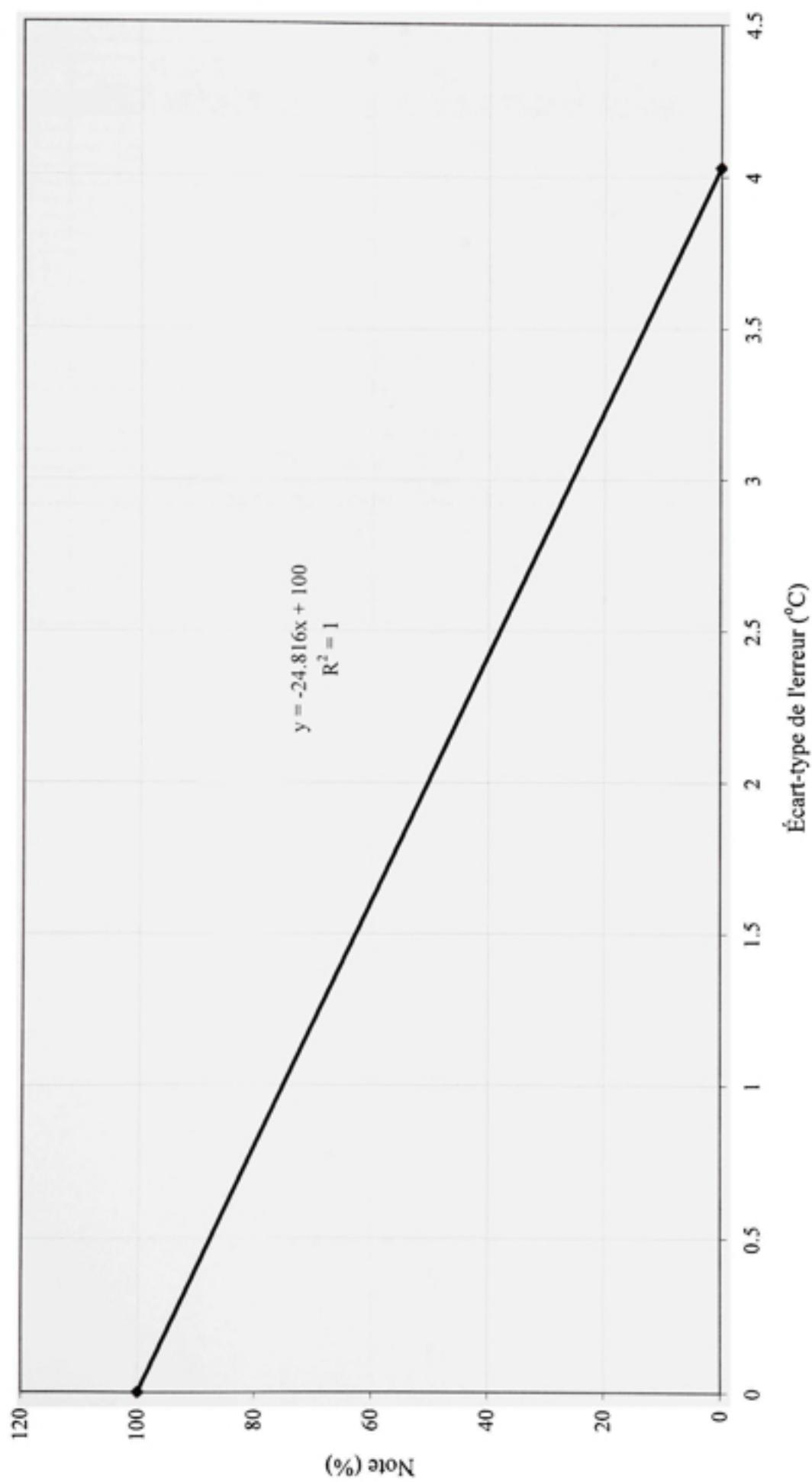


Figure A7.2 Écart-type de l'erreur - Température.

Tableau A7 1 Exemple du calcul du poids du MCG-SE en fonction des poids attribués aux différents critères

MCG-SE	Poids des critères					Global (%)
	Précipitations		Température		Simulation hydrologique Nash-Sutcliffe	
	Corrélation	Ecart-type de l'erreur	Corrélation	Ecart-type de l'erreur		
Poids des critères	20,00	20,00	20,00	20,00	20	
HADCM3 A2a	70,54	67,53	99,89	74,04	85,30	79,46
HADCM3 A2b	75,32	62,25	99,91	84,05	85,30	81,37
HADCM3 A2c	66,05	55,69	99,88	79,78	85,30	77,34
HADCM3 B2a	75,83	71,09	99,87	73,15	83,95	80,78
HADCM3 B2b	76,74	66,05	99,92	84,97	83,95	82,33
ECHAM4 A2	37,97	49,14	99,75	77,70	83,85	69,68
ECHAM4 B2	34,49	46,93	99,77	78,26	84,27	68,74
CGCM3r A1B_1	75,46	69,28	99,02	58,98	35,51	67,65
CGCM3r A1B_2	78,42	68,04	99,21	63,68	35,51	68,98
CGCM3r A1B_3	63,85	59,47	99,43	67,15	35,51	65,08
CGCM3r A2_1	75,46	69,28	99,01	58,89	35,65	67,66
CGCM3r A2_2	78,42	68,04	99,22	63,74	35,65	69,02
CGCM3r A2_3	63,85	59,47	99,42	67,05	35,65	65,09
CGCM3r B1_1	75,46	69,28	99,02	59,04	35,05	67,57
CGCM3r B1_2	78,42	68,04	99,21	63,71	35,05	68,89
CGCM3r B1_3	63,85	59,47	99,42	67,11	35,05	64,98

Tableau A7 2 Exemple de calcul de la note globale des différents MCG-SE avec membres moyennés

Scénarios	Poids relatif des scénarios (moyenne)					Global (%)
	Précipitations		Température		Simulation	
	Corrélation	Ecart-type de l'erreur	Corrélation	Ecart-type de l'erreur		
CGCM3 - A1B	72,6	65,6	99,2	63,3	35,5	67,24
CGCM3 - A2	72,6	65,6	99,2	63,2	35,7	67,26
ECHAM4 - A2	38,0	49,1	99,8	77,7	83,8	69,68
HADCM3 - A2	70,6	61,8	99,9	79,3	85,3	79,39
CGCM3 - B1	72,6	65,6	99,2	63,3	35,1	67,15
ECHAM4 - B2	34,5	46,9	99,8	78,3	84,3	68,74
HADCM3 - B2	76,3	68,6	99,9	79,1	83,9	81,55

Tableau A7.3 Cas d'attribution des poids aux différents critères

# Cas	Poids des critères				
	Précipitations		Température		Simulation hydrologique
	Corrélation	Ecart-type de l'erreur	Corrélation	Ecart-type de l'erreur	Nash-Sutcliffe
1	25	25	25	25	0
2	0	50	0	50	0
3	50	0	50	0	0
4	100	0	0	0	0
5	0	100	0	0	0
6	0	0	100	0	0
7	0	0	0	100	0
8	0	0	0	0	100
9	12.5	12.5	12.5	12.5	50
10	16.5	16.5	16.5	16.5	33
11	6.25	6.25	6.25	6.25	75
12	20	20	20	20	20

Tableau A7.4 Note globale des différents MCG-SE en fonction des cas d'attribution des poids aux différents critères

# Cas	MCG-SE (Note globale %)							Total
	CGCM3 - A1B	CGCM3 - A2	ECHAM4 - A2	HADCM3 - A2	CGCM3 - B1	ECHAM4 - B2	HADCM3 - B2	
1	75.17	75.16	66.14	77.91	75.17	64.86	80.95	515.36
2	64.41	64.41	63.42	70.55	64.44	62.59	73.81	463.67
3	85.90	85.90	68.86	85.27	85.90	67.11	88.09	567.04
4	72.58	72.58	37.97	70.64	72.58	34.49	76.28	437.12
5	65.60	65.60	49.14	61.82	65.60	46.93	68.57	423.25
6	99.22	99.22	99.75	99.90	99.22	99.77	99.89	696.97
7	63.27	63.23	77.70	79.29	63.29	78.26	79.06	504.10
8	35.51	35.65	83.85	85.30	35.05	84.27	83.95	443.59
9	55.34	55.41	74.99	81.61	55.11	74.57	82.45	479.48
10	61.33	61.37	71.32	79.57	61.18	70.62	81.13	486.52
11	45.43	45.53	79.42	81.46	45.08	79.42	83.20	461.54
12	67.24	67.26	69.68	79.19	67.15	68.74	81.55	501.00

Tableau A7.5 Poids relatif des différents MCG-SE en fonction des cas d'attribution des poids aux différents critères

# Cas	Poids relatif							Total
	CGCM3 - A1B	CGCM3 - A2	ECHAM4 - A2	HADCM3 - A2	CGCM3 - B1	ECHAM4 - B2	HADCM3 - B2	
1	0.146	0.146	0.128	0.151	0.146	0.126	0.157	1.00
2	0.119	0.119	0.117	0.152	0.119	0.115	0.159	1.00
3	0.151	0.151	0.121	0.150	0.151	0.118	0.155	1.00
4	0.166	0.166	0.087	0.162	0.166	0.079	0.175	1.00
5	0.155	0.155	0.116	0.146	0.155	0.111	0.162	1.00
6	0.142	0.142	0.143	0.145	0.142	0.143	0.145	1.00
7	0.126	0.125	0.154	0.157	0.126	0.155	0.157	1.00
8	0.080	0.080	0.189	0.192	0.079	0.190	0.189	1.00
9	0.115	0.116	0.156	0.170	0.115	0.156	0.172	1.00
10	0.126	0.126	0.147	0.164	0.126	0.145	0.167	1.00
11	0.098	0.099	0.172	0.181	0.098	0.172	0.180	1.00
12	0.134	0.134	0.139	0.158	0.134	0.137	0.163	1.00

ANNEXE 8

Secteur d'étude et modèle hydraulique

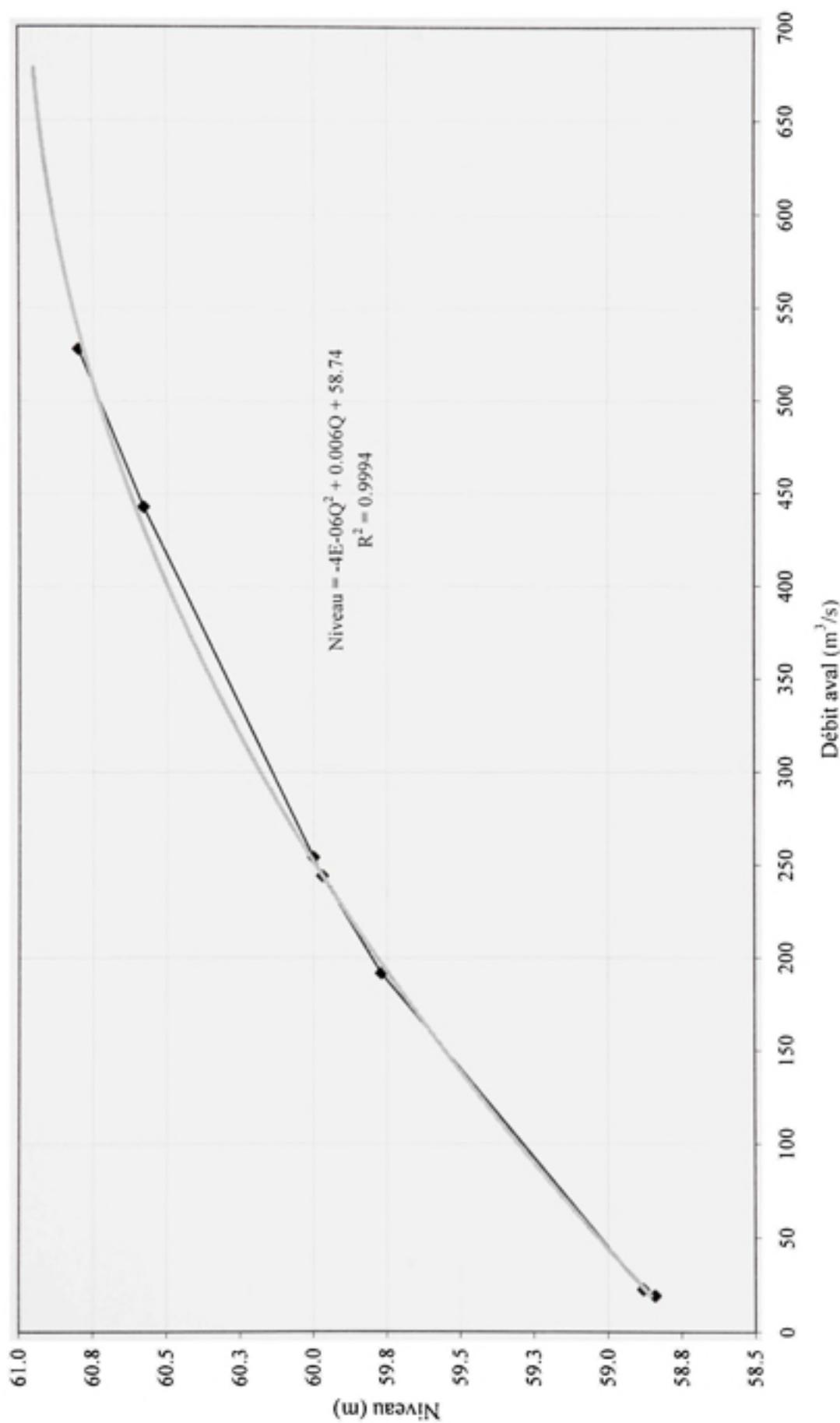


Figure A8.2 Courbe de tarage aval du modèle hydraulique.

ANNEXE 9

Modélisation hydraulique

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Reconstitution des écoulements du 2007-04-21

HEC-RAS Plan: Plan 24 River: RIVER-1 Reach: Reach-1 Profile: 2007-04-21

River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude #	CM
25	2007-04-21	152	56.69	60.56		60.58	0.00006	0.64	250.38	163.38	0.12	
24	2007-04-21	152	55.47	60.54		60.57	0.000068	0.7	236.35	120.47	0.13	
23	2007-04-21	152	55.01	60.54		60.56	0.000051	0.64	294.37	165.62	0.11	
22	2007-04-21	152	51.81	60.54		60.55	0.000017	0.5	341.83	89.59	0.07	
21	2007-04-21	152	52.27	60.53		60.54	0.00002	0.48	317.8	107.22	0.07	
20	2007-04-21	152	55.47	60.51		60.53	0.000049	0.64	236.15	68.56	0.11	
19	2007-04-21	152	55.32	60.51		60.53	0.000046	0.6	268.85	131.43	0.1	
18	2007-04-21	152	56.5	60.5		60.52	0.000059	0.61	254.71	165.94	0.12	
17	2007-04-21	152	56.2	60.49		60.51	0.000047	0.57	316.83	203.71	0.1	
16	2007-04-21	152	54.22	60.49		60.5	0.000017	0.4	443.24	235.31	0.06	
15	2007-04-21	152	54.68	60.48		60.5	0.00003	0.57	296.68	115.96	0.09	
14	2007-04-21	152	54.37	60.48		60.49	0.000028	0.55	276.74	63.64	0.08	
13	2007-04-21	152	56.13	60.43	58.68	60.49	0.000847	1.07	142.44	59.86	0.22	
12.5												
	Bridge											
12	2007-04-21	152	56.13	60.43		60.49	0.000849	1.07	142.3	59.86	0.22	
11	2007-04-21	152	56.45	60.4		60.48	0.001175	1.22	124.7	55.76	0.26	
10	2007-04-21	152	57.39	60.35		60.4	0.000755	1.04	146.64	60.88	0.21	
9	2007-04-21	152	57.13	60.33	58.49	60.38	0.002654	1	152.12	59.06	0.2	
8.5												
	Bridge											
8	2007-04-21	152	57.13	60.31		60.36	0.002728	1.01	150.78	59.06	0.2	
7	2007-04-21	152	54.25	60.31		60.33	0.000553	0.62	246.47	66.49	0.1	
6	2007-04-21	152	54.25	60.2		60.23	0.000869	0.76	200	54.7	0.13	
5	2007-04-21	178	54.25	60.08		60.1	0.000745	0.7	254.78	74.02	0.12	
4	2007-04-21	178	56.6	59.75	58.61	59.9	0.007369	1.72	103.54	50.86	0.38	
3.5												
	Bridge											
3	2007-04-21	178	56.4	59.69		59.82	0.006049	1.61	110.47	51.22	0.35	
2	2007-04-21	178	56.18	59.68		59.74	0.001484	1.1	162.48	63.27	0.22	
1	2007-04-21	178	53.33	59.68	55.52	59.7	0.000265	0.62	287.15	72.25	0.1	

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Cru de récurrence 20 ans - Période de référence (1967-1999)

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 18 Profile	River: RIVER-1 Profile	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Reach-1 W.S. Elev (m)	Profile: Q20 - Historique Crt W.S. (m)	Profile: Q20 - Historique E.G. Elev (m)	Profile: Q20 - Historique E.G. Slope (m/m)	Profile: Q20 - Historique Vel Chnl (m/s)	Profile: Q20 - Historique Flow Area (m ²)	Profile: Q20 - Historique Top Width (m)	Profile: Q20 - Historique Froude # Chl
Reach-1	25	Q20 - Historique	393	56.69	62.53			62.55	0.000041	0.72	1042.02	494.34	0.11
Reach-1	24	Q20 - Historique	393	55.47	62.51			62.54	0.000058	0.88	827.07	392.73	0.12
Reach-1	23	Q20 - Historique	393	55.01	62.5			62.53	0.000048	0.83	887.27	460.5	0.12
Reach-1	22	Q20 - Historique	393	51.81	62.49			62.52	0.000033	0.83	816.5	425.49	0.1
Reach-1	21	Q20 - Historique	393	52.27	62.48			62.51	0.000031	0.73	999.96	487.99	0.09
Reach-1	20	Q20 - Historique	393	55.47	62.45			62.49	0.000065	0.98	591.77	261.39	0.13
Reach-1	19	Q20 - Historique	393	55.32	62.44			62.48	0.000055	0.87	666.23	270.73	0.12
Reach-1	18	Q20 - Historique	393	56.5	62.44			62.47	0.000054	0.76	742.72	400.37	0.12
Reach-1	17	Q20 - Historique	393	56.2	62.44			62.46	0.000043	0.74	920.9	443.06	0.11
Reach-1	16	Q20 - Historique	393	54.22	62.44			62.45	0.000023	0.59	1186.89	473.42	0.08
Reach-1	15	Q20 - Historique	393	54.68	62.41			62.45	0.000048	0.87	815.92	362.53	0.12
Reach-1	14	Q20 - Historique	393	54.37	62.39			62.44	0.000065	0.95	413.04	78.96	0.13
Reach-1	13	Q20 - Historique	393	56.13	62.3		59.65	62.43	0.000865	1.54	255.57	63.75	0.24
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q20 - Historique	393	56.13	62.2			62.33	0.000941	1.58	248.89	62.81	0.25
Reach-1	11	Q20 - Historique	393	56.45	62.16			62.31	0.00123	1.73	226.87	61.26	0.29
Reach-1	10	Q20 - Historique	393	57.39	62.11			62.23	0.000862	1.5	262.98	74.83	0.24
Reach-1	9	Q20 - Historique	393	57.13	62.09		59.37	62.21	0.003584	1.54	255.95	59.44	0.24
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q20 - Historique	393	57.13	62.06			62.18	0.003663	1.55	254.1	59.43	0.24
Reach-1	7	Q20 - Historique	393	54.25	62.07			62.12	0.001021	1.04	391.56	91.91	0.15
Reach-1	6	Q20 - Historique	393	54.25	61.83			61.91	0.001745	1.31	313.82	94.69	0.19
Reach-1	5	Q20 - Historique	461	54.25	61.59			61.67	0.00148	1.23	390.72	112.9	0.18
Reach-1	4	Q20 - Historique	461	56.6	60.8		59.73	61.23	0.01383	2.92	158.1	53.62	0.54
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q20 - Historique	461	56.4	60.66			61.07	0.013015	2.86	161.37	53.79	0.53
Reach-1	2	Q20 - Historique	461	56.18	60.66			60.87	0.003493	2.04	228.44	77.62	0.35
Reach-1	1	Q20 - Historique	461	53.33	60.66		56.76	60.74	0.000941	1.28	361.66	87.64	0.19

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crue de récurrence 100 ans - Période de référence (1967-1990)

