

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE.....	3
1.1 Problématique	3
1.2 Contribution scientifique	4
1.3 Objectifs des travaux.....	5
1.4 Hypothèses de recherche.....	6
CHAPITRE 2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	9
2.1 Approches de calcul de la PMP	10
2.1.1 Méthode de maximisation de l'humidité	12
2.1.2 Eau précipitable	13
2.1.3 Modélisation de la CMP	17
2.2 Science du changement climatique	19
2.2.1 Modélisation du climat	19
2.2.2 Utilisation des sorties de modèles numériques en hydrologie	21
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DU CALCUL DE LA PMP	23
3.1 Sélection d'averses.....	26
3.1.1 Seuil minimal	27
3.1.2 Durée d'averse	28
3.2 Eau précipitable durant l'averse.....	29
3.3 Eau précipitable maximale.....	32
3.4 Rapport de maximisation	33
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE DU CALCUL DE LA CMP.....	35
4.1 Coefficient d'abattement de superficie	36
4.2 Hyéogramme de la PMP	38
4.2.1 Méthode HMR	40
4.2.2 Méthode SNC.....	41
4.2.3 Méthode par moyenne de la fraction cumulative.....	42
4.2.4 Méthode par moyenne du temps moyen	44
4.3 Modélisation hydrologique de la PMP	44
4.3.1 Calibrage du modèle	45
4.3.2 Mode d'insertion de la PMP inspirée de l'OMM	46
4.3.3 Mode d'insertion aléatoire de la PMP	46
4.3.4 Définition des périodes d'été-automne des horizons	48
CHAPITRE 5 ÉTUDE DE CAS	50
5.1 Description générale du bassin versant.....	50
5.2 Données nécessaires à l'estimation de la PMP	52
5.2.1 Couverte spatiale et temporelle	54

5.3	5.2.2 Horizons à l'étude	56
	Données nécessaires à la modélisation hydrologique	56
	5.3.1 Données météorologiques	56
	5.3.2 Données hydrométriques	57
5.4	Préparation du modèle hydrologique	58
	5.4.1 Calibrage et validation du modèle	58
	CHAPITRE 6 ESTIMATION DE LA PMP	62
6.1	Sélection des averses.....	62
6.2	Eau précipitable durant l'averse.....	65
6.3	Eau précipitable maximale.....	67
6.4	Maximisation et calcul de la PMP	72
	CHAPITRE 7 MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DE LA CMP	74
7.1	Coefficient d'abattement.....	74
7.2	Hyéogramme.....	75
7.3	Calcul de la CMP	79
	CHAPITRE 8 DISCUSSION	86
8.1	Discussion sur la PMP	86
8.2	Discussion sur la CMP	89
	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	94
	ANNEXE I HYÉTOGRAMMES UNITAIRES CUMULATIFS	97
	ANNEXE II COORDONNÉES DES TUILES UTILISÉES DU MRCC	105
	ANNEXE III HYDROGRAMMES COMPARATIFS	114
	ANNEXE IV COURBES DE DENSITÉ DE PROBABILITÉ.....	118
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	126

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 6.1 Compilation des tempêtes et des averses pour les simulations 'aft' et 'afx', de 1961 à 2100, durant la période été-automne.....	63
Tableau 6.2 Compilation des averses, selon la durée, pour les simulations 'aft' et 'afx' de 1961 à 2100, durant la période été-automne.....	64
Tableau 6.3 Rapport de maximisation selon l'horizon et de la durée d'averse.....	73
Tableau 6.4 Valeurs calculées de précipitation maximisée (mm), selon l'horizon et la durée d'averse.....	73
Tableau 7.1 Coefficient d'abattement moyen, selon l'horizon et la durée d'averse.....	74
Tableau 7.2 Valeurs de PMP à l'échelle du bassin (mm), selon l'horizon et la durée d'averse.....	75
Tableau 7.3 Plage de valeurs pour les débits simulés (m^3/s) selon la méthode d'insertion inspirée par celle de l'OMM, pour les simulations 'aft' et 'afx' et pour les durées d'averse de 24 à 72 heures	83