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 19 Profile	River RIVER-1	Reach Reach-1	Profile Q100 - Historique	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W S Elev (m)	Crt W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Ch
Reach-1	25	Q100 - Historique				471	56.69	63.04		63.06	0.000039	0.75	1346.81	700	0.1
Reach-1	24	Q100 - Historique				471	55.47	63.03		63.06	0.000051	0.89	1038.64	420	0.12
Reach-1	23	Q100 - Historique				471	55.01	63.02		63.05	0.000043	0.84	1145.81	530	0.11
Reach-1	22	Q100 - Historique				471	51.81	63.01		63.04	0.000033	0.87	1063.86	527.47	0.1
Reach-1	21	Q100 - Historique				471	52.27	63		63.03	0.000029	0.75	1257.43	502.01	0.09
Reach-1	20	Q100 - Historique				471	55.47	62.96		63.01	0.000063	1.03	732.39	280.76	0.13
Reach-1	19	Q100 - Historique				471	55.32	62.96		63	0.000053	0.92	814.2	299.94	0.12
Reach-1	18	Q100 - Historique				471	56.5	62.96		62.99	0.000049	0.78	965.05	440.3	0.11
Reach-1	17	Q100 - Historique				471	56.2	62.96		62.98	0.00004	0.77	1171.02	518.69	0.11
Reach-1	16	Q100 - Historique				471	54.22	62.96		62.97	0.000022	0.62	1439.34	498.07	0.08
Reach-1	15	Q100 - Historique				471	54.68	62.93		62.97	0.000047	0.91	1020.28	416.64	0.12
Reach-1	14	Q100 - Historique				471	54.37	62.9		62.96	0.000071	1.04	457.39	99.26	0.14
Reach-1	13	Q100 - Historique				471	56.13	62.81	59.87	62.95	0.000854	1.65	288.67	68.25	0.24
Reach-1	12.5														
Reach-1	12	Q100 - Historique				471	56.13	62.62		62.77	0.000978	1.72	276.02	66.57	0.26
Reach-1	11	Q100 - Historique				471	56.45	62.58		62.76	0.001315	1.86	253.32	65.24	0.3
Reach-1	10	Q100 - Historique				471	57.39	62.53		62.66	0.000883	1.62	295.72	81.71	0.25
Reach-1	9	Q100 - Historique				471	57.13	62.5	59.61	62.64	0.004096	1.68	280.77	62.6	0.25
Reach-1	8.5														
Reach-1	8	Q100 - Historique				471	57.13	62.46		62.61	0.004202	1.69	278.52	62.6	0.26
Reach-1	7	Q100 - Historique				471	54.25	62.48		62.54	0.001128	1.14	436.75	156.99	0.16
Reach-1	6	Q100 - Historique				471	54.25	62.22		62.32	0.001875	1.43	354.42	115.11	0.2
Reach-1	5	Q100 - Historique				552	54.25	61.96		62.05	0.001614	1.34	432.76	116.28	0.19
Reach-1	4	Q100 - Historique				552	56.6	60.99	60.01	61.54	0.016351	3.27	168.74	54.15	0.59
Reach-1	3.5														
Reach-1	3	Q100 - Historique				552	56.4	60.82		61.36	0.015944	3.24	170.19	54.22	0.58
Reach-1	2	Q100 - Historique				552	56.18	60.83		61.1	0.004272	2.32	241.61	78.07	0.39
Reach-1	1	Q100 - Historique				552	53.33	60.83	57.05	60.94	0.001234	1.47	377.25	95.64	0.22

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Cruée de récurrence 20 ans - Horizon 2020 - Probabilité de non-dépassement de 5%

HEC-RAS Reach	Plan: Plan 38 River Sta	River: RIVER-1 Profile	Reach: Reach-1 Q Total (m ³ /s)	Profile: Q20- 2020 - Q5 Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach-1	25	Q20- 2020 - Q5	346	56.69	62.14		62.16	0.000048	0.73	859.91	460.82	0.11
Reach-1	24	Q20- 2020 - Q5	346	55.47	62.12		62.15	0.000066	0.89	678.78	371.23	0.13
Reach-1	23	Q20- 2020 - Q5	346	55.01	62.11		62.14	0.000054	0.84	718.84	406.3	0.12
Reach-1	22	Q20- 2020 - Q5	346	51.81	62.11		62.14	0.000033	0.81	665.66	355.48	0.1
Reach-1	21	Q20- 2020 - Q5	346	52.27	62.1		62.12	0.000033	0.72	820.03	441.02	0.1
Reach-1	20	Q20- 2020 - Q5	346	55.47	62.06		62.1	0.000069	0.96	495.69	235.38	0.14
Reach-1	19	Q20- 2020 - Q5	346	55.32	62.06		62.09	0.000058	0.86	567.06	240.94	0.12
Reach-1	18	Q20- 2020 - Q5	346	56.5	62.05		62.08	0.000062	0.76	612.52	268.86	0.12
Reach-1	17	Q20- 2020 - Q5	346	56.2	62.05		62.07	0.000048	0.74	758.98	387.06	0.11
Reach-1	16	Q20- 2020 - Q5	346	54.22	62.05		62.06	0.000024	0.58	1007.24	448.08	0.08
Reach-1	15	Q20- 2020 - Q5	346	54.68	62.02		62.06	0.000051	0.85	678.96	339.77	0.12
Reach-1	14	Q20- 2020 - Q5	346	54.37	62		62.05	0.000062	0.9	383.21	75.87	0.13
Reach-1	13	Q20- 2020 - Q5	346	56.13	61.92	59.49	62.04	0.000918	1.49	231.89	60.33	0.24
Reach-1	12.5		Bridge									
Reach-1	12	Q20- 2020 - Q5	346	56.13	61.92		62.03	0.000922	1.49	231.62	60.29	0.24
Reach-1	11	Q20- 2020 - Q5	346	56.45	61.88		62.02	0.001194	1.65	210.13	59.49	0.28
Reach-1	10	Q20- 2020 - Q5	346	57.39	61.83		61.94	0.000852	1.43	242.73	70.2	0.24
Reach-1	9	Q20- 2020 - Q5	346	57.13	61.81	59.22	61.92	0.003393	1.44	239.57	59.38	0.23
Reach-1	8.5		Bridge									
Reach-1	8	Q20- 2020 - Q5	346	57.13	61.78		61.89	0.003469	1.45	237.83	59.37	0.23
Reach-1	7	Q20- 2020 - Q5	346	54.25	61.79		61.84	0.000951	0.97	366.45	89.89	0.14
Reach-1	6	Q20- 2020 - Q5	346	54.25	61.57		61.65	0.001637	1.23	290.91	84.18	0.18
Reach-1	5	Q20- 2020 - Q5	406	54.25	61.35		61.41	0.001387	1.15	363.44	110.65	0.17
Reach-1	4	Q20- 2020 - Q5	406	56.6	60.64	59.55	61.02	0.01256	2.71	149.92	53.22	0.52
Reach-1	3.5		Bridge									
Reach-1	3	Q20- 2020 - Q5	406	56.4	60.52		60.87	0.011591	2.64	154.02	53.42	0.5
Reach-1	2	Q20- 2020 - Q5	406	56.18	60.52		60.7	0.003103	1.88	217.84	73.8	0.33
Reach-1	1	Q20- 2020 - Q5	406	53.33	60.52	56.56	60.59	0.000786	1.16	349.83	81.06	0.17

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crué de récurrence 20 ans - Horizon 2020 - Probabilité de non-dépassement de 50%

HEC-RAS Reach	Plan 38 River Sta	River RIVER-1 Profile	Reach-1 Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Profile Q20-2020 - Q50 W S Elev (m)	Q20-2020 - Q50 Crit W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach-1	25	Q20-2020 - Q50	361	56.69	62.24		62.26	0.000047	0.74	904.05	464.6	0.11
Reach-1	24	Q20-2020 - Q50	361	55.47	62.21		62.25	0.000065	0.9	714.44	376.51	0.13
Reach-1	23	Q20-2020 - Q50	361	55.01	62.21		62.24	0.000054	0.85	758.19	419.59	0.12
Reach-1	22	Q20-2020 - Q50	361	51.81	62.2		62.23	0.000034	0.82	700.06	372.69	0.1
Reach-1	21	Q20-2020 - Q50	361	52.27	62.19		62.21	0.000033	0.73	862.27	452.48	0.1
Reach-1	20	Q20-2020 - Q50	361	55.47	62.15		62.2	0.000069	0.97	518.01	241.67	0.14
Reach-1	19	Q20-2020 - Q50	361	55.32	62.15		62.19	0.000059	0.87	589.99	248.15	0.13
Reach-1	18	Q20-2020 - Q50	361	56.5	62.15		62.17	0.000061	0.77	639.29	300.64	0.12
Reach-1	17	Q20-2020 - Q50	361	56.2	62.14		62.16	0.000048	0.75	796.06	400.58	0.11
Reach-1	16	Q20-2020 - Q50	361	54.22	62.14		62.16	0.000024	0.59	1049.71	454.2	0.08
Reach-1	15	Q20-2020 - Q50	361	54.68	62.12		62.15	0.000051	0.87	711.01	345.23	0.12
Reach-1	14	Q20-2020 - Q50	361	54.37	62.1		62.14	0.000064	0.93	390.23	76.61	0.13
Reach-1	13	Q20-2020 - Q50	361	56.13	62.01	59.54	62.13	0.000926	1.52	237.3	61.13	0.24
Reach-1	12.5		Bridge									
Reach-1	12	Q20-2020 - Q50	361	56.13	62.01		62.12	0.00093	1.52	237.02	61.09	0.24
Reach-1	11	Q20-2020 - Q50	361	56.45	61.97		62.11	0.001199	1.68	215.39	59.66	0.28
Reach-1	10	Q20-2020 - Q50	361	57.39	61.92		62.03	0.000857	1.45	249.03	71.67	0.24
Reach-1	9	Q20-2020 - Q50	361	57.13	61.9	59.27	62.01	0.00346	1.47	244.78	59.4	0.23
Reach-1	8.5		Bridge									
Reach-1	8	Q20-2020 - Q50	361	57.13	61.87		61.98	0.003538	1.49	243	59.39	0.23
Reach-1	7	Q20-2020 - Q50	361	54.25	61.88		61.93	0.000975	1	374.37	90.53	0.14
Reach-1	6	Q20-2020 - Q50	361	54.25	61.65		61.73	0.001686	1.26	297.79	85.76	0.18
Reach-1	5	Q20-2020 - Q50	423	54.25	61.42		61.49	0.00142	1.17	371.77	111.34	0.17
Reach-1	4	Q20-2020 - Q50	423	56.6	60.69	59.61	61.08	0.013006	2.78	152.31	53.34	0.52
Reach-1	3.5		Bridge									
Reach-1	3	Q20-2020 - Q50	423	56.4	60.56		60.93	0.012084	2.71	156.13	53.53	0.51
Reach-1	2	Q20-2020 - Q50	423	56.18	60.56		60.75	0.003238	1.93	220.82	74.9	0.34
Reach-1	1	Q20-2020 - Q50	423	53.33	60.56	56.62	60.63	0.000835	1.2	353.13	82.95	0.18

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Cruée de récurrence 20 ans - Horizon 2020 - Probabilité de non-dépassement de 95%

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 38 Profile	River Profile	RIVER-1 Profile	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Profile W S Elev (m)	Q20-2020-Q95 Crit W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach-1	25	Q20-2020-Q95	382	56.69	62.41	62.43	0.000043	0.73	984.28	473.76	0.11			
Reach-1	24	Q20-2020-Q95	382	55.47	62.39	62.42	0.000061	0.89	780.12	386.05	0.13			
Reach-1	23	Q20-2020-Q95	382	55.01	62.38	62.41	0.000051	0.84	832.62	443.64	0.12			
Reach-1	22	Q20-2020-Q95	382	51.81	62.37	62.4	0.000053	0.83	766.58	403.7	0.1			
Reach-1	21	Q20-2020-Q95	382	52.27	62.36	62.39	0.000032	0.73	941.83	473.32	0.1			
Reach-1	20	Q20-2020-Q95	382	55.47	62.32	62.37	0.000068	0.99	560.48	253.21	0.14			
Reach-1	19	Q20-2020-Q95	382	55.32	62.32	62.36	0.000057	0.88	633.81	261.36	0.12			
Reach-1	18	Q20-2020-Q95	382	56.5	62.32	62.35	0.000058	0.77	696.24	358.99	0.12			
Reach-1	17	Q20-2020-Q95	382	56.2	62.31	62.34	0.000046	0.75	867.57	425.43	0.11			
Reach-1	16	Q20-2020-Q95	382	54.22	62.31	62.33	0.000024	0.59	1129.28	465.45	0.08			
Reach-1	15	Q20-2020-Q95	382	54.68	62.29	62.32	0.00005	0.87	771.65	355.33	0.12			
Reach-1	14	Q20-2020-Q95	382	54.37	62.27	62.31	0.000066	0.95	403.44	77.98	0.13			
Reach-1	13	Q20-2020-Q95	382	56.13	62.18	59.61	62.3	0.000902	1.54	247.79	62.65	0.24		
Reach-1	12.5			Bridge										
Reach-1	12	Q20-2020-Q95	382	56.13	62.13	62.26	0.000937	1.56	244.87	62.23	0.25			
Reach-1	11	Q20-2020-Q95	382	56.45	62.1	62.25	0.001217	1.71	223.01	60.65	0.28			
Reach-1	10	Q20-2020-Q95	382	57.39	62.05	62.16	0.000859	1.48	258.27	73.78	0.24			
Reach-1	9	Q20-2020-Q95	382	57.13	62.02	59.33	62.14	0.003539	1.51	252.23	59.42	0.23		
Reach-1	8.5			Bridge										
Reach-1	8	Q20-2020-Q95	382	57.13	61.99	62.11	0.003617	1.53	250.41	59.42	0.24			
Reach-1	7	Q20-2020-Q95	382	54.25	62.01	62.06	0.001005	1.03	385.82	91.45	0.14			
Reach-1	6	Q20-2020-Q95	382	54.25	61.77	61.85	0.001724	1.29	308.33	91.58	0.19			
Reach-1	5	Q20-2020-Q95	448	54.25	61.53	61.61	0.001459	1.21	384.44	112.38	0.18			
Reach-1	4	Q20-2020-Q95	448	56.6	60.76	59.69	61.18	0.013511	2.87	156.3	53.54	0.54		
Reach-1	3.5			Bridge										
Reach-1	3	Q20-2020-Q95	448	56.4	60.63	61.03	0.012655	2.8	159.79	53.71	0.52			
Reach-1	2	Q20-2020-Q95	448	56.18	60.63	60.83	0.003395	2	226.12	76.8	0.34			
Reach-1	1	Q20-2020-Q95	448	53.33	60.63	56.72	60.71	0.000903	1.25	359.04	86.23	0.19		

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crue de récurrence 20 ans - Horizon 2050 - Probabilité de non-dépassement de 5%

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 19 Profile	River RIVER-1 Profile	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Profile W S Elev (m)	Q20-2050-Q5 Crt W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach-1	25	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	56.69	62.13		62.15	0.000048	0.73	853.84	460.3	0.11
Reach-1	24	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	55.47	62.11		62.14	0.000066	0.89	673.89	370.5	0.13
Reach-1	23	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	55.01	62.1		62.13	0.000054	0.84	713.49	404.46	0.12
Reach-1	22	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	51.81	62.09		62.12	0.000033	0.8	661.03	353.09	0.1
Reach-1	21	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	52.27	62.08		62.11	0.000033	0.71	814.27	439.43	0.09
Reach-1	20	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	55.47	62.05		62.09	0.000069	0.96	492.64	234.53	0.14
Reach-1	19	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	55.32	62.04		62.08	0.000058	0.85	563.94	239.95	0.12
Reach-1	18	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	56.5	62.04		62.07	0.000062	0.76	609.03	267.1	0.12
Reach-1	17	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	56.2	62.03		62.06	0.000048	0.74	753.94	385.19	0.11
Reach-1	16	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	54.22	62.03		62.05	0.000024	0.58	1001.41	447.23	0.08
Reach-1	15	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	54.68	62.01		62.04	0.000051	0.85	674.56	339.02	0.12
Reach-1	14	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	54.37	61.99		62.03	0.000061	0.9	382.24	75.77	0.13
Reach-1	13	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	56.13	61.91	59.49	62.02	0.000917	1.49	231.14	60.22	0.24
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	56.13	61.91		62.02	0.000921	1.49	230.87	60.18	0.24
Reach-1	11	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	56.45	61.87		62.01	0.001193	1.64	209.39	59.47	0.28
Reach-1	10	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	57.39	61.82		61.92	0.000852	1.42	241.86	70	0.24
Reach-1	9	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	57.13	61.8	59.21	61.9	0.003385	1.44	238.85	59.38	0.23
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	57.13	61.77		61.88	0.003461	1.45	237.11	59.37	0.23
Reach-1	7	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	54.25	61.78		61.83	0.000947	0.97	365.34	89.8	0.14
Reach-1	6	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	344	54.25	61.56		61.63	0.001632	1.22	289.95	83.67	0.18
Reach-1	5	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	404	54.25	61.33		61.4	0.001385	1.14	362.22	110.55	0.17
Reach-1	4	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	404	56.6	60.63	59.55	61.01	0.012563	2.7	149.41	53.19	0.52
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	404	56.4	60.51		60.86	0.011591	2.63	153.51	53.4	0.5
Reach-1	2	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	404	56.18	60.51		60.69	0.003102	1.87	217.12	73.53	0.33
Reach-1	1	Q20-2050-Q5	Q20-2050-Q5	404	53.33	60.51	56.55	60.58	0.000782	1.16	349.04	80.6	0.17

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crue de récurrence 20 ans - Horizon 2050 - Probabilité de non-dépassement de 50%

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 39 Profile	River Profile	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Profile W.S. Elev (m)	Q20-2050-Q50 Cut W/S (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # CM
Reach-1	25	Q20-2050-Q50	406	56.69	62.61			62.63	0.000041	0.75	1085.83	509.4	0.1
Reach-1	24	Q20-2050-Q50	406	55.47	62.6			62.63	0.000057	0.88	861.71	397.59	0.12
Reach-1	23	Q20-2050-Q50	406	55.01	62.59			62.62	0.000048	0.84	928.21	472.74	0.11
Reach-1	22	Q20-2050-Q50	406	51.81	62.58			62.61	0.000033	0.84	854.37	442.89	0.1
Reach-1	21	Q20-2050-Q50	406	52.27	62.57			62.59	0.000031	0.75	1042.85	491.7	0.09
Reach-1	20	Q20-2050-Q50	406	55.47	62.53			62.58	0.000065	0.99	614.73	266.13	0.13
Reach-1	19	Q20-2050-Q50	406	55.32	62.53			62.57	0.000055	0.88	690.08	276.7	0.12
Reach-1	18	Q20-2050-Q50	406	56.5	62.53			62.56	0.000053	0.77	778.86	421.29	0.12
Reach-1	17	Q20-2050-Q50	406	56.2	62.52			62.55	0.000043	0.75	960.22	455.67	0.11
Reach-1	16	Q20-2050-Q50	406	54.22	62.52			62.54	0.000023	0.6	1228.53	478.61	0.08
Reach-1	15	Q20-2050-Q50	406	54.68	62.5			62.53	0.000048	0.88	847.78	369.78	0.12
Reach-1	14	Q20-2050-Q50	406	54.37	62.48			62.52	0.000067	0.97	419.86	79.65	0.13
Reach-1	13	Q20-2050-Q50	406	56.13	62.39		59.69	62.51	0.000864	1.56	260.97	64.51	0.24
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q20-2050-Q50	406	56.13	62.27			62.4	0.000948	1.61	253.43	63.45	0.25
Reach-1	11	Q20-2050-Q50	406	56.45	62.23			62.39	0.001247	1.76	231.27	61.94	0.29
Reach-1	10	Q20-2050-Q50	406	57.39	62.18			62.3	0.000866	1.52	268.37	76.02	0.25
Reach-1	9	Q20-2050-Q50	406	57.13	62.16		59.4	62.28	0.003642	1.56	260.13	59.45	0.24
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q20-2050-Q50	406	57.13	62.13			62.25	0.003723	1.57	258.24	59.45	0.24
Reach-1	7	Q20-2050-Q50	406	54.25	62.14			62.19	0.001041	1.06	398.06	92.42	0.15
Reach-1	6	Q20-2050-Q50	406	54.25	61.89			61.98	0.001772	1.33	320.18	98.17	0.19
Reach-1	5	Q20-2050-Q50	476	54.25	61.65			61.73	0.001505	1.25	397.75	113.47	0.18
Reach-1	4	Q20-2050-Q50	476	56.6	60.83		59.78	61.28	0.014245	2.98	159.94	53.72	0.55
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q20-2050-Q50	476	56.4	60.69			61.12	0.013486	2.92	162.93	53.86	0.54
Reach-1	2	Q20-2050-Q50	476	56.18	60.69			60.91	0.003619	2.09	230.76	77.77	0.36
Reach-1	1	Q20-2050-Q50	476	53.33	60.69		56.82	60.78	0.000988	1.31	364.3	89.05	0.2

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Cruée de récurrence 20 ans - Horizon 2050 - Probabilité de non-dépassement de 95%

HEC-RAS Plan	Plan 39	River	RIVER-1	Reach	Reach-1	Profile	Q20-2050 - Q95									
Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crst W/S	E.G Elev	E.G Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl				
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)					
Reach-1	25	Q20-2050 - Q95	427	56.69	62.76		62.78	0.00004	0.74	1161.19	568.76	0.11				
Reach-1	24	Q20-2050 - Q95	427	55.47	62.74		62.77	0.000055	0.88	918.93	405.48	0.12				
Reach-1	23	Q20-2050 - Q95	427	55.01	62.73		62.76	0.000046	0.84	997.08	492.64	0.11				
Reach-1	22	Q20-2050 - Q95	427	51.81	62.72		62.75	0.000033	0.85	919.25	471.44	0.1				
Reach-1	21	Q20-2050 - Q95	427	52.27	62.71		62.74	0.00003	0.74	1113.08	495.11	0.09				
Reach-1	20	Q20-2050 - Q95	427	55.47	62.67		62.72	0.000065	1	652.8	270.95	0.13				
Reach-1	19	Q20-2050 - Q95	427	55.32	62.67		62.71	0.000054	0.9	729.87	284.35	0.12				
Reach-1	18	Q20-2050 - Q95	427	56.5	62.67		62.7	0.000052	0.77	839.3	427.55	0.12				
Reach-1	17	Q20-2050 - Q95	427	56.2	62.67		62.69	0.000042	0.76	1026.66	476.44	0.11				
Reach-1	16	Q20-2050 - Q95	427	54.22	62.67		62.68	0.000023	0.6	1297.2	485.02	0.08				
Reach-1	15	Q20-2050 - Q95	427	54.68	62.64		62.68	0.000048	0.89	902.01	392.27	0.12				
Reach-1	14	Q20-2050 - Q95	427	54.37	62.62		62.67	0.000069	0.99	431.23	84.19	0.14				
Reach-1	13	Q20-2050 - Q95	427	56.13	62.53	59.75	62.66	0.000861	1.59	269.92	65.74	0.24				
Reach-1	12.5		Bridge													
Reach-1	12	Q20-2050 - Q95	427	56.13	62.39		62.52	0.000917	1.64	260.87	64.5	0.25				
Reach-1	11	Q20-2050 - Q95	427	56.45	62.35		62.51	0.00127	1.79	238.52	63.04	0.29				
Reach-1	10	Q20-2050 - Q95	427	57.39	62.3		62.42	0.000871	1.56	277.3	77.95	0.25				
Reach-1	9	Q20-2050 - Q95	427	57.13	62.27	59.46	62.4	0.003728	1.6	266.92	59.48	0.24				
Reach-1	8.5		Bridge													
Reach-1	8	Q20-2050 - Q95	427	57.13	62.24		62.37	0.00381	1.61	264.99	59.47	0.24				
Reach-1	7	Q20-2050 - Q95	427	54.25	62.25		62.31	0.00107	1.09	408.7	93.26	0.15				
Reach-1	6	Q20-2050 - Q95	427	54.25	62		62.1	0.001807	1.36	331.12	103.88	0.19				
Reach-1	5	Q20-2050 - Q95	501	54.25	61.75		61.84	0.001543	1.28	409.45	114.42	0.18				
Reach-1	4	Q20-2050 - Q95	501	56.6	60.89	59.85	61.37	0.014914	3.07	163.02	53.87	0.56				
Reach-1	3.5		Bridge													
Reach-1	3	Q20-2050 - Q95	501	56.4	60.74		61.2	0.014254	3.03	165.54	53.99	0.55				
Reach-1	2	Q20-2050 - Q95	501	56.18	60.74		60.97	0.003825	2.17	234.64	77.88	0.37				
Reach-1	1	Q20-2050 - Q95	501	53.33	60.74	56.9	60.83	0.001066	1.36	368.81	91.4	0.2				

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crue de récurrence 20 ans - Horizon 2080 - Probabilité de non-dépassement de 5%

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 37 Profile	River RIVER-1	Reach Reach-1	Profile Q20-2080-Q5	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W S Elev (m)	Crit W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chal (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # CM
Reach-1	25	Q20-2080-Q5				311	56.69	61.9		61.93	0.000051	0.73	751.35	451.4	0.11
Reach-1	24	Q20-2080-Q5				311	55.47	61.88		61.92	0.000068	0.88	592.02	358.06	0.13
Reach-1	23	Q20-2080-Q5				311	55.01	61.88		61.9	0.000055	0.82	626.18	373.14	0.12
Reach-1	22	Q20-2080-Q5				311	51.81	61.87		61.9	0.000031	0.77	586.8	312.32	0.09
Reach-1	21	Q20-2080-Q5				311	52.27	61.86		61.88	0.000032	0.69	719.13	412.34	0.09
Reach-1	20	Q20-2080-Q5				311	55.47	61.83		61.87	0.000067	0.92	442.2	221.26	0.13
Reach-1	19	Q20-2080-Q5				311	55.32	61.82		61.85	0.000058	0.82	512.62	222.91	0.12
Reach-1	18	Q20-2080-Q5				311	56.5	61.82		61.84	0.000064	0.74	551.64	248.74	0.12
Reach-1	17	Q20-2080-Q5				311	56.2	61.81		61.83	0.000049	0.72	671.71	351.44	0.11
Reach-1	16	Q20-2080-Q5				311	54.22	61.81		61.83	0.000024	0.55	903.72	429.4	0.08
Reach-1	15	Q20-2080-Q5				311	54.68	61.79		61.82	0.00005	0.82	600.96	324.99	0.12
Reach-1	14	Q20-2080-Q5				311	54.37	61.77		61.81	0.000056	0.85	365.9	74.02	0.12
Reach-1	13	Q20-2080-Q5				311	56.13	61.7	59.39	61.8	0.000899	1.42	218.39	59.98	0.24
Reach-1	12.5														
Reach-1	12	Q20-2080-Q5				311	56.13	61.69		61.8	0.000902	1.43	218.15	59.98	0.24
Reach-1	11	Q20-2080-Q5				311	56.45	61.66		61.79	0.001183	1.58	196.9	58.97	0.28
Reach-1	10	Q20-2080-Q5				311	57.39	61.61		61.7	0.000844	1.37	227.39	67.2	0.24
Reach-1	9	Q20-2080-Q5				311	57.13	61.59	59.1	61.69	0.003255	1.37	226.41	59.33	0.22
Reach-1	8.5														
Reach-1	8	Q20-2080-Q5				311	57.13	61.56		61.66	0.003329	1.38	224.75	59.32	0.23
Reach-1	7	Q20-2080-Q5				311	54.25	61.57		61.61	0.000895	0.92	346.66	88.26	0.14
Reach-1	6	Q20-2080-Q5				311	54.25	61.36		61.43	0.001537	1.16	274.41	75.48	0.17
Reach-1	5	Q20-2080-Q5				365	54.25	61.15		61.21	0.001308	1.08	342.14	107.36	0.17
Reach-1	4	Q20-2080-Q5				365	56.6	60.52	59.42	60.85	0.011665	2.55	143.09	52.88	0.49
Reach-1	3.5														
Reach-1	3	Q20-2080-Q5				365	56.4	60.4		60.71	0.010602	2.47	147.75	53.11	0.47
Reach-1	2	Q20-2080-Q5				365	56.18	60.4		60.55	0.002826	1.75	209.2	70.54	0.31
Reach-1	1	Q20-2080-Q5				365	53.33	60.4	56.39	60.46	0.000677	1.07	340.46	75.85	0.16

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Cruée de récurrence 20 ans - Horizon 2080 - Probabilité de non-dépassement de 50%

HEC-RAS	Plan	Plan 37	River	RIVER-1	Reach	Reach-1	Profile	Q20-2080 - Q50								
Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W S Elev	Cnt W S	E G Elev	E G Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #	Chl			
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)					
Reach-1	25	Q20-2080 - Q50	414	56.69	62.67		62.69	0.00004	0.73	1114.42	522.71	0.1				
Reach-1	24	Q20-2080 - Q50	414	55.47	62.65		62.68	0.000056	0.88	884.02	400.68	0.12				
Reach-1	23	Q20-2080 - Q50	414	55.01	62.65		62.67	0.000047	0.84	954.89	480.55	0.11				
Reach-1	22	Q20-2080 - Q50	414	51.81	62.64		62.67	0.000033	0.84	879.33	454.09	0.1				
Reach-1	21	Q20-2080 - Q50	414	52.27	62.63		62.65	0.000031	0.74	1070.35	493.04	0.09				
Reach-1	20	Q20-2080 - Q50	414	55.47	62.59		62.63	0.000065	1	629.59	268.02	0.13				
Reach-1	19	Q20-2080 - Q50	414	55.32	62.59		62.62	0.000054	0.89	705.57	279.7	0.12				
Reach-1	18	Q20-2080 - Q50	414	56.5	62.59		62.61	0.000053	0.77	802.48	423.75	0.12				
Reach-1	17	Q20-2080 - Q50	414	56.2	62.58		62.6	0.000042	0.75	985.95	463.82	0.11				
Reach-1	16	Q20-2080 - Q50	414	54.22	62.58		62.6	0.000023	0.6	1255.39	481.13	0.08				
Reach-1	15	Q20-2080 - Q50	414	54.68	62.56		62.59	0.000048	0.88	868.7	378.62	0.12				
Reach-1	14	Q20-2080 - Q50	414	54.37	62.53		62.58	0.000068	0.98	424.25	80.09	0.14				
Reach-1	13	Q20-2080 - Q50	414	56.13	62.44	59.72	62.57	0.000062	1.57	264.47	64.99	0.24				
Reach-1	12.5		Bridge													
Reach-1	12	Q20-2080 - Q50	414	56.13	62.32		62.45	0.000951	1.62	256.37	63.87	0.25				
Reach-1	11	Q20-2080 - Q50	414	56.45	62.28		62.44	0.001254	1.77	234.13	62.38	0.29				
Reach-1	10	Q20-2080 - Q50	414	57.39	62.23		62.35	0.000867	1.53	271.89	76.79	0.25				
Reach-1	9	Q20-2080 - Q50	414	57.13	62.2	59.43	62.33	0.001671	1.58	262.83	59.46	0.24				
Reach-1	8.5		Bridge													
Reach-1	8	Q20-2080 - Q50	414	57.13	62.17		62.3	0.003752	1.59	260.93	59.46	0.24				
Reach-1	7	Q20-2080 - Q50	414	54.25	62.18		62.24	0.001051	1.07	402.28	92.76	0.15				
Reach-1	6	Q20-2080 - Q50	414	54.25	61.94		62.03	0.001783	1.34	324.49	100.46	0.19				
Reach-1	5	Q20-2080 - Q50	486	54.25	61.69		61.77	0.001521	1.26	402.44	113.85	0.18				
Reach-1	4	Q20-2080 - Q50	486	56.6	60.85	59.81	61.32	0.014515	3.02	161.18	53.78	0.56				
Reach-1	3.5		Bridge													
Reach-1	3	Q20-2080 - Q50	486	56.4	60.71		61.15	0.013794	2.96	163.98	53.92	0.54				
Reach-1	2	Q20-2080 - Q50	486	56.18	60.71		60.93	0.003702	2.12	232.32	77.82	0.36				
Reach-1	1	Q20-2080 - Q50	486	53.33	60.71	56.86	60.8	0.001019	1.33	366.1	89.99	0.2				

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crue de récurrence 20 ans - Horizon 2080 - Probabilité de non-dépassement de 95%

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 37 Profile	RIVER-1 Profile	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Profile W S Elev (m)	Q20-2080 - Q95 Crit W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach-1	25	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	56.69	62.76		62.78	0.00004	0.74	1164.48	571.85	0.11
Reach-1	24	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	55.47	62.74		62.77	0.000055	0.88	921.28	405.8	0.12
Reach-1	23	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	55.01	62.74		62.77	0.000046	0.84	999.95	493.45	0.11
Reach-1	22	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	51.81	62.73		62.76	0.000033	0.85	921.98	472.6	0.1
Reach-1	21	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	52.27	62.72		62.74	0.00003	0.74	1115.94	495.25	0.09
Reach-1	20	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	55.47	62.68		62.73	0.000065	1	654.35	271.14	0.13
Reach-1	19	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	55.32	62.68		62.71	0.000054	0.9	731.5	284.66	0.12
Reach-1	18	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	56.5	62.68		62.7	0.000052	0.77	841.76	427.8	0.12
Reach-1	17	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	56.2	62.67		62.7	0.000042	0.76	1029.41	477.28	0.11
Reach-1	16	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	54.22	62.67		62.69	0.000023	0.6	1300	485.28	0.08
Reach-1	15	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	54.68	62.65		62.68	0.000048	0.89	904.26	393.17	0.12
Reach-1	14	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	54.37	62.62		62.67	0.000069	0.99	431.7	84.49	0.14
Reach-1	13	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	56.13	62.53	59.76	62.66	0.000862	1.59	270.28	65.79	0.24
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	56.13	62.39		62.53	0.000958	1.65	261.16	64.54	0.25
Reach-1	11	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	56.45	62.35		62.52	0.001272	1.79	238.8	63.09	0.29
Reach-1	10	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	57.39	62.3		62.43	0.000872	1.56	277.64	78.02	0.25
Reach-1	9	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	57.13	62.28	59.47	62.41	0.003735	1.6	267.17	59.48	0.24
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	57.13	62.24		62.38	0.003817	1.61	265.24	59.47	0.24
Reach-1	7	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	54.25	62.26		62.32	0.001072	1.09	409.1	93.3	0.15
Reach-1	6	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	428	54.25	62.01		62.3	0.00181	1.37	331.51	104.08	0.19
Reach-1	5	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	502	54.25	61.76		61.84	0.001546	1.28	409.83	114.45	0.18
Reach-1	4	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	502	56.6	60.89	59.85	61.37	0.014964	3.08	163.06	53.87	0.56
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	502	56.4	60.74		61.2	0.014312	3.03	165.54	53.99	0.55
Reach-1	2	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	502	56.18	60.74		60.98	0.00384	2.17	234.64	77.88	0.37
Reach-1	1	Q20-2080 - Q95	Q20-2080 - Q95	502	53.33	60.74	56.91	60.84	0.00107	1.37	368.81	91.4	0.2

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Cruet de recurrence 100 ans - Horizon 2020 - Probabilité de non-dépassement de 5%

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 40 Profile	River RIVER-1	Reach-1 Q Total (m ³ /s)	Profile Min Ch El (m)	Q100-2020-Q5 W S Elev (m)	Crit W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Froude # CM
Reach-1	25	Q100-2020-Q5		434	56.69	62.8		62.82	0.00004	0.74	1188.3	593.82	0.11
Reach-1	24	Q100-2020-Q5		434	55.47	62.78		62.82	0.000054	0.88	938.07	408.08	0.12
Reach-1	23	Q100-2020-Q5		434	55.01	62.78		62.81	0.000046	0.84	1020.45	499.21	0.11
Reach-1	22	Q100-2020-Q5		434	51.81	62.77		62.8	0.000033	0.85	941.59	480.88	0.1
Reach-1	21	Q100-2020-Q5		434	52.27	62.76		62.78	0.00003	0.74	1136.39	496.24	0.09
Reach-1	20	Q100-2020-Q5		434	55.47	62.72		62.77	0.000065	1.01	665.53	272.54	0.13
Reach-1	19	Q100-2020-Q5		434	55.32	62.72		62.76	0.000054	0.9	743.26	286.88	0.12
Reach-1	18	Q100-2020-Q5		434	56.5	62.72		62.74	0.000051	0.77	859.47	429.62	0.12
Reach-1	17	Q100-2020-Q5		434	56.2	62.71		62.74	0.000042	0.76	1049.27	483.3	0.11
Reach-1	16	Q100-2020-Q5		434	54.22	62.71		62.73	0.000023	0.61	1320.1	487.14	0.08
Reach-1	15	Q100-2020-Q5		434	54.68	62.69		62.72	0.000048	0.89	920.64	399.7	0.12
Reach-1	14	Q100-2020-Q5		434	54.37	62.66		62.71	0.000069	1	435.19	86.64	0.14
Reach-1	13	Q100-2020-Q5		434	56.13	62.57	59.77	62.7	0.000086	1.6	272.92	66.15	0.24
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q100-2020-Q5		434	56.13	62.42		62.56	0.00096	1.66	263.34	64.84	0.25
Reach-1	11	Q100-2020-Q5		434	56.45	62.39		62.55	0.001277	1.8	240.93	63.41	0.29
Reach-1	10	Q100-2020-Q5		434	57.39	62.34		62.46	0.000873	1.57	280.28	78.58	0.25
Reach-1	9	Q100-2020-Q5		434	57.13	62.31	59.49	62.44	0.003756	1.61	269.14	59.48	0.24
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q100-2020-Q5		434	57.13	62.28		62.41	0.003839	1.62	267.2	59.48	0.24
Reach-1	7	Q100-2020-Q5		434	54.25	62.29		62.35	0.00108	1.09	412.21	93.54	0.15
Reach-1	6	Q100-2020-Q5		434	54.25	62.04		62.13	0.001817	1.37	334.85	105.76	0.19
Reach-1	5	Q100-2020-Q5		509	54.25	61.79		61.87	0.001553	1.29	413.35	114.73	0.18
Reach-1	4	Q100-2020-Q5		509	56.6	60.91	59.87	61.4	0.015074	3.1	164.19	53.93	0.57
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q100-2020-Q5		509	56.4	60.75		61.23	0.014441	3.06	166.59	54.04	0.56
Reach-1	2	Q100-2020-Q5		509	56.18	60.76		61	0.003874	2.19	236.21	77.92	0.37
Reach-1	1	Q100-2020-Q5		509	53.33	60.76	56.93	60.86	0.001089	1.38	370.66	92.34	0.21

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Cruée de récurrence 100 ans - Horizon 2020 - Probabilité de non-dépassement de 50%

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 40 Profile	River RIVER-1	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Profile W S Elev (m)	Q100-2020-Q50 Crit W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chol (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Froude # Chl
Reach-1	25	Q100-2020-Q50		447	56.69	62.89		62.91	0.00004	0.75	1242.27	640.8	0.1
Reach-1	24	Q100-2020-Q50		447	55.47	62.87		62.9	0.000053	0.89	974.22	412.96	0.12
Reach-1	23	Q100-2020-Q50		447	55.01	62.87		62.89	0.000045	0.84	1065.03	511.52	0.11
Reach-1	22	Q100-2020-Q50		447	51.81	62.86		62.89	0.000033	0.86	994.62	498.56	0.1
Reach-1	21	Q100-2020-Q50		447	52.27	62.85		62.87	0.00003	0.74	1180.19	498.36	0.09
Reach-1	20	Q100-2020-Q50		447	55.47	62.81		62.86	0.000064	1.01	689.6	275.53	0.13
Reach-1	19	Q100-2020-Q50		447	55.32	62.81		62.84	0.000054	0.91	768.67	291.63	0.12
Reach-1	18	Q100-2020-Q50		447	56.5	62.81		62.83	0.00005	0.77	897.54	433.5	0.12
Reach-1	17	Q100-2020-Q50		447	56.2	62.8		62.83	0.000041	0.76	1092.53	496.16	0.11
Reach-1	16	Q100-2020-Q50		447	54.22	62.8		62.82	0.000022	0.61	1363.28	491.11	0.08
Reach-1	15	Q100-2020-Q50		447	54.68	62.78		62.81	0.000048	0.9	956.37	410.47	0.12
Reach-1	14	Q100-2020-Q50		447	54.37	62.75		62.8	0.00007	1.01	442.91	91.23	0.14
Reach-1	13	Q100-2020-Q50		447	56.13	62.66	59.81	62.79	0.000856	1.62	278.6	66.92	0.24
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q100-2020-Q50		447	56.13	62.5		62.64	0.000965	1.68	267.98	65.48	0.25
Reach-1	11	Q100-2020-Q50		447	56.45	62.46		62.63	0.001288	1.82	245.46	64.08	0.3
Reach-1	10	Q100-2020-Q50		447	57.39	62.41		62.54	0.000875	1.58	285.92	79.76	0.25
Reach-1	9	Q100-2020-Q50		447	57.13	62.38	59.53	62.51	0.003805	1.64	273.31	59.5	0.24
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q100-2020-Q50		447	57.13	62.35		62.48	0.003889	1.65	271.34	59.49	0.25
Reach-1	7	Q100-2020-Q50		447	54.25	62.36		62.42	0.001096	1.11	419.15	106.71	0.15
Reach-1	6	Q100-2020-Q50		447	54.25	62.31		62.2	0.001833	1.39	342.07	109.3	0.19
Reach-1	5	Q100-2020-Q50		525	54.25	61.85		61.94	0.001576	1.31	420.7	115.32	0.19
Reach-1	4	Q100-2020-Q50		525	56.6	60.94	59.92	61.45	0.015514	3.16	166.04	54.02	0.58
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q100-2020-Q50		525	56.4	60.78		61.28	0.014955	3.12	168.11	54.12	0.57
Reach-1	2	Q100-2020-Q50		525	56.18	60.79		61.04	0.00401	2.24	238.49	77.99	0.38
Reach-1	1	Q100-2020-Q50		525	53.33	60.79	56.98	60.89	0.00114	1.41	373.44	93.75	0.21

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crue de récurrence 100 ans - Horizon 2020 - Probabilité de non-dépassement de 95%