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 3.1	Organigramme de la méthode de calcul de la PMP.....	25
Figure 3.2	Hyéogramme type d'une averse de 24h.....	28
Figure 3.3	Exemple de profil d'humidité du MRCC, selon la simulation 'aft' en date du 1961-07-14-18.....	29
Figure 3.4	Profil annuel type d'eau précipitable de l'année 1968, simulation 'aft' et sur la tuile 144 du MRCC.....	30
Figure 3.5	Variation type d'eau précipitable, pour le mois d'août 1968, simulation 'aft' et sur la tuile 144 du MRCC.....	31
Figure 4.1	Organigramme de la méthode de calcul de la CMP.	36
Figure 4.2	Orientation de l'averse _{bassin} , pour la tuile d'intensité maximale marquée d'un 'X'.....	38
Figure 4.3	Exemple de hyéogramme standard.	39
Figure 4.4	Hyéogramme standard proposé par le NOAA.....	40
Figure 4.5	Hyéogramme ordonné selon HMR sur la séquence de l'averse originale maximisée en a) et sur la séquence d'averse de la PMP, telle que présenté par la méthode HMR en b).....	41
Figure 4.6	Hyéogramme standard proposé par SNC-Lavalin.	42
Figure 4.7	Méthode du hyéogramme 'moyen'.	43
Figure 4.8	Méthode du hyéogramme 'cumul'.	43
Figure 4.9	Exemple d'une courbe de densité de probabilité.....	47
Figure 4.10	Exemple de courbe cumulative de distribution.....	48
Figure 5.1	Mini atlas du bassin versant Manic5,en a) réseau hydrographique, en b) classes de sol, en c) topographie et en d) couverture du sol.....	51
Figure 5.2	Hydrogramme observé moyen du bassin Manic5, pour la période de 1966 à 2003.....	52

Figure 5.3	Points de grille du bassin versant de la rivière Manicouagan.....	55
Figure 5.4	Identification de la période été-automne sur une année type (1967).....	60
Figure 5.5	Résultats de calibrage du bassin Manic5. a) calibration sur période de 1989 à 2003 et b) validation sur période de 1974 à 1988.	61
Figure 6.1	Détermination de la période d'été-automne à partir de l'hydrogramme simulé.....	62
Figure 6.2	Évolution du nombre d'averses identifiées au tableau 6.2, pour la simulation 'afx'	65
Figure 6.3	Profil d'humidité spécifique en date du 15 octobre 1961, à 18 :00.....	66
Figure 6.4	Évolution au cours d'une averse type,.....	67
Figure 6.5	Sensibilité du seuil RH dans le calcul de maximisation d'eau précipitable, valeur saisonnière 30 jours, résultat présenté sur les données MRCC 'aft', tuile au centre du bassin Manic5 (no 144).....	68
Figure 6.6	Quantité maximale d'eau précipitable sous le climat récent (1961-2000) pour les simulations 'aft' et 'afx' (tuile 144).	68
Figure 6.7	Quantité maximale d'eau précipitable pour tous les horizons couverts par la simulation 'afx' (tuile 144).	69
Figure 6.8	Moyenne de pw_{max} (mm) de juillet à octobre, inclusivement, en climat récent de 1961-2000, selon a) simulation 'aft' et b) simulation 'afx'	70
Figure 6.9	Écart entre les moyennes de pw_{max} (mm) de juillet à octobre, inclusivement, entre les simulations 'aft' et 'afx'.	71
Figure 6.10	Moyenne de pw_{max} (mm) de juillet à octobre, inclusivement, en climat récent et futur selon la simulation 'afx', a) 1961-2000, b) 2011-2040, c) 2041-2070 et d) 2071-2100.....	72
Figure 7.1	Hyéogramme au pas de 6h de la PMP de 72h, simulation 'aft'.....	76
Figure 7.2	Hyéogramme journaliser de la PMP 72h, simulation 'aft'.	77
Figure 7.3	Hyéogramme au pas de 6h de la PMP de 48h, simulation 'aft'.....	78
Figure 7.4	Hyéogramme journalier de la PMP 48h, simulation 'aft'.....	78
Figure 7.5	Densité de probabilité des débits selon le mode aléatoire d'insertion de la PMP de 24h, simulation 'aft'.	79

Figure 7.6	Densité de probabilité des débits selon le mode aléatoire d'insertion de la PMP de 48h, simulation 'aft'.....	80
Figure 7.7	Densité de probabilité des débits selon le mode aléatoire d'insertion de la PMP de 72h, simulation 'aft'.....	80
Figure 7.8	Comparaison des densités de probabilité des débits selon le mode aléatoire de la PMP de 48h de la simulation 'afx', entre l'horizon récent (1961-2000, lignes tiretées) et l'horizon futur (2011-2040, lignes pointillées).....	81
Figure 7.9	Comparaison des densités de probabilité des débits selon le mode aléatoire de la PMP de 72h de la simulation 'afx', entre l'horizon récent (1961-2000, lignes tiretées) et l'horizon futur (2041-2070, lignes pointillées).....	82
Figure 7.10	Compilation des débits de pointe pour les averses de 48 heures (à gauche) et de 72 heures (à droite).....	84