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 40 Profile	River RIVER-1	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Profile W S Elev (m)	Q100-2020-Q95 Crit W S (m)	E.G Elev (m)	E.G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Froude # CH
Reach-1	25	Q100-2020-Q95		496	56.69	63.21		63.23	0.000036	0.74	1460.88	700	0.1
Reach-1	24	Q100-2020-Q95		496	55.47	63.19		63.22	0.000049	0.88	1107.04	420	0.12
Reach-1	23	Q100-2020-Q95		496	55.01	63.19		63.21	0.000041	0.84	1232.36	530	0.11
Reach-1	22	Q100-2020-Q95		496	51.81	63.17		63.2	0.000032	0.87	1149.94	527.67	0.1
Reach-1	21	Q100-2020-Q95		496	52.27	63.17		63.19	0.000029	0.75	1339.4	502.66	0.09
Reach-1	20	Q100-2020-Q95		496	55.47	63.13		63.17	0.000063	1.04	778.31	282.51	0.13
Reach-1	19	Q100-2020-Q95		496	55.32	63.12		63.16	0.000052	0.93	863.39	302.5	0.12
Reach-1	18	Q100-2020-Q95		496	56.5	63.12		63.15	0.000047	0.78	1037.31	442.5	0.11
Reach-1	17	Q100-2020-Q95		496	56.2	63.12		63.14	0.000039	0.77	1256.89	525	0.1
Reach-1	16	Q100-2020-Q95		496	54.22	63.12		63.14	0.000022	0.62	1521.53	500	0.08
Reach-1	15	Q100-2020-Q95		496	54.68	63.09		63.13	0.000047	0.92	1088.89	419.4	0.12
Reach-1	14	Q100-2020-Q95		496	54.37	63.06		63.12	0.000072	1.06	475.26	123.53	0.14
Reach-1	13	Q100-2020-Q95		496	56.13	62.96	59.95	63.11	0.000848	1.68	299.59	69.67	0.24
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q100-2020-Q95		496	56.13	62.74		62.9	0.000989	1.76	284.58	67.71	0.26
Reach-1	11	Q100-2020-Q95		496	56.45	62.71		62.89	0.001337	1.9	261.73	66.46	0.3
Reach-1	10	Q100-2020-Q95		496	57.39	62.66		62.8	0.000887	1.65	306.27	82.8	0.25
Reach-1	9	Q100-2020-Q95		496	57.13	62.62	59.67	62.77	0.00416	1.72	288.65	62.6	0.26
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q100-2020-Q95		496	57.13	62.59		62.74	0.004267	1.73	286.35	62.6	0.26
Reach-1	7	Q100-2020-Q95		496	54.25	62.61		62.67	0.00115	1.17	456.88	159.9	0.16
Reach-1	6	Q100-2020-Q95		496	54.25	62.34		62.44	0.0019	1.46	368.82	121.16	0.2
Reach-1	5	Q100-2020-Q95		582	54.25	62.07		62.17	0.00165	1.38	446.39	117.35	0.19
Reach-1	4	Q100-2020-Q95		582	56.6	61.05	60.1	61.64	0.017176	3.38	172.02	54.31	0.61
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q100-2020-Q95		582	56.4	60.87		61.45	0.016957	3.37	172.77	54.35	0.6
Reach-1	2	Q100-2020-Q95		582	56.18	60.88		61.17	0.004537	2.42	245.5	78.18	0.4
Reach-1	1	Q100-2020-Q95		582	53.33	60.88	57.14	61	0.001336	1.54	382.09	97.99	0.23

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crué de recurrence 100 ans - Horizon 2050 - Probabilité de non-dépassement de 5%

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 41 River Sta	River Profile	RIVER-1 Profile	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Profile W S Elev (m)	Q100-2050-Q5 Crit W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chel (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Froude # CM
Reach-1	25		Q100-2050-Q5		425	56.69	62.74		62.76	0.00004	0.74	1154.69	562.58	0.1
Reach-1	24		Q100-2050-Q5		425	55.47	62.73		62.76	0.000055	0.88	914.24	404.84	0.12
Reach-1	23		Q100-2050-Q5		425	55.01	62.72		62.75	0.000046	0.84	991.38	491.03	0.11
Reach-1	22		Q100-2050-Q5		425	51.81	62.71		62.74	0.000033	0.85	913.84	469.12	0.1
Reach-1	21		Q100-2050-Q5		425	52.27	62.7		62.72	0.00003	0.74	1107.37	494.84	0.09
Reach-1	20		Q100-2050-Q5		425	55.47	62.66		62.71	0.000065	1	649.7	270.56	0.13
Reach-1	19		Q100-2050-Q5		425	55.32	62.66		62.7	0.000054	0.89	726.62	283.74	0.12
Reach-1	18		Q100-2050-Q5		425	56.5	62.66		62.69	0.000052	0.77	834.39	427.05	0.12
Reach-1	17		Q100-2050-Q5		425	56.2	62.66		62.68	0.000042	0.75	1021.2	474.76	0.11
Reach-1	16		Q100-2050-Q5		425	54.22	62.66		62.67	0.000023	0.6	1291.63	484.51	0.08
Reach-1	15		Q100-2050-Q5		425	54.68	62.63		62.66	0.000048	0.89	897.53	390.46	0.12
Reach-1	14		Q100-2050-Q5		425	54.37	62.61		62.65	0.000068	0.99	430.29	83.59	0.14
Reach-1	13		Q100-2050-Q5		425	56.13	62.51	59.75	62.65	0.000086	1.59	269.2	65.64	0.24
Reach-1	12.5			Bridge										
Reach-1	12		Q100-2050-Q5		425	56.13	62.38		62.51	0.000955	1.64	260.3	64.42	0.25
Reach-1	11		Q100-2050-Q5		425	56.45	62.34		62.5	0.001266	1.79	237.97	62.96	0.29
Reach-1	10		Q100-2050-Q5		425	57.39	62.29		62.41	0.000869	1.55	276.62	77.8	0.25
Reach-1	9		Q100-2050-Q5		425	57.13	62.26	59.46	62.39	0.003714	1.6	266.41	59.47	0.24
Reach-1	8.5			Bridge										
Reach-1	8		Q100-2050-Q5		425	57.13	62.23		62.36	0.003796	1.61	264.49	59.47	0.24
Reach-1	7		Q100-2050-Q5		425	54.25	62.24		62.3	0.001066	1.08	407.91	93.2	0.15
Reach-1	6		Q100-2050-Q5		425	54.25	62		62.09	0.0018	1.36	330.34	103.48	0.19
Reach-1	5		Q100-2050-Q5		499	54.25	61.75		61.83	0.001539	1.28	408.67	114.35	0.18
Reach-1	4		Q100-2050-Q5		499	56.6	60.89	59.84	61.36	0.014814	3.06	162.95	53.86	0.56
Reach-1	3.5			Bridge										
Reach-1	3		Q100-2050-Q5		499	56.4	60.74		61.2	0.01414	3.01	165.54	53.99	0.55
Reach-1	2		Q100-2050-Q5		499	56.18	60.74		60.97	0.001794	2.16	234.65	77.88	0.37
Reach-1	1		Q100-2050-Q5		499	53.33	60.74	56.9	60.83	0.001058	1.36	368.81	91.4	0.2

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crue de récurrence 100 ans - Horizon 2050 - Probabilité de non-dépassement de 50%

HEC-RAS Plan	Plan 41	River RIVER-1	Reach Reach-1	Profile Q100-2050-Q50	Q Total	Min Ch El	W S Elev	Crit W S	E G Elev	E G Slope	Vel Chel	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
Reach	River Sta	Profile	(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)		
Reach-1	25	Q100-2050-Q50	508	56.69	63.28				63.3	0.000035	0.73	1513.95	700	0.1
Reach-1	24	Q100-2050-Q50	508	55.47	63.27				63.29	0.000048	0.88	1138.86	420	0.12
Reach-1	23	Q100-2050-Q50	508	55.01	63.26				63.29	0.00004	0.83	1272.63	530	0.11
Reach-1	22	Q100-2050-Q50	508	51.81	63.25				63.28	0.000031	0.87	1190.02	527.77	0.1
Reach-1	21	Q100-2050-Q50	508	52.27	63.24				63.26	0.000029	0.76	1377.58	502.97	0.09
Reach-1	20	Q100-2050-Q50	508	55.47	63.2				63.25	0.000062	1.04	799.73	282.81	0.13
Reach-1	19	Q100-2050-Q50	508	55.32	63.2				63.24	0.000052	0.93	886.33	302.8	0.12
Reach-1	18	Q100-2050-Q50	508	56.5	63.2				63.23	0.000046	0.78	1070.99	442.8	0.11
Reach-1	17	Q100-2050-Q50	508	56.2	63.2				63.22	0.000038	0.77	1296.91	525	0.1
Reach-1	16	Q100-2050-Q50	508	54.22	63.2				63.21	0.000022	0.63	1559.6	500	0.08
Reach-1	15	Q100-2050-Q50	508	54.68	63.17				63.21	0.000046	0.92	1120.87	419.4	0.12
Reach-1	14	Q100-2050-Q50	508	54.37	63.14				63.2	0.000072	1.07	484.96	135.23	0.14
Reach-1	13	Q100-2050-Q50	508	56.13	63.04			59.99	63.19	0.000845	1.7	304.73	70	0.24
Reach-1	12.5		Bridge											
Reach-1	12	Q100-2050-Q50	508	56.13	62.8				62.96	0.000995	1.78	288.53	68.23	0.26
Reach-1	11	Q100-2050-Q50	508	56.45	62.77				62.95	0.001348	1.92	265.62	67.01	0.3
Reach-1	10	Q100-2050-Q50	508	57.39	62.72				62.86	0.00089	1.67	311.09	82.8	0.25
Reach-1	9	Q100-2050-Q50	508	57.13	62.68			59.7	62.83	0.004196	1.74	292.23	62.6	0.26
Reach-1	8.5		Bridge											
Reach-1	8	Q100-2050-Q50	508	57.13	62.64				62.8	0.004303	1.75	289.91	62.6	0.26
Reach-1	7	Q100-2050-Q50	508	54.25	62.66				62.73	0.001161	1.18	466.16	161.22	0.16
Reach-1	6	Q100-2050-Q50	508	54.25	62.39				62.5	0.001912	1.47	375.52	121.32	0.2
Reach-1	5	Q100-2050-Q50	596	54.25	62.13				62.22	0.001667	1.4	452.6	117.84	0.19
Reach-1	4	Q100-2050-Q50	596	56.6	61.08			60.14	61.68	0.017603	3.44	173.36	54.37	0.61
Reach-1	3.5		Bridge											
Reach-1	3	Q100-2050-Q50	596	56.4	60.89				61.49	0.017478	3.43	173.78	54.4	0.61
Reach-1	2	Q100-2050-Q50	596	56.18	60.9				61.2	0.004674	2.46	247.04	78.22	0.41
Reach-1	1	Q100-2050-Q50	596	53.33	60.9			57.2	61.02	0.001187	1.57	384.04	98.92	0.23

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Cru de recurrence 100 ans - Horizon 2050 - Probabilité de non-dépassement de 95%

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 41 Profile	River RIVER-1	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Profile W S Elev (m)	Q100-2050-Q95 Crit W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach-1	25	Q100-2050-Q95		551	56.69	63.59		63.61	0.00003	0.71	1731.31	700	0.09
Reach-1	24	Q100-2050-Q95		551	55.47	63.58		63.6	0.000044	0.87	1269.41	420	0.11
Reach-1	23	Q100-2050-Q95		551	55.01	63.57		63.6	0.000036	0.81	1437.84	530	0.1
Reach-1	22	Q100-2050-Q95		551	51.81	63.56		63.59	0.000029	0.86	1354.82	528.17	0.1
Reach-1	21	Q100-2050-Q95		551	52.27	63.55		63.58	0.000027	0.76	1534.8	504.22	0.09
Reach-1	20	Q100-2050-Q95		551	55.47	63.51		63.56	0.000059	1.05	888.35	284.06	0.13
Reach-1	19	Q100-2050-Q95		551	55.32	63.51		63.55	0.000049	0.94	981.26	304.05	0.12
Reach-1	18	Q100-2050-Q95		551	56.5	63.51		63.54	0.000042	0.78	1210.15	444.06	0.11
Reach-1	17	Q100-2050-Q95		551	56.2	63.51		63.53	0.000035	0.76	1462.06	525	0.1
Reach-1	16	Q100-2050-Q95		551	54.22	63.51		63.53	0.000021	0.63	1716.71	500	0.08
Reach-1	15	Q100-2050-Q95		551	54.68	63.49		63.52	0.000043	0.92	1253.14	419.4	0.11
Reach-1	14	Q100-2050-Q95		551	54.17	63.45		63.51	0.000071	1.1	530.52	153.27	0.14
Reach-1	13	Q100-2050-Q95		551	56.13	63.35	60.1	63.5	0.00081	1.73	326.35	70	0.24
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q100-2050-Q95		551	56.13	63.05		63.22	0.000986	1.83	305.64	70	0.26
Reach-1	11	Q100-2050-Q95		551	56.45	63.01		63.21	0.001335	1.96	282.65	68.96	0.3
Reach-1	10	Q100-2050-Q95		551	57.39	62.97		63.12	0.00087	1.71	331.96	82.8	0.25
Reach-1	9	Q100-2050-Q95		551	57.13	62.93	59.81	63.09	0.004188	1.79	307.8	62.6	0.26
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q100-2050-Q95		551	57.13	62.84		63.01	0.004431	1.82	302.35	62.6	0.26
Reach-1	7	Q100-2050-Q95		551	54.25	62.87		62.94	0.001185	1.22	499.14	163.76	0.16
Reach-1	6	Q100-2050-Q95		551	54.25	62.59		62.7	0.001946	1.52	399.26	121.89	0.2
Reach-1	5	Q100-2050-Q95		647	54.25	62.31		62.42	0.001723	1.45	474.84	119.56	0.2
Reach-1	4	Q100-2050-Q95		647	56.6	61.16	60.28	61.83	0.019323	3.64	177.59	54.58	0.64
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q100-2050-Q95		647	56.4	60.93		61.62	0.019751	3.67	176.27	54.52	0.65
Reach-1	2	Q100-2050-Q95		647	56.18	60.94		61.3	0.005268	2.63	250.9	78.33	0.43
Reach-1	1	Q100-2050-Q95		647	53.33	60.95	57.32	61.09	0.001591	1.68	389.04	101.05	0.25

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Cru de récurrence 100 ans - Horizon 2080 - Probabilité de non-dépassement de 5%

HEC-RAS Reach	Plan 32 River Sta	River RIVER-1 Profile	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Profile Q100 - 2080 - Q5 W S Elev (m)	Cnt W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach-1	25	Q100 - 2080 - Q5	379	56.69	62.39		62.41	0.000044	0.73	975.18	470.62	0.11
Reach-1	24	Q100 - 2080 - Q5	379	55.47	62.37		62.4	0.000061	0.89	772.65	384.98	0.13
Reach-1	23	Q100 - 2080 - Q5	379	55.01	62.36		62.39	0.000051	0.84	824.05	440.94	0.12
Reach-1	22	Q100 - 2080 - Q5	379	51.81	62.35		62.38	0.000033	0.83	758.84	400.22	0.1
Reach-1	21	Q100 - 2080 - Q5	379	52.27	62.34		62.37	0.000032	0.75	932.74	470.99	0.09
Reach-1	20	Q100 - 2080 - Q5	379	55.47	62.31		62.35	0.000068	0.98	555.65	251.93	0.14
Reach-1	19	Q100 - 2080 - Q5	379	55.32	62.3		62.34	0.000057	0.88	628.82	259.89	0.12
Reach-1	18	Q100 - 2080 - Q5	379	56.5	62.3		62.33	0.000058	0.77	689.41	352.51	0.12
Reach-1	17	Q100 - 2080 - Q5	379	56.2	62.29		62.32	0.000046	0.75	859.42	422.67	0.11
Reach-1	16	Q100 - 2080 - Q5	379	54.22	62.3		62.31	0.000024	0.59	1120.34	464.2	0.08
Reach-1	15	Q100 - 2080 - Q5	379	54.68	62.27		62.3	0.00005	0.87	764.86	354.21	0.12
Reach-1	14	Q100 - 2080 - Q5	379	54.37	62.25		62.29	0.000065	0.94	401.98	77.83	0.13
Reach-1	13	Q100 - 2080 - Q5	379	56.13	62.16	59.6	62.28	0.000901	1.54	246.64	62.49	0.24
Reach-1	12.5		Bridge									
Reach-1	12	Q100 - 2080 - Q5	379	56.13	62.12		62.24	0.000935	1.56	243.85	62.08	0.25
Reach-1	11	Q100 - 2080 - Q5	379	56.45	62.08		62.23	0.001213	1.71	222.02	60.5	0.28
Reach-1	10	Q100 - 2080 - Q5	379	57.39	62.03		62.14	0.000858	1.48	257.07	73.51	0.24
Reach-1	9	Q100 - 2080 - Q5	379	57.13	62.01	59.32	62.12	0.003523	1.51	251.28	59.42	0.23
Reach-1	8.5		Bridge									
Reach-1	8	Q100 - 2080 - Q5	379	57.13	61.98		62.09	0.003601	1.52	249.47	59.41	0.24
Reach-1	7	Q100 - 2080 - Q5	379	54.25	61.99		62.04	0.001	1.02	384.36	91.33	0.14
Reach-1	6	Q100 - 2080 - Q5	379	54.25	61.75		61.84	0.001716	1.29	306.98	90.8	0.19
Reach-1	5	Q100 - 2080 - Q5	445	54.25	61.52		61.59	0.001455	1.2	382.86	112.26	0.18
Reach-1	4	Q100 - 2080 - Q5	445	56.6	60.75	59.68	61.17	0.013468	2.86	155.76	53.51	0.53
Reach-1	3.5		Bridge									
Reach-1	3	Q100 - 2080 - Q5	445	56.4	60.62		61.02	0.012606	2.79	159.27	53.68	0.52
Reach-1	2	Q100 - 2080 - Q5	445	56.18	60.62		60.82	0.003381	1.99	225.37	76.53	0.34
Reach-1	1	Q100 - 2080 - Q5	445	53.33	60.62	56.7	60.7	0.000896	1.24	358.2	85.77	0.19

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crue de récurrence 100 ans - Horizon 2080 - Probabilité de non-dépassement de 50%

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 32 Profile	River RIVER-1	Reach Reach-1	Profile Q100 - 2080 - Q5	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W S Elev (m)	Crit W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chel (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach-1	25	Q100 - 2080 - Q50		514		56.69	63.32			63.34	0.000034	0.73	1541.07	700	0.1
Reach-1	24	Q100 - 2080 - Q50		514		55.47	63.3			63.33	0.000048	0.88	1155.12	420	0.12
Reach-1	23	Q100 - 2080 - Q50		514		55.01	63.3			63.32	0.00004	0.83	1293.21	530	0.11
Reach-1	22	Q100 - 2080 - Q50		514		51.81	63.29			63.32	0.000031	0.87	1210.52	527.82	0.1
Reach-1	21	Q100 - 2080 - Q50		514		52.27	63.28			63.3	0.000028	0.76	1397.12	503.12	0.09
Reach-1	20	Q100 - 2080 - Q50		514		55.47	63.24			63.29	0.000062	1.05	810.7	282.96	0.13
Reach-1	19	Q100 - 2080 - Q50		514		55.32	63.24			63.28	0.000052	0.93	898.08	302.96	0.12
Reach-1	18	Q100 - 2080 - Q50		514		56.5	63.24			63.27	0.000046	0.78	1088.22	442.96	0.11
Reach-1	17	Q100 - 2080 - Q50		514		56.2	63.24			63.26	0.000038	0.77	1317.39	525	0.1
Reach-1	16	Q100 - 2080 - Q50		514		54.22	63.24			63.25	0.000022	0.63	1579.08	500	0.08
Reach-1	15	Q100 - 2080 - Q50		514		54.68	63.21			63.25	0.000046	0.93	1137.24	419.4	0.12
Reach-1	14	Q100 - 2080 - Q50		514		54.37	63.18			63.23	0.000072	1.08	499.27	141.23	0.14
Reach-1	13	Q100 - 2080 - Q50		514		56.13	63.07		60	63.22	0.000843	1.7	307.38	70	0.24
Reach-1	12.5	Q100 - 2080 - Q50	Bridge												
Reach-1	12	Q100 - 2080 - Q50		514		56.13	62.83			63	0.000997	1.79	290.57	68.5	0.26
Reach-1	11	Q100 - 2080 - Q50		514		56.45	62.8			62.98	0.001353	1.93	267.63	67.3	0.3
Reach-1	10	Q100 - 2080 - Q50		514		57.39	62.75			62.89	0.000891	1.68	313.57	82.8	0.25
Reach-1	9	Q100 - 2080 - Q50		514		57.13	62.71		59.72	62.87	0.004211	1.75	294.07	62.6	0.26
Reach-1	8.5	Q100 - 2080 - Q50	Bridge												
Reach-1	8	Q100 - 2080 - Q50		514		57.13	62.67			62.83	0.004318	1.76	291.75	62.6	0.26
Reach-1	7	Q100 - 2080 - Q50		514		54.25	62.69			62.76	0.001165	1.18	470.98	161.9	0.16
Reach-1	6	Q100 - 2080 - Q50		514		54.25	62.42			62.53	0.001916	1.48	379.02	121.41	0.2
Reach-1	5	Q100 - 2080 - Q50		604		54.25	62.15			62.25	0.001679	1.41	455.82	118.09	0.19
Reach-1	4	Q100 - 2080 - Q50		604		56.6	61.09		60.16	61.7	0.017982	3.48	173.68	54.39	0.62
Reach-1	3.5	Q100 - 2080 - Q50	Bridge												
Reach-1	3	Q100 - 2080 - Q50		604		56.4	60.89			61.5	0.017957	3.48	173.76	54.39	0.62
Reach-1	2	Q100 - 2080 - Q50		604		56.18	60.89			61.21	0.004801	2.49	247.03	78.22	0.41
Reach-1	1	Q100 - 2080 - Q50		604		53.33	60.9		57.2	61.03	0.001424	1.59	384.04	98.92	0.24

Annexe 9 - Résultats de simulation HEC-RAS

Crue de récurrence 100 ans - Horizon 2080 - Probabilité de non-dépassement de 95%

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan J2 Profile	River Profile	RIVER-1 Profile	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Q Total (m ³ /s)	Profile Min Ch El (m)	Q100 - 2080 - Q95 W S Elev (m)	Crat W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach-1	25	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	56.69	63.61		63.62	0.00003	0.71	1739.88	700	0.09	
Reach-1	24	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	55.47	63.59		63.62	0.000043	0.87	1274.55	420	0.11	
Reach-1	23	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	55.01	63.59		63.61	0.000036	0.81	1444.34	530	0.1	
Reach-1	22	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	51.81	63.57		63.6	0.000029	0.86	1361.3	528.18	0.1	
Reach-1	21	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	52.27	63.57		63.59	0.000027	0.76	1540.99	504.26	0.09	
Reach-1	20	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	55.47	63.53		63.57	0.000059	1.05	891.83	284.11	0.13	
Reach-1	19	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	55.32	63.53		63.56	0.000049	0.94	984.98	304.1	0.12	
Reach-1	18	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	56.5	63.53		63.55	0.000042	0.78	1215.61	444.11	0.11	
Reach-1	17	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	56.2	63.52		63.55	0.000035	0.76	1468.52	525	0.1	
Reach-1	16	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	54.22	63.52		63.54	0.000021	0.63	1722.86	500	0.08	
Reach-1	15	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	54.68	63.5		63.53	0.000043	0.93	1258.31	419.4	0.11	
Reach-1	14	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	54.37	63.46		63.52	0.000071	1.1	552.38	153.79	0.14	
Reach-1	13	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	56.13	63.36	60.1	63.51	0.000081	1.73	327.18	70	0.24	
Reach-1	12.5	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	56.13	63.06		63.23	0.000987	1.84	306.27	70	0.26	
Reach-1	12	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	56.45	63.02		63.22	0.001336	1.96	283.27	68.97	0.3	
Reach-1	11	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	57.39	62.98		63.12	0.000871	1.71	332.71	82.8	0.25	
Reach-1	10	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	57.13	62.94	59.82	63.1	0.004194	1.79	308.36	62.6	0.26	
Reach-1	9	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	57.13	62.85		63.02	0.004441	1.83	302.83	62.6	0.27	
Reach-1	8.5	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	54.25	62.87		62.95	0.001187	1.22	500.45	163.8	0.16	
Reach-1	8	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	553	553	54.25	62.6		62.71	0.001949	1.52	490.16	121.91	0.2	
Reach-1	7	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	649	649	54.25	62.32		62.42	0.001726	1.45	475.67	119.63	0.2	
Reach-1	6	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	649	649	56.6	61.16	60.28	61.84	0.01941	3.65	177.7	54.59	0.65	
Reach-1	5	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	649	649	56.4	60.93		61.62	0.019875	3.68	176.27	54.52	0.65	
Reach-1	4	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	649	649	56.18	60.94		61.3	0.005301	2.64	250.9	78.33	0.44	
Reach-1	3.5	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	649	649	53.33	60.95	57.32	61.09	0.001601	1.69	389.04	101.05	0.25	
Reach-1	3	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	649	649	56.18	60.94		61.3	0.005301	2.64	250.9	78.33	0.44	
Reach-1	2	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	649	649	56.18	60.94		61.3	0.005301	2.64	250.9	78.33	0.44	
Reach-1	1	Q100 - 2080 - Q95	Q100 - 2080 - Q95	649	649	53.33	60.95	57.32	61.09	0.001601	1.69	389.04	101.05	0.25	

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crue de récurrence 20 ans - Horizon 2020 - Probable

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 34 Profile	River Q Total (m ³ /s)	RIVER-1 Min Ch El (m)	Reach W S Elev (m)	Reach-1 Crit W S (m)	Profile E.G. Elev (m)	Q20 - 2020 E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach-1	25	Q20 - 2020	357	56.69	62.22		62.24	0.000047	0.74	894.13	463.75	0.11
Reach-1	24	Q20 - 2020	357	55.47	62.19		62.23	0.000065	0.9	706.43	375.34	0.13
Reach-1	23	Q20 - 2020	357	55.01	62.19		62.22	0.000054	0.84	749.3	416.63	0.12
Reach-1	22	Q20 - 2020	357	51.81	62.18		62.21	0.000033	0.82	692.25	368.88	0.1
Reach-1	21	Q20 - 2020	357	52.27	62.17		62.19	0.000033	0.72	852.78	449.93	0.1
Reach-1	20	Q20 - 2020	357	55.47	62.13		62.18	0.000069	0.97	513.03	240.28	0.14
Reach-1	19	Q20 - 2020	357	55.32	62.13		62.16	0.000058	0.87	584.87	246.55	0.13
Reach-1	18	Q20 - 2020	357	56.5	62.13		62.15	0.000061	0.76	633.12	293.62	0.12
Reach-1	17	Q20 - 2020	357	56.2	62.12		62.14	0.000048	0.75	787.78	397.6	0.11
Reach-1	16	Q20 - 2020	357	54.22	62.12		62.14	0.000024	0.58	1040.29	452.85	0.08
Reach-1	15	Q20 - 2020	357	54.68	62.1		62.13	0.000051	0.86	703.93	344.03	0.12
Reach-1	14	Q20 - 2020	357	54.37	62.08		62.12	0.000063	0.92	388.69	76.45	0.13
Reach-1	13	Q20 - 2020	357	56.13	61.99	59.53	62.11	0.000921	1.51	236.13	60.96	0.24
Reach-1	12.5		Bridge									
Reach-1	12	Q20 - 2020	357	56.13	61.99		62.1	0.000924	1.51	235.85	60.92	0.24
Reach-1	11	Q20 - 2020	357	56.45	61.95		62.09	0.001193	1.67	214.27	59.63	0.28
Reach-1	10	Q20 - 2020	357	57.39	61.9		62.01	0.000852	1.44	247.7	71.37	0.24
Reach-1	9	Q20 - 2020	357	57.13	61.88	59.25	61.99	0.00343	1.46	243.69	59.39	0.23
Reach-1	8.5		Bridge									
Reach-1	8	Q20 - 2020	357	57.13	61.85		61.96	0.003506	1.48	241.93	59.39	0.23
Reach-1	7	Q20 - 2020	357	54.25	61.86		61.91	0.000966	0.99	372.72	90.4	0.14
Reach-1	6	Q20 - 2020	357	54.25	61.63		61.71	0.001668	1.25	296.45	85.69	0.18
Reach-1	5	Q20 - 2020	420	54.25	61.41		61.48	0.001415	1.17	370.16	111.21	0.17
Reach-1	4	Q20 - 2020	420	56.6	60.68	59.6	61.07	0.012962	2.77	151.76	53.31	0.52
Reach-1	3.5		Bridge									
Reach-1	3	Q20 - 2020	420	56.4	60.55		60.92	0.012034	2.7	155.6	53.5	0.51
Reach-1	2	Q20 - 2020	420	56.18	60.55		60.73	0.003224	1.92	220.07	74.62	0.33
Reach-1	1	Q20 - 2020	420	53.33	60.55	56.61	60.62	0.000828	1.19	352.3	82.47	0.18

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crue de récurrence 20 ans - Horizon 2050 - Probable

HEC-RAS Plan Plan 34 River RIVER-1 Reach Reach-1 Profile Q20 - 2050												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W S Elev (m)	Crit W S (m)	E.G Elev (m)	E.G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach-1	25	Q20 - 2050	394	56.69	62.54		62.56	0.000041	0.72	1046.12	495.77	0.11
Reach-1	24	Q20 - 2050	394	55.47	62.52		62.55	0.000057	0.88	830.35	393.19	0.12
Reach-1	23	Q20 - 2050	394	55.01	62.51		62.54	0.000048	0.83	891.12	461.67	0.12
Reach-1	22	Q20 - 2050	394	51.81	62.5		62.53	0.000033	0.83	820.05	427.01	0.1
Reach-1	21	Q20 - 2050	394	52.27	62.49		62.51	0.000031	0.73	1004.04	489	0.09
Reach-1	20	Q20 - 2050	394	55.47	62.45		62.5	0.000065	0.98	593.95	261.95	0.13
Reach-1	19	Q20 - 2050	394	55.32	62.45		62.49	0.000055	0.88	668.5	271.37	0.12
Reach-1	18	Q20 - 2050	394	56.5	62.45		62.48	0.000054	0.76	746.09	403.2	0.12
Reach-1	17	Q20 - 2050	394	56.2	62.44		62.47	0.000043	0.74	924.64	444.27	0.11
Reach-1	16	Q20 - 2050	394	54.22	62.45		62.46	0.000023	0.59	1190.87	473.97	0.08
Reach-1	15	Q20 - 2050	394	54.68	62.42		62.45	0.000048	0.87	818.97	363.02	0.12
Reach-1	14	Q20 - 2050	394	54.37	62.4		62.44	0.000066	0.95	413.7	79.03	0.13
Reach-1	13	Q20 - 2050	394	56.13	62.31	59.66	62.44	0.000864	1.54	256.1	63.83	0.24
Reach-1	12.5		Bridge									
Reach-1	12	Q20 - 2050	394	56.13	62.21		62.33	0.00094	1.58	249.35	62.87	0.25
Reach-1	11	Q20 - 2050	394	56.45	62.17		62.32	0.00123	1.73	227.31	61.33	0.29
Reach-1	10	Q20 - 2050	394	57.39	62.12		62.23	0.000861	1.5	263.53	74.96	0.24
Reach-1	9	Q20 - 2050	394	57.13	62.09	59.37	62.21	0.003584	1.54	256.38	59.44	0.24
Reach-1	8.5		Bridge									
Reach-1	8	Q20 - 2050	394	57.13	62.06		62.18	0.003663	1.55	254.53	59.43	0.24
Reach-1	7	Q20 - 2050	394	54.25	62.08		62.13	0.001021	1.04	392.24	91.96	0.15
Reach-1	6	Q20 - 2050	394	54.25	61.84		61.92	0.001744	1.31	314.52	95.08	0.19
Reach-1	5	Q20 - 2050	463	54.25	61.6		61.67	0.001485	1.23	391.49	112.96	0.18
Reach-1	4	Q20 - 2050	463	56.6	60.8	59.74	61.23	0.013932	2.93	158.16	53.63	0.54
Reach-1	3.5		Bridge									
Reach-1	3	Q20 - 2050	463	56.4	60.66		61.08	0.013129	2.87	161.37	53.79	0.53
Reach-1	2	Q20 - 2050	463	56.18	60.66		60.87	0.003523	2.05	228.44	77.62	0.35
Reach-1	1	Q20 - 2050	463	53.33	60.66	56.77	60.74	0.000949	1.28	361.66	87.64	0.19

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crué de récurrence 20 ans - Horizon 2080 - Probable

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 34 Profile	River RIVER-1	Reach Reach-1	Profile Q20 - 2080	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W S Elev (m)	Crit W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude #	Chl
Reach-1	25	Q20 - 2080				416	56.69	62.68		62.7	0.00004	0.73	1121.58	530.02	0.1	
Reach-1	24	Q20 - 2080				416	55.47	62.66		62.7	0.000056	0.88	889.54	401.44	0.12	
Reach-1	23	Q20 - 2080				416	55.01	62.66		62.69	0.000047	0.84	961.53	482.47	0.11	
Reach-1	22	Q20 - 2080				416	51.81	62.65		62.68	0.000033	0.84	885.58	456.84	0.1	
Reach-1	21	Q20 - 2080				416	52.27	62.64		62.66	0.000031	0.74	1077.13	493.37	0.09	
Reach-1	20	Q20 - 2080				416	55.47	62.6		62.65	0.000065	1	633.27	268.49	0.13	
Reach-1	19	Q20 - 2080				416	55.32	62.6		62.64	0.000054	0.89	709.41	280.44	0.12	
Reach-1	18	Q20 - 2080				416	56.5	62.6		62.63	0.000053	0.77	808.31	424.35	0.12	
Reach-1	17	Q20 - 2080				416	56.2	62.59		62.62	0.000042	0.75	992.35	465.83	0.11	
Reach-1	16	Q20 - 2080				416	54.22	62.59		62.61	0.000023	0.6	1262.02	481.75	0.08	
Reach-1	15	Q20 - 2080				416	54.68	62.57		62.6	0.000048	0.88	871.92	380.79	0.12	
Reach-1	14	Q20 - 2080				416	54.37	62.54		62.59	0.000068	0.98	425.34	80.41	0.14	
Reach-1	13	Q20 - 2080				416	56.13	62.46	59.72	62.58	0.000862	1.58	265.33	65.11	0.24	
Reach-1	12.5				Bridge											
Reach-1	12	Q20 - 2080				416	56.13	62.33		62.46	0.000951	1.62	257.09	63.97	0.25	
Reach-1	11	Q20 - 2080				416	56.45	62.29		62.45	0.001256	1.77	234.84	62.48	0.29	
Reach-1	10	Q20 - 2080				416	57.39	62.24		62.36	0.000868	1.54	272.76	76.97	0.25	
Reach-1	9	Q20 - 2080				416	57.13	62.21	59.43	62.34	0.003679	1.58	263.49	59.46	0.24	
Reach-1	8.5				Bridge											
Reach-1	8	Q20 - 2080				416	57.13	62.18		62.31	0.003376	1.59	261.59	59.46	0.24	
Reach-1	7	Q20 - 2080				416	54.25	62.2		62.25	0.001054	1.07	403.32	92.84	0.15	
Reach-1	6	Q20 - 2080				416	54.25	61.95		62.04	0.001786	1.35	325.56	101.02	0.19	
Reach-1	5	Q20 - 2080				488	54.25	61.7		61.78	0.001521	1.26	403.62	113.95	0.18	
Reach-1	4	Q20 - 2080				488	56.6	60.86	59.81	61.33	0.014497	3.02	161.69	53.8	0.56	
Reach-1	3.5				Bridge											
Reach-1	3	Q20 - 2080				488	56.4	60.72		61.16	0.013776	2.97	164.51	53.94	0.54	
Reach-1	2	Q20 - 2080				488	56.18	60.72		60.95	0.003697	2.12	233.11	77.84	0.36	
Reach-1	1	Q20 - 2080				488	53.33	60.72	56.86	60.81	0.001022	1.34	367.01	90.47	0.2	

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crué de récurrence 100 ans - Horizon 2020 - Probable

HEC-RAS	Plan	Plan 14	River	RIVER-1	Reach	Reach-1	Profile	Q100 - 2020									
Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W S Elev	Crit W S	E G Elev	E G Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #	CH				
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)						
Reach-1	25	Q100 - 2020	445	56.69	62.87		62.89	0.00004	0.75	1232.24	632.33	0.11					
Reach-1	24	Q100 - 2020	445	55.47	62.86		62.89	0.000053	0.89	967.67	412.08	0.12					
Reach-1	23	Q100 - 2020	445	55.01	62.85		62.88	0.000045	0.84	1056.9	509.3	0.11					
Reach-1	22	Q100 - 2020	445	51.81	62.84		62.87	0.000033	0.86	976.72	495.36	0.1					
Reach-1	21	Q100 - 2020	445	52.27	62.83		62.86	0.00003	0.74	1172.25	497.97	0.09					
Reach-1	20	Q100 - 2020	445	55.47	62.79		62.84	0.000064	1.01	685.2	274.98	0.13					
Reach-1	19	Q100 - 2020	445	55.32	62.79		62.83	0.000054	0.9	764.02	290.77	0.12					
Reach-1	18	Q100 - 2020	445	56.5	62.79		62.82	0.00005	0.77	890.6	432.8	0.12					
Reach-1	17	Q100 - 2020	445	56.2	62.79		62.81	0.000041	0.76	1084.58	493.82	0.11					
Reach-1	16	Q100 - 2020	445	54.22	62.79		62.8	0.000022	0.61	1355.4	490.39	0.08					
Reach-1	15	Q100 - 2020	445	54.68	62.76		62.8	0.000048	0.9	949.77	409.82	0.12					
Reach-1	14	Q100 - 2020	445	54.37	62.73		62.79	0.00007	1.01	441.47	90.39	0.14					
Reach-1	13	Q100 - 2020	445	56.13	62.64	59.8	62.78	0.000859	1.62	277.54	66.77	0.24					
Reach-1	12.5		Bridge														
Reach-1	12	Q100 - 2020	445	56.13	62.48		62.63	0.000966	1.68	267.1	65.36	0.25					
Reach-1	11	Q100 - 2020	445	56.45	62.44		62.61	0.001289	1.82	244.6	63.95	0.3					
Reach-1	10	Q100 - 2020	445	57.39	62.39		62.52	0.000877	1.58	284.83	79.53	0.25					
Reach-1	9	Q100 - 2020	445	57.13	62.36	59.53	62.5	0.003804	1.63	272.51	59.5	0.24					
Reach-1	8.5		Bridge														
Reach-1	8	Q100 - 2020	445	57.13	62.33		62.47	0.003889	1.64	270.53	59.49	0.25					
Reach-1	7	Q100 - 2020	445	54.25	62.35		62.41	0.001095	1.11	417.74	102.47	0.15					
Reach-1	6	Q100 - 2020	445	54.25	62.09		62.19	0.001836	1.39	340.58	108.58	0.19					
Reach-1	5	Q100 - 2020	522	54.25	61.84		61.92	0.001574	1.31	419.15	115.19	0.19					
Reach-1	4	Q100 - 2020	522	56.6	60.93	59.91	61.44	0.015487	3.15	165.49	53.99	0.58					
Reach-1	3.5		Bridge														
Reach-1	3	Q100 - 2020	522	56.4	60.77		61.27	0.014922	3.11	167.59	54.09	0.56					
Reach-1	2	Q100 - 2020	522	56.18	60.78		61.03	0.004602	2.23	237.71	77.96	0.38					
Reach-1	1	Q100 - 2020	522	53.33	60.78	56.97	60.88	0.001133	1.41	372.5	93.27	0.21					

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Cru de récurrence 100 ans - Horizon 2050 - Probable

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 34 Profile	River: RIVER-1 Profile	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Profile W S Elev (m)	Q100 - 2050 Crit W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Froude # CM
Reach-1	25	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	56.69	63.18		63.2	0.000036	0.74	1443.8	700	0.1
Reach-1	24	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	55.47	63.17		63.19	0.000049	0.88	1096.8	420	0.12
Reach-1	23	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	55.01	63.16		63.19	0.000042	0.84	1219.41	530	0.11
Reach-1	22	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	51.81	63.15		63.18	0.000032	0.87	1137.06	527.64	0.1
Reach-1	21	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	52.27	63.14		63.16	0.000029	0.75	1327.14	502.57	0.09
Reach-1	20	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	55.47	63.1		63.15	0.000063	1.04	771.45	282.41	0.13
Reach-1	19	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	55.32	63.1		63.14	0.000052	0.93	856.04	302.4	0.12
Reach-1	18	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	56.5	63.1		63.13	0.000047	0.78	1026.51	442.4	0.11
Reach-1	17	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	56.2	63.1		63.12	0.000039	0.77	1244.05	525	0.1
Reach-1	16	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	54.22	63.1		63.11	0.000022	0.62	1509.31	500	0.08
Reach-1	15	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	54.68	63.07		63.11	0.000047	0.92	1078.64	419.4	0.12
Reach-1	14	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	54.37	63.04		63.1	0.000072	1.06	472.35	119.78	0.14
Reach-1	13	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	56.13	62.94	59.94	63.09	0.000848	1.68	297.95	69.46	0.24
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	56.13	62.73		62.88	0.000986	1.75	283.33	67.55	0.26
Reach-1	11	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	56.45	62.69		62.87	0.001332	1.89	260.5	66.28	0.3
Reach-1	10	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	57.39	62.64		62.78	0.000885	1.65	304.74	82.8	0.25
Reach-1	9	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	57.13	62.61	59.66	62.75	0.004144	1.71	287.52	62.6	0.25
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	57.13	62.57		62.72	0.004251	1.72	285.23	62.6	0.26
Reach-1	7	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	54.25	62.59		62.65	0.001146	1.16	451.96	159.48	0.16
Reach-1	6	Q100 - 2050	Q100 - 2050	492	54.25	62.32		62.42	0.001894	1.45	366.76	120.63	0.2
Reach-1	5	Q100 - 2050	Q100 - 2050	578	54.25	62.06		62.15	0.001647	1.38	444.46	117.2	0.19
Reach-1	4	Q100 - 2050	Q100 - 2050	578	56.6	61.04	60.09	61.62	0.017108	3.37	171.44	54.28	0.61
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q100 - 2050	Q100 - 2050	578	56.4	60.86		61.43	0.016874	3.36	172.24	54.32	0.6
Reach-1	2	Q100 - 2050	Q100 - 2050	578	56.18	60.87		61.16	0.004516	2.41	244.72	78.16	0.4
Reach-1	1	Q100 - 2050	Q100 - 2050	578	53.33	60.87	57.13	60.99	0.001325	1.53	381.1	97.51	0.23

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Cru de récurrence 100 ans - Horizon 2080 - Probable