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AMS	American Meteorological Society
CCmaC	Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CGCM	Coupled Global Climate Model (voir MCCG)
CMP	Crue maximale probable
EMP	Enneigement maximal probable
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPS	Global Positioning System
HMR	HydroMeteorological Report
MCCG	Modèle couplé climatique global
MCCG3	Modèle couplé climatique global, 3e version
MRCC	Modèle régional canadien du climat
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NLWIS	National Land and Water Information Service
NWS	National Weather Service
OMM	Organisation météorologique mondiale (voir aussi WMO)
PMP	Précipitation maximale probable
PMS	Probable maximum storm
SNC	SNC-Lavalin
SOT	Séquence optimale de température
SRES	Special Report on Emission Scenarios (rapport spécial sur les scénarios d'émission de GES)

UQAM	Université du Québec à Montréal
USWB	US Weather Bureau (maintenant USNWS)
USNWS	US National Weather Service
WMO	World Meteorological Organization (voir aussi OMM)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS D'AIRE

km ²	kilomètre carré
mi ²	mille carré

UNITÉS DE LONGUEUR

mm	millimètre
----	------------

UNITÉS DE PRESSION

Pa	Pascal
hPa	hectoPascal

UNITÉS DE PUISSANCE

MW	MégaWatt
----	----------

UNITÉS DE TEMPS

h	heure
s	seconde

INTRODUCTION

Le Québec est reconnu pour l'ampleur et l'étendue de ses ressources hydriques. Parmi ses plans d'eau, lacs et rivières, le niveau de bon nombre de ceux-ci est géré par barrage et plusieurs sont aménagés avec une centrale hydroélectrique. Sur son site internet, le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) répertorie plus de 5500 barrages d'une hauteur de plus d'un mètre sur l'ensemble du territoire québécois. Les plus grandes installations répondent aux besoins énergétiques, par la production d'hydroélectricité. Hydro-Québec gère plus d'une soixantaine de centrales hydroélectriques, tandis qu'une centaine de centrales sont sous la responsabilité de propriétaires privés. Certaines installations sont au fil de l'eau et d'autres possèdent un réservoir d'emmagasinement, mais toutes nécessitent des dispositifs d'évacuation nécessaires aux opérations et à la sécurité des riverains en aval. La gestion de risque comprend l'évaluation des dommages prévisibles (matériels, humains ou environnementaux), en cas de bris de barrage ou d'incapacité à accueillir un volume d'eau exceptionnel.

Depuis l'an 2000, les autorités ont renforcé les normes en matière de sécurité des barrages. L'adoption de la loi et du règlement sur les barrages (L.R.Q., c. S-3.1.01, r.1) concerne toutes les installations répertoriées par le CEHQ, ainsi que toute installation future. En vertu de ce règlement, tout propriétaire de barrage a l'obligation de valider régulièrement l'état et la fiabilité des ouvrages de retenue à forte contenance¹. Quatre niveaux de conséquence sont prévus : faible, moyen ou important, très important et considérable. Le processus inclut une vérification des crues de sécurité. Pour les barrages dont le niveau de conséquences est classé 'considérable', l'article 21 du règlement stipule que ceux-ci doivent être en mesure d'évacuer, en toute sécurité, un débit qui correspond à la crue maximale probable (CMP).

¹ Barrage à forte contenance : barrage d'une hauteur supérieure à 1m et un volume de retenue supérieur à 1000000m³ ou barrage d'une hauteur supérieure à 2,5m et un volume de retenue supérieur à 30000m³ ou barrage d'une hauteur supérieure à 7,5m sans limite de volume de retenue.

De vastes études font état de changements non-négligeables, non seulement au niveau des températures, mais également de la fréquence et de l'intensité des précipitations (GIEC, 2007). Les variations du climat sont suffisamment importantes pour soulever des inquiétudes et favoriser l'émergence d'une nouvelle science : la science du changement climatique. Celle-ci deviendrait nécessaire à la prise de décisions (Bourque et Simonet, 2008) lors du dimensionnement des ouvrages d'évacuation, à différentes étapes de projet (planification, conception, réalisation et exploitation).

Le fait que l'intensité des précipitations augmente est particulièrement préoccupant pour la sécurité des barrages car le lien avec les crues est direct. Les débits de conception des ouvrages existants ont été évalués selon des méthodes encore très actuelles, mais alimentées par de courtes séries d'observations ou basées sur des relations empiriques.

Dans ce contexte, cette présente recherche vise à évaluer une précipitation maximale probable (PMP) sous des conditions météorologiques projetées, ainsi que la CMP qui lui est associée. La confiance accrue envers les projections des différents modèles climatiques (GIEC, 2007) et la maturité des modèles régionaux (Laprise, 2008) permettent le développement d'une approche basée sur le caractère physique des phénomènes atmosphériques et hydrologiques. Cette étude espère apporter une réponse réaliste aux variations de la PMP et de la CMP. Elle porte uniquement sur les événements estivaux.