HEC-RAS	Plan	Plan 14	River	RIVER-1	Reach	Reach-1	Profile	Q100 - 2080							
Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W S Elev	Crit W S	E G Elev	E G Slope	Vel Chel	Flow Area	Top Width	Froude #	CM		
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)				
Reach-1	25	Q100 - 2080	519	56.69	63.35		63.37	0.000034	0.73	1561.94	700	0.1			
Reach-1	24	Q100 - 2080	519	55.47	63.33		63.36	0.000047	0.88	1167.63	420	0.12			
Reach-1	23	Q100 - 2080	519	55.01	63.33		63.35	0.00004	0.83	1309.03	530	0.11			
Reach-1	22	Q100 - 2080	519	51.81	63.32		63.35	0.000031	0.87	1226.27	527.86	0.1			
Reach-1	21	Q100 - 2080	519	52.27	63.31		63.33	0.000028	0.76	1412.13	503.24	0.09			
Reach-1	20	Q100 - 2080	519	55.47	63.27		63.32	0.000062	1.05	819.11	283.08	0.13			
Reach-1	19	Q100 - 2080	519	55.32	63.27		63.31	0.000052	0.94	907.1	303.08	0.12			
Reach-1	18	Q100 - 2080	519	56.5	63.27		63.3	0.000045	0.78	1101.45	443.08	0.11			
Reach-1	17	Q100 - 2080	519	56.2	63.27		63.29	0.000037	0.77	1333.09	525	0.1			
Reach-1	16	Q100 - 2080	519	54.22	63.27		63.28	0.000022	0.63	1594.02	500	0.08			
Reach-1	15	Q100 - 2080	519	54.68	63.24		63.28	0.000046	0.93	1149.78	419.4	0.12			
Reach-1	14	Q100 - 2080	519	54.37	63.21		63.26	0.000073	1.08	494.44	142.93	0.14			
Reach-1	13	Q100 - 2080	519	56.13	63.1	60.02	63.25	0.000843	1.71	309.39	70	0.24			
Reach-1	12.5		Bridge												
Reach-1	12	Q100 - 2080	519	56.13	62.86		63.02	0.001001	1.8	292.1	68.7	0.26			
Reach-1	11	Q100 - 2080	519	56.45	62.82		63.01	0.001359	1.93	269.12	67.51	0.31			
Reach-1	10	Q100 - 2080	519	57.39	62.77		62.91	0.000894	1.69	315.4	82.8	0.25			
Reach-1	9	Q100 - 2080	519	57.13	62.73	59.73	62.89	0.004231	1.76	295.43	62.6	0.26			
Reach-1	8.5		Bridge												
Reach-1	8	Q100 - 2080	519	57.13	62.69		62.85	0.004339	1.77	293.09	62.6	0.26			
Reach-1	7	Q100 - 2080	519	54.25	62.72		62.78	0.00117	1.19	474.52	162.4	0.16			
Reach-1	6	Q100 - 2080	519	54.25	62.44		62.55	0.001924	1.49	381.5	121.47	0.2			
Reach-1	5	Q100 - 2080	609	54.25	62.17		62.27	0.001684	1.41	458.14	118.27	0.19			
Reach-1	4	Q100 - 2080	609	56.6	61.1	60.17	61.72	0.018095	3.49	174.28	54.42	0.62			
Reach-1	3.5		Bridge												
Reach-1	3	Q100 - 2080	609	56.4	60.9		61.52	0.018096	3.49	174.28	54.42	0.62			
Reach-1	2	Q100 - 2080	609	56.18	60.9		61.22	0.004836	2.51	247.81	78.24	0.42			
Reach-1	1	Q100 - 2080	609	53.33	60.91	57.22	61.04	0.00144	1.6	385.03	99.39	0.24			

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Débit pour atteindre le niveau du soffite du pont (section 12.5)

River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
25	Soffite pont	338	56.69	62.09		62.11	0.000048	0.73	834.4	458.62	0.11
24	Soffite pont	338	55.47	62.06		62.1	0.000067	0.89	658.25	368.16	0.13
23	Soffite pont	338	55.01	62.06		62.09	0.000055	0.84	696.49	398.56	0.12
22	Soffite pont	338	51.81	62.05		62.08	0.000033	0.8	646.36	345.42	0.1
21	Soffite pont	338	52.27	62.04		62.06	0.000032	0.71	795.89	434.33	0.09
20	Soffite pont	338	55.47	62		62.05	0.000069	0.95	482.9	232.03	0.14
19	Soffite pont	338	55.32	62		62.04	0.000058	0.85	553.97	236.73	0.12
18	Soffite pont	338	56.5	62		62.02	0.000062	0.75	597.88	263.63	0.12
17	Soffite pont	338	56.2	61.99		62.01	0.000048	0.74	737.86	379.15	0.11
16	Soffite pont	338	54.22	61.99		62.01	0.000024	0.57	982.65	444.36	0.08
15	Soffite pont	338	54.68	61.97		62	0.000051	0.84	660.4	336.57	0.12
14	Soffite pont	338	54.37	61.95		61.99	0.000061	0.89	379.12	75.44	0.13
13	Soffite pont	338	56.13	61.87	59.47	61.98	0.000917	1.48	228.71	60	0.24
12.5	Bridge										
12	Soffite pont	338	56.13	61.86		61.98	0.00092	1.48	228.45	60	0.24
11	Soffite pont	338	56.45	61.83		61.97	0.001196	1.63	207	59.39	0.28
10	Soffite pont	338	57.39	61.78		61.88	0.000853	1.41	239.03	69.32	0.24
9	Soffite pont	338	57.13	61.76	59.19	61.86	0.003369	1.43	236.46	59.37	0.23
8.5	Bridge										
8	Soffite pont	338	57.13	61.73		61.83	0.003445	1.44	234.73	59.36	0.23
7	Soffite pont	338	54.25	61.74		61.79	0.00094	0.96	361.73	89.5	0.14
6	Soffite pont	338	54.25	61.52		61.59	0.00162	1.21	286.77	81.97	0.18
5	Soffite pont	396	54.25	61.3		61.36	0.00137	1.13	358.23	110.22	0.17
4	Soffite pont	396	56.6	60.61	59.52	60.98	0.01236	2.67	148.23	53.13	0.51
3.5	Bridge										
3	Soffite pont	396	56.4	60.49		60.84	0.011367	2.6	152.45	53.35	0.49
2	Soffite pont	396	56.18	60.49		60.66	0.00304	1.85	215.65	72.99	0.32
1	Soffite pont	396	53.33	60.49	56.51	60.56	0.000759	1.14	347.43	79.65	0.17

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Pont route 148 (section 12.5) avec tablier rehausse - Crue 20 ans - Période de référence

HEC-RAS	Plan	Plan 45	River	RIVER-1	Reach	Reach-1	Profile	Q20 - Ref								
Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W S Elev	Crit W S	E G Elev	E G Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #	Ch			
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)					
Reach-1	25	Q20 - Ref	393	56.69	62.46		62.48	0.000044	0.74	1008.11	482.36	0.11				
Reach-1	24	Q20 - Ref	393	55.47	62.44		62.47	0.000062	0.9	799.37	388.81	0.13				
Reach-1	23	Q20 - Ref	393	55.01	62.43		62.46	0.000052	0.85	854.81	450.57	0.12				
Reach-1	22	Q20 - Ref	393	51.81	62.42		62.45	0.000034	0.85	786.62	412.58	0.1				
Reach-1	21	Q20 - Ref	393	52.27	62.41		62.44	0.000033	0.74	965.16	479.26	0.1				
Reach-1	20	Q20 - Ref	393	55.47	62.37		62.42	0.000069	1	572.69	256.44	0.14				
Reach-1	19	Q20 - Ref	393	55.32	62.37		62.41	0.000058	0.89	646.43	265.05	0.13				
Reach-1	18	Q20 - Ref	393	56.5	62.37		62.39	0.000058	0.78	713.89	375.24	0.12				
Reach-1	17	Q20 - Ref	393	56.2	62.36		62.39	0.000046	0.76	888.18	432.33	0.11				
Reach-1	16	Q20 - Ref	393	54.22	62.36		62.38	0.000024	0.6	1151.71	468.57	0.08				
Reach-1	15	Q20 - Ref	393	54.68	62.34		62.37	0.000051	0.89	788.55	358.09	0.12				
Reach-1	14	Q20 - Ref	393	54.37	62.31		62.36	0.000068	0.97	407.06	78.35	0.14				
Reach-1	13	Q20 - Ref	393	56.13	62.22	59.65	62.35	0.000922	1.57	250.5	63.04	0.25				
Reach-1	12.5		Bridge													
Reach-1	12	Q20 - Ref	393	56.13	62.2		62.33	0.000941	1.58	248.89	62.81	0.25				
Reach-1	11	Q20 - Ref	393	56.45	62.16		62.31	0.00123	1.73	226.87	61.26	0.29				
Reach-1	10	Q20 - Ref	393	57.39	62.11		62.23	0.000862	1.5	262.98	74.83	0.24				
Reach-1	9	Q20 - Ref	393	57.13	62.09	59.37	62.21	0.003584	1.54	255.95	59.44	0.24				
Reach-1	8.5		Bridge													
Reach-1	8	Q20 - Ref	393	57.13	62.06		62.18	0.003663	1.55	254.1	59.43	0.24				
Reach-1	7	Q20 - Ref	393	54.25	62.07		62.12	0.001021	1.04	391.56	91.91	0.15				
Reach-1	6	Q20 - Ref	393	54.25	61.83		61.91	0.001745	1.31	313.82	94.69	0.19				
Reach-1	5	Q20 - Ref	461	54.25	61.59		61.67	0.00148	1.23	390.72	112.9	0.18				
Reach-1	4	Q20 - Ref	461	56.6	60.8	59.73	61.23	0.01383	2.92	158.1	53.62	0.54				
Reach-1	3.5		Bridge													
Reach-1	3	Q20 - Ref	461	56.4	60.66		61.07	0.013015	2.86	161.37	53.79	0.53				
Reach-1	2	Q20 - Ref	461	56.18	60.66		60.87	0.003493	2.04	228.44	77.62	0.35				
Reach-1	1	Q20 - Ref	461	53.33	60.66	56.76	60.74	0.000941	1.28	361.66	87.64	0.19				

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Pont route 148 (section 12.5) avec tablier rehaussé - Crue 20 ans - Horizon 2020

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 45 Profile	River Profile	RIVER-1 Q Total (m ³ /s)	Reach Min Ch El (m)	Reach-1 W S Elev (m)	Profile Crt W S (m)	Q20 - 2020 E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Froude # Chl
Reach-1	25	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	56.69	62.22		62.24	0.000047	0.74	894.12	463.75	0.11
Reach-1	24	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	55.47	62.19		62.23	0.000065	0.9	706.42	375.33	0.13
Reach-1	23	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	55.01	62.19		62.22	0.000054	0.84	749.29	416.62	0.12
Reach-1	22	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	51.81	62.18		62.21	0.000033	0.82	692.24	368.88	0.1
Reach-1	21	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	52.27	62.17		62.19	0.000033	0.72	852.77	449.93	0.1
Reach-1	20	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	55.47	62.13		62.18	0.000069	0.97	513.02	240.28	0.14
Reach-1	19	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	55.32	62.13		62.16	0.000058	0.87	584.86	246.55	0.13
Reach-1	18	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	56.5	62.13		62.15	0.000061	0.76	633.12	293.62	0.12
Reach-1	17	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	56.2	62.12		62.14	0.000048	0.75	787.77	397.6	0.11
Reach-1	16	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	54.22	62.12		62.14	0.000024	0.58	1040.29	452.85	0.08
Reach-1	15	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	54.68	62.1		62.13	0.000051	0.86	703.93	344.03	0.12
Reach-1	14	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	54.37	62.08		62.12	0.000063	0.92	388.69	76.45	0.13
Reach-1	13	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	56.13	61.99	59.53	62.11	0.000921	1.51	236.13	60.96	0.24
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	56.13	61.99		62.1	0.000924	1.51	235.85	60.92	0.24
Reach-1	11	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	56.45	61.95		62.09	0.001193	1.67	214.27	59.63	0.28
Reach-1	10	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	57.39	61.9		62.01	0.000852	1.44	247.7	71.37	0.24
Reach-1	9	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	57.13	61.88	59.25	61.99	0.00343	1.46	243.69	59.39	0.23
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	57.13	61.85		61.96	0.003506	1.48	241.93	59.39	0.23
Reach-1	7	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	54.25	61.86		61.91	0.000966	0.99	372.72	90.4	0.14
Reach-1	6	Q20 - 2020	Q20 - 2020	357	54.25	61.63		61.71	0.001668	1.25	296.45	85.69	0.18
Reach-1	5	Q20 - 2020	Q20 - 2020	420	54.25	61.41		61.48	0.001415	1.17	370.16	111.21	0.17
Reach-1	4	Q20 - 2020	Q20 - 2020	420	56.6	60.68	59.6	61.07	0.012962	2.77	151.76	53.31	0.52
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q20 - 2020	Q20 - 2020	420	56.4	60.55		60.92	0.012034	2.7	155.6	53.5	0.51
Reach-1	2	Q20 - 2020	Q20 - 2020	420	56.18	60.55		60.73	0.003224	1.92	220.07	74.62	0.33
Reach-1	1	Q20 - 2020	Q20 - 2020	420	53.33	60.55	56.61	60.62	0.000828	1.19	352.3	82.47	0.18

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Pont route 148 (section 12.5) avec tablier rehaussé - Crue 20 ans - Horizon 2050

QVER-1	Reach	Reach-1	Profile	Q20-2050										
	Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W S Elev	Crit W S	E G Elev	E G Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #	Chl
				(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)		
Reach-1	25		Q20-2050	394	56.69	62.47		62.49	0.000044	0.74	1011.67	483.63	0.11	
Reach-1	24		Q20-2050	394	55.47	62.44		62.48	0.000062	0.9	802.26	389.22	0.13	
Reach-1	23		Q20-2050	394	55.01	62.44		62.47	0.000052	0.85	858.16	451.6	0.12	
Reach-1	22		Q20-2050	394	51.81	62.43		62.46	0.000034	0.85	789.67	413.92	0.1	
Reach-1	21		Q20-2050	394	52.27	62.42		62.44	0.000033	0.74	968.72	480.16	0.1	
Reach-1	20		Q20-2050	394	55.47	62.38		62.43	0.000069	1	574.59	256.93	0.14	
Reach-1	19		Q20-2050	394	55.32	62.38		62.41	0.000058	0.89	648.4	265.62	0.13	
Reach-1	18		Q20-2050	394	56.5	62.37		62.4	0.000058	0.78	716.69	377.76	0.12	
Reach-1	17		Q20-2050	394	56.2	62.37		62.39	0.000046	0.76	891.4	433.4	0.11	
Reach-1	16		Q20-2050	394	54.22	62.37		62.39	0.000024	0.6	1155.2	469.05	0.08	
Reach-1	15		Q20-2050	394	54.68	62.34		62.38	0.000051	0.89	791.21	358.53	0.12	
Reach-1	14		Q20-2050	394	54.37	62.32		62.37	0.000068	0.97	407.63	78.41	0.14	
Reach-1	13		Q20-2050	394	56.13	62.23	59.66	62.36	0.000921	1.57	250.96	63.1	0.25	
Reach-1	12.5		Bridge											
Reach-1	12		Q20-2050	394	56.13	62.21		62.33	0.00094	1.58	249.35	62.87	0.25	
Reach-1	11		Q20-2050	394	56.45	62.17		62.32	0.00123	1.73	227.31	61.33	0.29	
Reach-1	10		Q20-2050	394	57.39	62.12		62.23	0.000861	1.5	263.53	74.96	0.24	
Reach-1	9		Q20-2050	394	57.13	62.09	59.37	62.21	0.003584	1.54	256.38	59.44	0.24	
Reach-1	8.5		Bridge											
Reach-1	8		Q20-2050	394	57.13	62.06		62.18	0.003663	1.55	254.53	59.43	0.24	
Reach-1	7		Q20-2050	394	54.25	62.08		62.13	0.001021	1.04	392.24	91.96	0.15	
Reach-1	6		Q20-2050	394	54.25	61.84		61.92	0.001744	1.31	314.52	95.08	0.19	
Reach-1	5		Q20-2050	463	54.25	61.6		61.67	0.001485	1.23	391.49	112.96	0.18	
Reach-1	4		Q20-2050	463	56.6	60.8	59.74	61.23	0.013932	2.93	158.16	53.63	0.54	
Reach-1	3.5		Bridge											
Reach-1	3		Q20-2050	463	56.4	60.66		61.08	0.013129	2.87	161.37	53.79	0.53	
Reach-1	2		Q20-2050	463	56.18	60.66		60.87	0.003523	2.05	228.44	77.62	0.35	
Reach-1	1		Q20-2050	463	53.33	60.66	56.77	60.74	0.000949	1.28	361.66	87.64	0.19	

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Pont route 148 (section 12.5) avec tablier rehaussé - Crue 20 ans - Horizon 2080

HEC-RAS	Plan	Plan 45	River: RIVER-1	Reach	Reach-1	Profile: Q20-2080							
Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #	CM
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)		
Reach-1	25	Q20-2080	416	56.69	62.6		62.62	0.000043	0.75	1076.27	506.15	0.11	
Reach-1	24	Q20-2080	416	55.47	62.58		62.61	0.000061	0.91	853.69	396.47	0.13	
Reach-1	23	Q20-2080	416	55.01	62.57		62.6	0.000051	0.86	918.5	469.87	0.12	
Reach-1	22	Q20-2080	416	51.81	62.56		62.59	0.000035	0.86	845.05	438.63	0.1	
Reach-1	21	Q20-2080	416	52.27	62.55		62.57	0.000033	0.76	1032.13	491.18	0.1	
Reach-1	20	Q20-2080	416	55.47	62.51		62.56	0.00007	1.02	698.27	265.3	0.14	
Reach-1	19	Q20-2080	416	55.32	62.51		62.54	0.000058	0.91	683.32	275.38	0.13	
Reach-1	18	Q20-2080	416	56.5	62.5		62.53	0.000057	0.79	768.46	420.2	0.12	
Reach-1	17	Q20-2080	416	56.2	62.5		62.52	0.000046	0.77	948.82	452.02	0.11	
Reach-1	16	Q20-2080	416	54.22	62.5		62.52	0.000024	0.61	1216.55	477.48	0.08	
Reach-1	15	Q20-2080	416	54.68	62.47		62.51	0.000052	0.91	837.93	366.05	0.12	
Reach-1	14	Q20-2080	416	54.37	62.45		62.5	0.000071	1	417.62	79.42	0.14	
Reach-1	13	Q20-2080	416	56.13	62.35	59.72	62.49	0.000932	1.61	258.76	64.2	0.25	
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q20-2080	416	56.13	62.33		62.46	0.000951	1.62	257.09	63.97	0.25	
Reach-1	11	Q20-2080	416	56.45	62.29		62.45	0.001256	1.77	234.84	62.48	0.29	
Reach-1	10	Q20-2080	416	57.39	62.24		62.36	0.000868	1.54	272.76	76.97	0.25	
Reach-1	9	Q20-2080	416	57.13	62.21	59.43	62.34	0.003679	1.58	263.49	59.46	0.24	
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q20-2080	416	57.13	62.18		62.31	0.00376	1.59	261.59	59.46	0.24	
Reach-1	7	Q20-2080	416	54.25	62.2		62.25	0.001054	1.07	403.32	92.84	0.15	
Reach-1	6	Q20-2080	416	54.25	61.95		62.04	0.001786	1.35	325.56	101.02	0.19	
Reach-1	5	Q20-2080	488	54.25	61.7		61.78	0.001521	1.26	403.62	113.95	0.18	
Reach-1	4	Q20-2080	488	56.6	60.86	59.81	61.33	0.014497	3.02	161.69	53.8	0.56	
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q20-2080	488	56.4	60.72		61.16	0.013776	2.97	164.51	53.94	0.54	
Reach-1	2	Q20-2080	488	56.18	60.72		60.95	0.003697	2.12	233.11	77.84	0.36	
Reach-1	1	Q20-2080	488	53.33	60.72	56.86	60.81	0.001022	1.34	367.01	90.47	0.2	

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Pont route 148 (section 12.5) avec tablier rehaussé - Crue 100 ans - Période de référence

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 45 River Profile	RIVER-1 Q Total (m ³ /s)	Reach Min Ch El (m)	Reach-1 W S Elev (m)	Profile Q100 - Ref Crit W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach-1	25	Q100 - Ref	471	56.69	62.9		62.93	0.000044	0.78	1251.83	648.76	0.11
Reach-1	24	Q100 - Ref	471	55.47	62.89		62.92	0.000058	0.93	979.68	413.69	0.13
Reach-1	23	Q100 - Ref	471	55.01	62.88		62.91	0.000049	0.88	1071.52	513.28	0.12
Reach-1	22	Q100 - Ref	471	51.81	62.87		62.9	0.000036	0.9	990.34	500.86	0.1
Reach-1	21	Q100 - Ref	471	52.27	62.86		62.88	0.000033	0.78	1185.49	498.61	0.1
Reach-1	20	Q100 - Ref	471	55.47	62.82		62.87	0.000071	1.07	691.39	275.75	0.14
Reach-1	19	Q100 - Ref	471	55.32	62.81		62.85	0.000059	0.95	770.52	291.97	0.13
Reach-1	18	Q100 - Ref	471	56.5	62.81		62.84	0.000055	0.81	900.24	433.78	0.12
Reach-1	17	Q100 - Ref	471	56.2	62.81		62.83	0.000045	0.8	1095.36	497	0.11
Reach-1	16	Q100 - Ref	471	54.22	62.81		62.83	0.000025	0.64	1366.11	491.37	0.08
Reach-1	15	Q100 - Ref	471	54.68	62.78		62.82	0.000053	0.95	957.57	410.58	0.12
Reach-1	14	Q100 - Ref	471	54.37	62.75		62.81	0.000077	1.07	442.9	91.22	0.15
Reach-1	13	Q100 - Ref	471	56.13	62.64	59.87	62.79	0.000959	1.71	277.85	66.81	0.25
Reach-1	12.5		Bridge									
Reach-1	12	Q100 - Ref	471	56.13	62.62		62.77	0.000978	1.72	276.02	66.57	0.26
Reach-1	11	Q100 - Ref	471	56.45	62.58		62.76	0.001315	1.86	253.32	65.24	0.3
Reach-1	10	Q100 - Ref	471	57.39	62.53		62.66	0.000883	1.62	295.72	81.71	0.25
Reach-1	9	Q100 - Ref	471	57.13	62.5	59.61	62.64	0.004096	1.68	280.77	62.6	0.25
Reach-1	8.5		Bridge									
Reach-1	8	Q100 - Ref	471	57.13	62.46		62.61	0.004202	1.69	278.52	62.6	0.26
Reach-1	7	Q100 - Ref	471	54.25	62.48		62.54	0.001128	1.14	436.75	156.99	0.16
Reach-1	6	Q100 - Ref	471	54.25	62.22		62.32	0.001875	1.43	354.42	115.11	0.2
Reach-1	5	Q100 - Ref	552	54.25	61.96		62.05	0.001614	1.34	432.76	116.28	0.19
Reach-1	4	Q100 - Ref	552	56.6	60.99	60	61.54	0.016351	3.27	168.74	54.15	0.59
Reach-1	3.5		Bridge									
Reach-1	3	Q100 - Ref	552	56.4	60.82		61.36	0.015944	3.24	170.19	54.22	0.58
Reach-1	2	Q100 - Ref	552	56.18	60.83		61.1	0.004272	2.32	241.61	78.07	0.39
Reach-1	1	Q100 - Ref	552	53.33	60.83	57.07	60.94	0.001234	1.47	377.25	95.64	0.22

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Pont route 148 (section 12.5) avec tablier rehaussé - Crue 100 ans - Horizon 2020

HEC-RAS	Plan	Plan 45	River	RIVER-1	Reach	Reach-1	Profile	Q100 - 2020								
Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W S Elev	Crnt W S	E G Elev	E G Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #	CM			
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)					
Reach-1	25	Q100 - 2020	445	56.69	62.76		62.78	0.000044	0.77	1164	571.4	0.11				
Reach-1	24	Q100 - 2020	445	55.47	62.74		62.77	0.000059	0.92	920.32	405.67	0.13				
Reach-1	23	Q100 - 2020	445	55.01	62.74		62.76	0.000005	0.87	998.54	493.06	0.12				
Reach-1	22	Q100 - 2020	445	51.81	62.72		62.76	0.000036	0.89	920.22	471.85	0.1				
Reach-1	21	Q100 - 2020	445	52.27	62.71		62.74	0.000033	0.77	1113.72	495.15	0.1				
Reach-1	20	Q100 - 2020	445	55.47	62.67		62.72	0.000007	1.05	652.24	270.88	0.14				
Reach-1	19	Q100 - 2020	445	55.32	62.67		62.71	0.000059	0.93	729.23	284.23	0.13				
Reach-1	18	Q100 - 2020	445	56.5	62.67		62.7	0.000056	0.8	838.28	427.45	0.12				
Reach-1	17	Q100 - 2020	445	56.2	62.66		62.69	0.000046	0.79	1025.32	476.02	0.11				
Reach-1	16	Q100 - 2020	445	54.22	62.66		62.68	0.000025	0.63	1295.85	484.9	0.08				
Reach-1	15	Q100 - 2020	445	54.68	62.64		62.67	0.000052	0.93	900.01	391.46	0.12				
Reach-1	14	Q100 - 2020	445	54.37	62.61		62.66	0.000075	1.03	430.61	83.8	0.14				
Reach-1	13	Q100 - 2020	445	56.13	62.51	59.8	62.65	0.000947	1.66	268.86	65.6	0.25				
Reach-1	12.5	Bridge														
Reach-1	12	Q100 - 2020	445	56.13	62.48		62.63	0.000966	1.68	267.1	65.36	0.25				
Reach-1	11	Q100 - 2020	445	56.45	62.44		62.61	0.001289	1.82	244.6	63.95	0.3				
Reach-1	10	Q100 - 2020	445	57.39	62.39		62.52	0.000877	1.58	284.83	79.53	0.25				
Reach-1	9	Q100 - 2020	445	57.13	62.36	59.53	62.5	0.003804	1.63	272.51	59.5	0.24				
Reach-1	8.5	Bridge														
Reach-1	8	Q100 - 2020	445	57.13	62.33		62.47	0.003889	1.64	270.53	59.49	0.25				
Reach-1	7	Q100 - 2020	445	54.25	62.35		62.41	0.001095	1.11	417.74	102.47	0.15				
Reach-1	6	Q100 - 2020	445	54.25	62.09		62.19	0.001836	1.39	340.58	108.58	0.19				
Reach-1	5	Q100 - 2020	522	54.25	61.84		61.92	0.001574	1.31	419.15	115.19	0.19				
Reach-1	4	Q100 - 2020	522	56.6	60.93	59.91	61.44	0.015487	3.15	165.49	53.99	0.58				
Reach-1	3.5	Bridge														
Reach-1	3	Q100 - 2020	522	56.4	60.77		61.27	0.014922	3.11	167.59	54.09	0.56				
Reach-1	2	Q100 - 2020	522	56.18	60.78		61.03	0.004002	2.23	237.71	77.96	0.38				
Reach-1	1	Q100 - 2020	522	53.33	60.78	56.97	60.88	0.001133	1.41	372.5	93.27	0.21				

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Pont route 148 (section 12.5) avec tablier rehaussé - Crue 100 ans - Horizon 2050

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 45 Profile	River RIVER-1	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Profile W S Elev (m)	Q100 - 2050 Crt W S (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # F Chl
Reach-1	25	Q100 - 2050	492	56.69	63.02			63.04	0.000043	0.79	1330.6	700	0.11
Reach-1	24	Q100 - 2050	492	55.47	63			63.04	0.000057	0.93	1028.16	420	0.13
Reach-1	23	Q100 - 2050	492	55.01	63			63.03	0.000049	0.89	1132.23	529.52	0.12
Reach-1	22	Q100 - 2050	492	51.81	62.98			63.02	0.000036	0.91	1049.73	524.18	0.1
Reach-1	21	Q100 - 2050	492	52.27	62.97			63	0.000033	0.79	1243.51	501.39	0.1
Reach-1	20	Q100 - 2050	492	55.47	62.93			62.98	0.000071	1.08	723.37	279.66	0.14
Reach-1	19	Q100 - 2050	492	55.32	62.93			62.97	0.000059	0.97	804.52	298.19	0.13
Reach-1	18	Q100 - 2050	492	56.5	62.93			62.96	0.000055	0.82	950.73	438.87	0.12
Reach-1	17	Q100 - 2050	492	56.2	62.92			62.95	0.000045	0.81	1153.9	513.86	0.11
Reach-1	16	Q100 - 2050	492	54.22	62.92			62.94	0.000025	0.65	1423.28	496.58	0.08
Reach-1	15	Q100 - 2050	492	54.68	62.89			62.93	0.000053	0.96	1005.23	415.2	0.12
Reach-1	14	Q100 - 2050	492	54.37	62.86			62.92	0.000079	1.09	453.55	97.2	0.15
Reach-1	13	Q100 - 2050	492	56.13	62.75		59.94	62.91	0.000966	1.74	285.21	67.8	0.26
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q100 - 2050	492	56.13	62.73			62.88	0.000986	1.75	283.33	67.55	0.26
Reach-1	11	Q100 - 2050	492	56.45	62.69			62.87	0.001332	1.89	260.5	66.28	0.3
Reach-1	10	Q100 - 2050	492	57.39	62.64			62.78	0.000885	1.65	304.74	82.8	0.25
Reach-1	9	Q100 - 2050	492	57.13	62.61		59.66	62.75	0.004144	1.71	287.52	62.6	0.25
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q100 - 2050	492	57.13	62.57			62.72	0.004251	1.72	285.23	62.6	0.26
Reach-1	7	Q100 - 2050	492	54.25	62.59			62.65	0.001146	1.16	453.96	159.48	0.16
Reach-1	6	Q100 - 2050	492	54.25	62.32			62.42	0.001894	1.45	366.76	120.63	0.2
Reach-1	5	Q100 - 2050	578	54.25	62.06			62.15	0.001647	1.38	444.46	117.2	0.19
Reach-1	4	Q100 - 2050	578	56.6	61.04		60.09	61.62	0.017108	3.37	171.44	54.25	0.61
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q100 - 2050	578	56.4	60.86			61.43	0.016874	3.36	172.24	54.32	0.6
Reach-1	2	Q100 - 2050	578	56.18	60.87			61.16	0.004516	2.41	244.72	78.16	0.4
Reach-1	1	Q100 - 2050	578	53.33	60.87		57.13	60.99	0.001325	1.53	381.1	97.51	0.23

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Pont route 148 (section 12.5) avec tablier rehaussé - Crue 100 ans - Horizon 2080

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 45 Profile	River Profile	RIVER-1 Q Total (m ³ /s)	Reach Min Ch El (m)	Reach-1 W S Elev (m)	Profile Crit W S (m)	Q100 - 2080 E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # CM
Reach-1	25	Q100 - 2080	519	56.69	63.16	63.18	0.000041	0.79	1428.16	700	0.11		
Reach-1	24	Q100 - 2080	519	55.47	63.14	63.17	0.000056	0.94	1086.49	420	0.13		
Reach-1	23	Q100 - 2080	519	55.01	63.14	63.16	0.000047	0.89	1206.03	530	0.12		
Reach-1	22	Q100 - 2080	519	51.81	63.12	63.16	0.000036	0.93	1122.91	527.61	0.11		
Reach-1	21	Q100 - 2080	519	52.27	63.11	63.14	0.000033	0.8	1313.12	502.45	0.1		
Reach-1	20	Q100 - 2080	519	55.47	63.07	63.12	0.000071	1.1	762.06	282.27	0.14		
Reach-1	19	Q100 - 2080	519	55.32	63.07	63.11	0.00006	0.98	845.91	302.27	0.13		
Reach-1	18	Q100 - 2080	519	56.5	63.07	63.1	0.000054	0.83	1011.64	442.27	0.12		
Reach-1	17	Q100 - 2080	519	56.2	63.06	63.09	0.000044	0.82	1226.03	525	0.11		
Reach-1	16	Q100 - 2080	519	54.22	63.06	63.08	0.000025	0.66	1492.19	500	0.09		
Reach-1	15	Q100 - 2080	519	54.68	63.03	63.07	0.000053	0.98	1062.72	419.4	0.12		
Reach-1	14	Q100 - 2080	519	54.37	63	63.06	0.000081	1.12	467.48	113.25	0.15		
Reach-1	13	Q100 - 2080	519	56.13	62.88	60.02	0.009981	1.79	294.06	68.96	0.26		
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q100 - 2080	519	56.13	62.86	63.02	0.001001	1.8	292.1	68.7	0.26		
Reach-1	11	Q100 - 2080	519	56.45	62.82	63.01	0.001359	1.93	269.12	67.51	0.31		
Reach-1	10	Q100 - 2080	519	57.39	62.77	62.91	0.000894	1.69	315.4	82.8	0.25		
Reach-1	9	Q100 - 2080	519	57.13	62.73	59.73	0.004231	1.76	295.43	62.6	0.26		
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q100 - 2080	519	57.13	62.69	62.85	0.004339	1.77	293.09	62.6	0.26		
Reach-1	7	Q100 - 2080	519	54.25	62.72	62.78	0.00117	1.19	474.52	162.4	0.16		
Reach-1	6	Q100 - 2080	519	54.25	62.44	62.55	0.001924	1.49	381.5	121.47	0.2		
Reach-1	5	Q100 - 2080	609	54.25	62.17	62.27	0.001684	1.41	458.14	118.27	0.19		
Reach-1	4	Q100 - 2080	609	56.6	61.1	60.17	0.018095	3.49	174.28	54.42	0.62		
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q100 - 2080	609	56.4	60.9	61.52	0.018096	3.49	174.28	54.42	0.62		
Reach-1	2	Q100 - 2080	609	56.18	60.9	61.22	0.004836	2.51	247.81	78.24	0.42		
Reach-1	1	Q100 - 2080	609	53.33	60.91	57.22	0.00144	1.6	385.03	99.39	0.24		

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Crue de récurrence 10 ans - Période hivernale avec couvert de glace - Horizon 2020 - Probable

HEC-RAS	Plan	Plan 45	River	RIVER-1	Reach	Reach-1	Profile	Q10-2020-Hiver-G								
Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W S Elev	Crit W S	E G Elev	E G Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude #	Ch			
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)					
Reach-1	25	Q10-2020-Hiver-G	153	56.69	61.34		61.34	0.00014	0.44	479.46	426.27	0.08				
Reach-1	24	Q10-2020-Hiver-G	153	55.47	61.31		61.32	0.000189	0.53	377.24	318.34	0.09				
Reach-1	23	Q10-2020-Hiver-G	153	55.01	61.29		61.29	0.000131	0.46	414.15	268.2	0.07				
Reach-1	22	Q10-2020-Hiver-G	153	51.81	61.27		61.28	0.000066	0.42	417.25	201.23	0.06				
Reach-1	21	Q10-2020-Hiver-G	153	52.27	61.24		61.25	0.000081	0.41	466.22	335.42	0.06				
Reach-1	20	Q10-2020-Hiver-G	153	55.47	61.19		61.21	0.000197	0.57	296.34	171.86	0.09				
Reach-1	19	Q10-2020-Hiver-G	153	55.32	61.17		61.18	0.000171	0.51	353.08	200.11	0.08				
Reach-1	18	Q10-2020-Hiver-G	153	56.5	61.14		61.15	0.000234	0.49	362.99	229.32	0.09				
Reach-1	17	Q10-2020-Hiver-G	153	56.2	61.11		61.12	0.000138	0.43	446.45	256.63	0.07				
Reach-1	16	Q10-2020-Hiver-G	153	54.22	61.1		61.11	0.000065	0.33	596.65	353.06	0.05				
Reach-1	15	Q10-2020-Hiver-G	153	54.68	61.08		61.09	0.000135	0.5	379.23	250.29	0.08				
Reach-1	14	Q10-2020-Hiver-G	153	54.37	61.06		61.07	0.000138	0.52	296.49	66.08	0.08				
Reach-1	13	Q10-2020-Hiver-G	153	56.13	61.01	58.96	61.06	0.001492	0.95	160.98	59.89	0.19				
Reach-1	12.5		Bridge													
Reach-1	12	Q10-2020-Hiver-G	153	56.13	61.01		61.06	0.001495	0.95	160.89	59.89	0.19				
Reach-1	11	Q10-2020-Hiver-G	153	56.45	60.99		61.05	0.002062	1.08	142.18	56.55	0.22				
Reach-1	10	Q10-2020-Hiver-G	153	57.39	60.87		60.92	0.001496	0.94	161.98	62.13	0.19				
Reach-1	9	Q10-2020-Hiver-G	153	57.13	60.85	58.77	60.89	0.002986	0.92	166.25	59.11	0.18				
Reach-1	8.5		Bridge													
Reach-1	8	Q10-2020-Hiver-G	153	57.13	60.83		60.87	0.003053	0.93	165.12	59.11	0.18				
Reach-1	7	Q10-2020-Hiver-G	153	54.25	60.83		60.84	0.000725	0.58	264.4	82.01	0.09				
Reach-1	6	Q10-2020-Hiver-G	153	54.25	60.68		60.7	0.001159	0.72	211.99	60.51	0.12				
Reach-1	5	Q10-2020-Hiver-G	179	54.25	60.51		60.53	0.001054	0.67	266.54	75.39	0.11				
Reach-1	4	Q10-2020-Hiver-G	179	56.6	60.14	58.89	60.28	0.010545	1.64	109.24	51.15	0.36				
Reach-1	3.5		Bridge													
Reach-1	3	Q10-2020-Hiver-G	179	56.4	60.08		60.2	0.008616	1.54	116.58	51.53	0.33				
Reach-1	2	Q10-2020-Hiver-G	179	56.18	60.04		60.1	0.002658	1.07	167.86	63.59	0.21				
Reach-1	1	Q10-2020-Hiver-G	179	53.33	60.02	55.8	60.04	0.0005	0.61	291.99	72.58	0.1				

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Cru de récurrence 10 ans - Période hivernale avec couvert de glace - Horizon 2050 - Probable

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 45 Profile	River RIVER-1	Reach Q Total (m ³ /s)	Reach-1 Min Ch El (m)	Profile W S Elev (m)	Q10-2050-Hiver-G Crt W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Froude # Chl
Reach-1	25	Q10-2050-Hiver-G		187	56.69	61.8		61.81	0.000092	0.38	682.3	447.32	0.06
Reach-1	24	Q10-2050-Hiver-G		187	55.47	61.78		61.79	0.000136	0.48	536.97	352.4	0.08
Reach-1	23	Q10-2050-Hiver-G		187	55.01	61.76		61.77	0.000105	0.44	566	357.32	0.07
Reach-1	22	Q10-2050-Hiver-G		187	51.81	61.75		61.76	0.000067	0.45	534.33	289.87	0.06
Reach-1	21	Q10-2050-Hiver-G		187	52.27	61.72		61.72	0.000072	0.41	641.1	395.05	0.06
Reach-1	20	Q10-2050-Hiver-G		187	55.47	61.67		61.69	0.000177	0.58	391.24	212.27	0.09
Reach-1	19	Q10-2050-Hiver-G		187	55.32	61.65		61.66	0.000145	0.5	454.66	217.08	0.08
Reach-1	18	Q10-2050-Hiver-G		187	56.5	61.63		61.64	0.000172	0.46	477.14	234.09	0.08
Reach-1	17	Q10-2050-Hiver-G		187	56.2	61.61		61.62	0.000106	0.41	582.23	310.15	0.07
Reach-1	16	Q10-2050-Hiver-G		187	54.22	61.6		61.61	0.000057	0.33	787.29	408.04	0.05
Reach-1	15	Q10-2050-Hiver-G		187	54.68	61.58		61.59	0.000127	0.5	517.58	302.77	0.07
Reach-1	14	Q10-2050-Hiver-G		187	54.37	61.56		61.57	0.000155	0.57	330.42	70.07	0.08
Reach-1	13	Q10-2050-Hiver-G		187	56.13	61.51	59.13	61.56	0.001279	0.98	190.81	59.94	0.18
Reach-1	12.5		Bridge										
Reach-1	12	Q10-2050-Hiver-G		187	56.13	61.51		61.56	0.001281	0.98	190.72	59.94	0.18
Reach-1	11	Q10-2050-Hiver-G		187	56.45	61.49		61.55	0.00173	1.09	170.8	57.83	0.2
Reach-1	10	Q10-2050-Hiver-G		187	57.39	61.39		61.44	0.001276	0.96	194.94	64.73	0.18
Reach-1	9	Q10-2050-Hiver-G		187	57.13	61.37	58.92	61.42	0.002586	0.95	197.16	59.22	0.17
Reach-1	8.5		Bridge										
Reach-1	8	Q10-2050-Hiver-G		187	57.13	61.35		61.4	0.00263	0.95	196.12	59.22	0.17
Reach-1	7	Q10-2050-Hiver-G		187	54.25	61.35		61.37	0.00071	0.62	308.55	85.98	0.09
Reach-1	6	Q10-2050-Hiver-G		187	54.25	61.2		61.23	0.001157	0.77	246.64	71.39	0.12
Reach-1	5	Q10-2050-Hiver-G		220	54.25	61.04		61.06	0.001029	0.72	309.28	96.93	0.11
Reach-1	4	Q10-2050-Hiver-G		220	56.6	60.7	59.08	60.83	0.007649	1.59	138.51	52.65	0.31
Reach-1	3.5		Bridge										
Reach-1	3	Q10-2050-Hiver-G		220	56.4	60.66		60.77	0.006416	1.5	146.68	53.06	0.29
Reach-1	2	Q10-2050-Hiver-G		220	56.18	60.63		60.69	0.002085	1.07	208.44	76.58	0.19
Reach-1	1	Q10-2050-Hiver-G		220	53.33	60.61	56.02	60.63	0.000501	0.66	336.49	82.47	0.1

Annexe 9 - Résultats de simulations HEC-RAS

Cru de récurrence 10 ans - Période hivernale avec couvert de glace - Horizon 2080 - Probable

HEC-RAS Reach	Plan River Sta	Plan 45 Profile	River RIVER-1	Reach Reach-1	Reach-1 Q Total (m ³ /s)	Profile Min Ch El (m)	Q10-2080-Hiver-G W S Elev (m)	Crit W S (m)	E G Elev (m)	E G Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Froude # CH
Reach-1	25	Q10-2080-Hiver-G			210	56.69	62.11		62.12	0.000071	0.35	823.92	459.68	0.06
Reach-1	24	Q10-2080-Hiver-G			210	55.47	62.1		62.1	0.000108	0.45	651.34	369.94	0.07
Reach-1	23	Q10-2080-Hiver-G			210	55.01	62.08		62.09	0.000087	0.42	687.33	401.9	0.06
Reach-1	22	Q10-2080-Hiver-G			210	51.81	62.07		62.08	0.000063	0.45	636.56	348.42	0.06
Reach-1	21	Q10-2080-Hiver-G			210	52.27	62.04		62.05	0.000063	0.4	775.35	434.3	0.05
Reach-1	20	Q10-2080-Hiver-G			210	55.47	62		62.02	0.000157	0.57	464.07	231.93	0.08
Reach-1	19	Q10-2080-Hiver-G			210	55.32	61.98		61.99	0.000126	0.49	528.86	235.4	0.07
Reach-1	18	Q10-2080-Hiver-G			210	56.5	61.97		61.97	0.000141	0.44	559.61	260.97	0.08
Reach-1	17	Q10-2080-Hiver-G			210	56.2	61.95		61.96	0.000089	0.39	698.29	372.7	0.06
Reach-1	16	Q10-2080-Hiver-G			210	54.22	61.94		61.95	0.00005	0.33	931.4	439.94	0.05
Reach-1	15	Q10-2080-Hiver-G			210	54.68	61.92		61.93	0.000111	0.49	626.96	334.09	0.07
Reach-1	14	Q10-2080-Hiver-G			210	54.37	61.9		61.91	0.000163	0.59	354.68	72.8	0.09
Reach-1	13	Q10-2080-Hiver-G			210	56.13	61.85	59.24	61.9	0.001159	0.99	211.17	59.97	0.17
Reach-1	12.5				Bridge									
Reach-1	12	Q10-2080-Hiver-G			210	56.13	61.85		61.9	0.001161	0.99	211.08	59.97	0.17
Reach-1	11	Q10-2080-Hiver-G			210	56.45	61.83		61.89	0.001547	1.1	190.68	58.74	0.2
Reach-1	10	Q10-2080-Hiver-G			210	57.39	61.74		61.79	0.001149	0.96	218.1	67.62	0.17
Reach-1	9	Q10-2080-Hiver-G			210	57.13	61.72	59.01	61.77	0.002365	0.96	218.12	59.3	0.16
Reach-1	8.5				Bridge									
Reach-1	8	Q10-2080-Hiver-G			210	57.13	61.71		61.75	0.0024	0.97	217.13	59.3	0.16
Reach-1	7	Q10-2080-Hiver-G			210	54.25	61.71		61.73	0.000684	0.63	339.59	88.58	0.09
Reach-1	6	Q10-2080-Hiver-G			210	54.25	61.56		61.59	0.001119	0.79	274.09	83.31	0.12
Reach-1	5	Q10-2080-Hiver-G			247	54.25	61.41		61.44	0.000945	0.73	349.16	111.23	0.11
Reach-1	4	Q10-2080-Hiver-G			247	56.6	61.11	59.2	61.23	0.006211	1.54	159.94	53.72	0.29
Reach-1	3.5				Bridge									
Reach-1	3	Q10-2080-Hiver-G			247	56.4	61.07		61.18	0.005289	1.46	168.63	54.14	0.26
Reach-1	2	Q10-2080-Hiver-G			247	56.18	61.05		61.1	0.001723	1.05	240.95	78.26	0.18
Reach-1	1	Q10-2080-Hiver-G			247	53.33	61.03	56.15	61.05	0.0005	0.67	374.84	100.76	0.1

BIBLIOGRAPHIE

- Abe-Ouchi, A. *et al.* 1996. *Outline of coupled atmosphere and ocean model and experiment*. Internal report, Centre for Climate System Research, University of Tokyo, Japan.
- Abrinord (Agence de bassin de la rivière du Nord), 2006. *Portrait et diagnostic du bassin versant de la rivière du Nord – Version complète*. 267 p.
- AFPL (Agence de mise en valeur de la forêt privée des Laurentides), 2001. *Plan de protection et de mise en valeur (PPMV) des forêts privées des Laurentides*, Tome 1 : Document de connaissances, Mont-Laurier, 314 p.
- Bell, J., Duffy, P., Covey, C., et Sloan, L. 2000. Comparison of temperature variability and observations and sixteen climate model simulations. *Geophysical research Letters*, v. 27 (n.2), p.262-264
- Bellamy, S., Boyd, D., Minshall, L. 2002. *Determining the effect of climate change on the hydrology of the Grand River watershed*. Rapport rédigé pour le Fonds d'action pour le changement climatique.
- Beltaos, S. 1997. «Effects of climate on river ice jams», compte rendu du 9e atelier sur la glace fluviale, Fredericton (Nouveau-Brunswick), p.225-244.
- Bergström S., Carlsson B., Gardelin M., Lindström G., Petterson A. et Rummukainen M., 2001. *Climate change impacts on runoff in Sweden - assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling*. *Climate Research*, 16: p.101-112.
- Blais, D., Bazogue, A. et Côté, M-J. 2005. *Caractérisation et classification des lacs de la MRC d'Argenteuil, de la MRC de la Rivière-du-Nord, de la MRC des Pays d'en Haut et de la MRC des Laurentides*. Direction du patrimoine écologique, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 19 p.
- Bobee, B. 1975. *The log-Pearson type 3 distribution and its application in hydrology*. *Water resources Res.*, 11(5), p. 419-424.
- Boucher, J.-P., Hébert, L., et Picard, F. 1989. *Cartographie des zones inondables – Rivière du Nord*. Direction du domaine hydrique, ministère de l'Environnement, 14 p. et annexes.
- Casas, A., Benito, G., Thorndycraft, V.R. et Rico, M. 2006. *The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling*. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 444-456.

- Caya, D. et Laprise, R. 1999. *A semi-implicit Semi-Lagrangian Regional Climate Model : The Canadian RCM*. Monthly Weather Review, 127, p.341-362.
- CCMAC. 1990. *Application of the Canadian climate center general circulation model output for regional impact studies – Guidelines for users*. Canadian Climate Center. Atmospheric Environment Service. Downsview, Canada.
- CEHQ (Centre d'expertise hydrique du Québec). 2007. Communication personnelle. Ministère du Développement durable de l'environnement et des parcs. Québec.
- CEHQ (Centre d'expertise hydrique du Québec). 2008a. «Zones inondables – Réalisation au Québec». In *Le site du Centre d'expertise hydrique du Québec*. En ligne. <<http://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/index.htm>> Consulté le 15 janvier 2008.
- CEHQ (Centre d'expertise hydrique du Québec). 2008b. *Répertoire des barrages*. In *Le site du Centre d'expertise hydrique du Québec*. En ligne. <<http://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/ListeBarrages.asp?region=Laurentides&Num=15&Tri=No>> Consulté le 7 janvier 2008.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., et Mays, L.W. 1988. Applied hydrology. New York.
- CNRC (Conseil national de recherches Canada). 1990. *Hydrologie des crues au Canada – Guide de planification et de conception*. Conseil national de recherches Canada. 277 p.
- Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages. 1997. *Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages : Rapport Nicolet*, Québec. La Commission, 350 p. plus annexes.
- Cook, D.J., Dickinson, W.T. 1986. *Impact of urbanization on hydrologic response of a small Ontario Watershed*. Revue canadienne de génie civil, 13(6), p. 620-630.
- Cunnane, C. 1973. *A particular comparison of annual maxima and partial duration series methods of flood frequency prediction*. J. Hydrol., 18 p. 257-271.
- Desmeules, J. et Gélinas, J.P., 1978. *Caractéristiques physiques et démographiques : bassin versant de la rivière du Nord*. Direction générale des eaux, ministère des Richesses naturelles du Québec, 122 p.
- DHI. 1993. *MIKE 11 short description*. Danish Hydraulic Institute.
- Diaz-Nieto J. et Wilby R.L., 2005. *A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom*. Climatic Change, 69(2 - 3). p.245-268.

- Dooty, W., Lam, D., Bowen, G., Resler, O., et Leon, L. 2005. *Modeling changes in stream water quality due to climate change in a southern Ontario watershed*. Canadian Water Resources Journal, 30(3), p.211-226.
- Emori, S., Nozawa T., Abe-Ouchi A., Numaguti A., Kimoto M., et Nakajima T. 1999. *Coupled ocean-atmosphere model experiments of future climate change with an explicit representation of sulfate aerosol scattering*. *J.Meteor. Soc. Japan*, (submitted).
- Environnement Canada et le ministère de l'Environnement du Québec. 1992. Carte du risque d'inondation : Lachute-Rivière du Nord, 31G09-020-1307-0. 1 :2000. Québec.
- Environnement Canada et le ministère de l'Environnement du Québec. 1992. Carte du risque d'inondation : Lachute-Rivière du Nord, 31G09-020-1407-3. 1 :2000. Québec.
- Environnement Canada. 1997. *Chapitre québécois de l'étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique*. Par Luc Bergeron, Gérald Vigeant et Jacinthe Lacroix.
- Environnement Canada. 2004. *Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada*. Institut national de recherche scientifique, Burlington, Ontario. Rapport No 3, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC, numéro 1. 148 p.
- Environnement Canada. 2008. « Données climatiques en ligne ». In *Le site d'environnement Canada*. En ligne. <http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada_f.html>. Consulté le 12 juin 2008.
- Ferignac, P. 1962. *Test de Kolmogorov-Smirnov sur la validité d'une fonction de distribution*. Revue de statistique appliquée, tome 10, no 4. p. 13-32.
- Fortin, J.P., Moussa, R., Bocquillon, C., et Villeneuve, J.P. 1995. *Hydrotel, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique*. Revue des sciences de l'eau, 8(1) : 97-124.
- Fortin, J.P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., et Villeneuve, J.P. 2001. *A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part 1: Description of the model*. Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 6(2): 91-99.

- Fortin, L.-G., Turcotte, R., Pugin, S., Cyr, J.-F., et Picard, F., 2007. *Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des lacs Saint-François et Aylmer au sud du Québec*. Can. J. Civ. Eng. 34, p.934-945.
- Frigon, A., Caya, D., Slivitsky, M., et Tremblay, D. 2002. *Investigation of the hydrologic cycle simulated by the Canadian Regional Climate Model over the Quebec/Labrador territory*. In Beniston, m. (ed), Climatic Change: Implication for the Hydrological Cycle and for Water Management, Advances in Global Change Research. 10. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht and Boston, p.31-55.
- Geoffroy, J. 2007. *Modélisation des paramètres morphogènes du cours inférieur de la Bruche (Bas-Rhin) et analyse de la sensibilité du modèle HEC-RAS à la qualité des données topographiques*. Mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES. Université Louis Pasteur. Strasbourg. France, 86 p.
- GIEC. 2000. Special report on emissions scenarios.
- Gordon, H. B., and S. P. O'Farrell, 1997: Transient climate change in the CSIRO coupled model with dynamic sea ice. Mon. Wea. Rev., 125, 875- 907.
- Gordon, C., C. Cooper, C.A. Senior, H.T. Banks, J.M. Gregory, T.C. Johns, J.F.B. Mitchell et R.A. Wood. 2000. *The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments*. Clim. Dyn., 16, 147-168.
- Gosnold, W.D., LeFever, J.A., Todhunter, P.E. et Osbourne L.F. Jr., 2000. *Rethinking flood prediction : does the traditional approach need to change ?*. Geotimes 45: 20-23.
- Guay, R., Mathieu, C., Fagherazzi, I., Tremblay, D., Desrochers G. et Sassi T., 2004. *Analyses des incidences du changement climatique sur le réseau fluvial de la rivière des Outaouais*.
- Gueudet, P. 2004. *The influence of Post-Spacing Density of DEMs derived from LIDAR on flood modeling*. Thesis of Master of Science in Engineering, University of Texas, Austin. USA, 119 p.
- Hengeveld, G. H., Bush, E., Edward, P., 2002. *Questions fréquemment posées au sujet de la science du changement climatique*. Service météorologique du Canada, ministère de l'Environnement du Canada. 40 p.
- Hoffman, N., Mortsch, L., Donner, S., Duncan, K., Kreutzwiser, R., Kulshreshtha, S., Piggot, A., Schellenberg, S., Schertzer, B., et Slivitsky, M. 1998. «Chapitre 1, Changement et variabilité climatiques: Impact sur l'eau du Canada», In *L'étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique : Questions sectorielles*. Ottawa (Canada) : Environnement Canada.

- Horritt M.S. et Bates P.D. 2001. Predicting floodplain inundation :rasted-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrological Processes* 15(5): 825-842.
- INRS-ETE. 2000. «Modèle hydrologique Hydrotel: Processus». En ligne. 5 p. <
<http://www.inrs-ete.quebec.ca/activites/modeles/hydrotel/fr/processus.htm>>.
Consulté le 14 janvier 2008.
- IPCC-TGICIA. 1999. Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Version 1. Sous la direction de T.R. Carter, M. Hulme et M. Lal. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenario for Climate Impact Assessment (IPCC-TGICIA), Genève, Suisse.
- IPCC-TGICA. 2007. *General Guidelines on the use of scenario data for climate impact and Adaptation Assessment*. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario support for Impact and Climate Assessment. 66 pp.
- Kharin, V. V., et Zwiers, F.W., 2000. *Changes in the extremes in an Ensemble of Transient Climate simulations with a Coupled Atmosphere-Ocean GCM*. *Journal of climate*, v. 13 (n.21), p.3760, 3729 p.
- Kilsby, C., Buishand, T., & Jones P., 1999. *Production of precipitation scenario for impact assessment of climate change in Europe (POPSICLE)*, final report to the EU: EU.
- Knox, J.C. 1993. *Large increases in flood magnitude in response to modest changes in climate*. *Nature* 361, p. 430-432.
- Kumar, A., Burton, I., Etkin, D. 2001. *Gérer les dangers et les risques d'inondation : Rapport d'un groupe d'experts indépendant*. Bureau de la protection des infrastructures essentielles et de la protection civile. Gouvernement du Canada. 40 p et annexes.
- Lajoie, P. G. 1960. *Les sols des comtés d'Argenteuil, Deux-Montagnes et Terrebonne*. Services de recherches, ministère de l'agriculture du Canada en collaboration avec le ministère de l'Agriculture de Québec et le collège Macdonald, Université McGill.
- Laprise, R., Caya, D., Frigon, A. et Paquin, D. 2003. *Current and perturbed climate as simulated by the second-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM-II) over north-western North America*, *Climate Dynamics* (accepté).
- Leconte, Robert. 2001. *CTN-537 : Gestion des ressources hydriques*. Notes du cours CTN-537 du programme de baccalauréat de génie de la construction, Montréal : École de Technologie Supérieure, pagination multiple 194 p.

- Le Treut, H. et Gautier, C. 2007. « Effet de serre, bilan radiatif et nuages ». In *Comprendre le changement climatique*, sous la dir. de Jean-Louis Fellous et Catherine Gautier, p. 45-67. Paris (France) : Odile Jacob.
- Linacre, E.T. (1977). *A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone*. *Agricultural Meteorology*, 18, 409-424.
- Llamas, J. 1993. *Hydrologie générale – Principes et applications*. 2^e édition, Gaëtan Morin éditeur, 527 pages.
- MAPAQ (Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation du Québec). 1998. *Rivière du Nord : utilisation du sol, image satellitaire LandSat TM classifiée de 1994*. Direction régionale de l'Outaouais – Laurentides.
- Mareuil, A. 2005. « Impact des changements climatiques sur les crues extrêmes des rivières : Cas de la rivière Chateauguay ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 125 p.
- McCuen, R. 2003. *Modeling Hydrologic Change : Statistical Methods*. Boca Raton, Florida : CRC Press. 433 p.
- McFarlane, N.A., G.J. Boer, J.-P. Blanchet, et M. Lazare (1992): *The Canadian Climate Centre Second-Generation General Circulation Model and Its Equilibrium Climate*. *J. Climate*, 5, 1013-1044.
- McFarlane, N.A., J. F. Scinocca, M. Lazare, R. Harvey, D. Verseghy, et J. Li, 2005: *The CCCma third generation atmospheric general circulation model*. CCCma Internal Rep., 25 pp.
- Monteith, J.L. (1965). *Evaporation and environment*. *Symp. Soc. expl. Biol*, 19, 205-234.
- Morin, G., Fortin, J.P. et al. 1981. *Modèle CEQUEAU : Manuel d'utilisation*. INRS-EAU.
- Morin, G. et Slivitsky M., 1992. *Impact de changements climatiques sur le régime hydrologique de la rivière Moisie*. *Revue des sciences de l'eau*, 5 (2), p. 179-195.
- Moussa, R. 1991. *Variabilité spatio-temporelle et modélisation hydrologique : application au bassin du Gardon d'Anduze*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier II, 314 p.
- MRNFP (Ministère des Ressources naturelles du Québec), 1998. *Cartes écoforestières du Québec. Forêt Québec, Direction des inventaires forestiers, troisième programme d'inventaire décennal*, Québec, 19 feuillets, 1 : 20 000.

- Nicholas A.P. et Walling D.E. 1997. *Modelling flood hydraulics and overbank deposition on river floodplains*. Earth Surface Processes and Landforms 22: 59-77.
- Nozdryn-Plotnicki, M.J. et Watt, W.E. 1979. Assessment of fitting techniques for the log Pearson type 3 distribution using Monte Carlo simulation. Water Resources., 15(3), p. 714-718.
- Ouranos. 2004. *S'adapter aux changements climatiques*. Ouranos, Montréal, Québec.
- Ouranos. 2007. «4e rapport du GIEC». En ligne. 7p.
http://www.ouranos.ca/intro/IPCC2007_f.html>. Consulté le 30 octobre 2007.
- Pope, V., M.L. Gallani, P.R. Rowntree, et R.A. Stratton. 2000. The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadCM3. *Clim. Dyn.*, 16, 123-146.
- Priestley, C.H.B., et Taylor, R.J. (1972). *On the assesment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters*. Monthly Weather Review, 100, 81-92.
- Prudhomme, C., Raynard, N. et Crooks, S. 2001. *Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now?* Hydrological processes, v. 16, 1137-1150.
- Prowse, T. et Beltaos, S. 2002. *Climatic control of river-ice hydrology : a review*. Hydrological Processes, vol. 16 (4), p.805-822.
- Québec (Province). A jour au 1^{er} février 2008. *Loi sur la sécurité des barrages : L.R.Q., chapitre S-3.1.01*. En ligne. Québec (QC) : Editeur officiel du Québec.
<http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2>>. Consulté le 19 février 2008.
- Rao, A. R., et Hamed, K. H. 2000. *Flood Frequency Analysis*.
- Rawls, W.J., ASCE, Brakensiek, D.L. et Miller, N. 1983. *Green-Ampt Infiltration Parameters from soils data*. Journal of Hydraulic Eng., 109 (1), pp:___
- Rawls, W. et Brakensiek, D.L. 1989. *Estimation of soil water retention and hydraulic properties*. In: Morel-Seytou (eds). *Unsaturated flow in hydrologic Modelling: Theoric and Practice*. Kluwer Academic Publisher, pp. 275-300.
- Roeckner, E., K. Arpe, L. Bengtsson, M. Christoph, M. Claussen, L. Dümenil, M. Esch, M. Giorgetta, U. Schlese, et U. Schulzweida. 1996. *The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate*. Max Planck Institut für Meteorologie, Report No. 218, Hambourg, Allemagne, 90 pp.

- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt, 2007: Résumé technique. In: Bilan 2007 des changements climatiques 2007: *Les bases scientifiques. Contribution du groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis d'Amérique.
- Thornthwaite, C.W. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. Geog. Rev., 38, 55-94.
- Turcotte, R., Rousseau, A.N., Fortin, J.P., et Villeneuve, J.P. 2004a. *Prévision hydrologique distribuée pour la gestion des barrages publics du Québec*. Canadian Journal of Civil engineering, 31(2) : 308-320.
- Turcotte, R., Lafleur, J., Picard, F., Lacombe, P., Latraverse, M., et Tremblay, D. 2004b. *La mise en place de systèmes de prévision hydrologique et d'aide à la gestion des barrages publics du Québec comme mesure d'adaptation face aux conditions hydrologiques extrêmes*. Dans 57^e congrès de l'Association canadienne des ressources hydriques, Montréal, Québec, du 16 au 18 juin 2004.
- Turcotte, R., Favre, A.C., Lacombe, P., Poirier, C et Villeneuve, J.P. 2005. *Estimation des débits sous glace dans le sud Québec : Comparaison de modèles neuronal et déterministe*. Canadian Journal of Civil engineering, 34 : 934-945
- USACE. 1991. HEC-2: Water surface profiles, user's manual. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Logiciel. Davis, California.
- USACE. 1995. HEC-RAS River Analysis System, hydraulic user's manual. Version 1.0. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Logiciel. Davis, California
- USACE. 2005. HEC-RAS: River Analysis System, user's manual. Version 3.1.3. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Logiciel. Davis, California.
- Villeneuve, C. et Richard, F. 2005. *Vivre les changements climatiques, Quoi de neuf ? Québec* : Éditions MultiMondes, 382 p.
- Wald, A. et Wolfowitz, J. 1943. *An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation*. An. Math. Stat., 14, p. 378-388.

- Wilby R.L. et Wigley T.M.L. 1997. *Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations*. Progress in Physical Geography, 21(4): 530-548.
- Wilby R.L., Hay L.E., Gutowski W.J.J., Arritt R.W., Takle E.S., Pan Z., Leavesley G.H. et Clark M.P., 2000. *Hydrological responses to dynamically and statistically downscaled climate model output*. Geophysical Research Letters, 27(8): 1199-1202.
- Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., et Mearns, L.O. 2004. *Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods*. En ligne. Intergovernmental Panel in Climate Change (IPCC) data distribution center, Technical guidelines and other supporting material. Disponible à www.ipcc-data.org/guidelines/dgm_no2_v1_09_2004.pdf . Consulté le 15 août 2007.
- Wilcoxon, F. 1945. *Individual comparison by ranking methods*. Biometrics, 1 : 6 pp. 80-83
- Wood A.W. et Maurer E.P. 2002. *Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States*. Journal of Geophysical Research, 107(D20): 4429.
- Wood A.W., Leung L.R., Sridhar V. et Lettenmaier D.P. 2004. *Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model output*. Climatic Change, 62. 189-216.
- Yagouti, A., Boulet, G., Vescosi. 2006. *Homogénéisation des séries de température et analyse de la variabilité spatio-temporelle de ces séries au Québec méridional*. Consortium Ouranos, Montréal, Canada. 117 p.
- Zwiers, F. W., et Kharin, V. V. 1998. Changes in the Extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO2 doubling. Journal of climate, v.11 (n.9), p.2200, 2223.