La présentation de ce rapport est conventionnelle. Le premier chapitre explique la problématique de recherche. Le deuxième est consacré à la revue bibliographique. Les troisième et quatrième chapitres présentent la méthodologie de l'évaluation de la PMP et de la CMP, respectivement. Le cinquième chapitre présente l'étude de cas. Les sixième et septième chapitres dévoilent les résultats obtenus dans l'estimation de la PMP et de la CMP, respectivement. Le huitième chapitre discute de ces résultats. Pour terminer, un certain nombre de recommandations sont énoncées et le travail est conclu.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

Ce chapitre permet de mettre en perspective les travaux réalisés dans le cadre de ce projet de maîtrise. Tout d'abord, une première section explique la problématique dans le contexte actuel. Une deuxième section met en lumière la contribution scientifique apportée par ces travaux. Ensuite, une troisième section énonce l'objectif principal et les objectifs secondaires à atteindre. Finalement, une dernière section formule les différentes hypothèses nécessaires à l'accomplissement des travaux.

1.1 Problématique

Les investissements requis pour la construction d'un barrage hydroélectrique sont importants et la conception d'un grand nombre d'ouvrages existants date de plusieurs décennies déjà. Les principes de pérennité et de développement durable établissent la durée de vie de ce type d'ouvrage entre 50 et 100 ans, tant pour les ouvrages existants que ceux à venir. Le niveau de protection quant à la sécurité civile et environnementale compte parmi les critères décisionnels les plus importants (Gouvernement du Québec, 2009a; Rio Tinto Alcan, 2009). Par conséquent, la crue de conception de ces ouvrages est établie en considérant le risque de dommages potentiels en cas de défaillance. Elle correspond souvent à la crue maximale probable (CMP) (Gouvernement du Québec, 2009b).

Par définition, la CMP est le plus fort débit qu'il soit raisonnable d'avoir lieu à un lieu particulier du réseau hydrographique. Lorsque la CMP dépend des conditions printanières, elle correspond à la réponse hydrologique à la combinaison de la précipitation maximale probable (PMP) et de la fonte rapide d'un manteau neigeux d'épaisseur extrême. C'est habituellement le cas pour les régions nordiques, comme le Québec. Sous des latitudes où le climat est plus clément et sans accumulation de neige au sol, la CMP correspond à la réponse hydrologique de la PMP seule.

Qu'elle soit printanière ou estivale, pour estimer la CMP, il est incontournable d'évaluer la PMP. En avant-projet, les méthodes approximatives d'évaluation de la PMP permettent d'obtenir un ordre de grandeur de la CMP. Cependant, la réalisation du projet requiert une estimation plus fine et la méthode courante d'estimation de la PMP repose sur des observations recueillies aux stations météorologiques. La CMP obtenue sur la base d'observations est adoptée pour la durée de vie et on s'attend à ce que les ouvrages soient en mesure de résister à la crue de conception durant toute la période.

Jusqu'à récemment, le climat était jugé stationnaire, c'est-à-dire sans variabilité autre que celle engendrée de façon naturelle (WMO, 1986). Tel que souligné par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le climat actuel est appelé à changer de façon significative, en raison de fortes émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique (GIEC, 2007). L'ampleur des changements anticipés amène le GIEC à émettre une mise en garde : les observations recueillies jusqu'à maintenant ne sont pas représentatives du climat futur. En effet, un ensemble de modèles prévisionnels du climat projettent que l'intensité et la fréquence des événements météorologiques extrêmes augmenteront. Ces nouveaux constats soulèvent maintes questions, non seulement quant à la pérennité des ouvrages existants, mais également à savoir si les estimations obtenues selon la méthode courante sont adéquates pour les ouvrages futurs.

1.2 Contribution scientifique

L'estimation d'une PMP selon la méthode courante nécessite, entre autres, l'évaluation de l'humidité contenue dans l'atmosphère. Le réseau actuel de stations météorologiques fournit des observations au sol et sa densité est faible et irrégulière. L'évaluation de l'humidité sur toute la profondeur de l'atmosphère doit être faite, par conséquent, à partir de la température près de la surface terrestre. Toute méthode d'évaluation ayant cette base produit une approximation. En regard de la problématique précédemment présentée, il est tout à fait pertinent d'explorer une approche qui permettrait d'obtenir une estimation moins approximative.

Le présent projet de recherche propose d'exploiter les caractéristiques d'un modèle régional du climat. Un tel modèle simule les processus dynamiques de l'atmosphère à une échelle spatiale tri-dimensionnelle, tel le modèle régional canadien du climat (MRCC) (Caya *et al.*, 1995). L'utilisation du MRCC comporte plusieurs avantages intéressants. Parmi ceux-ci, il en est trois qui méritent d'être soulevés ici. Tout d'abord, il s'agit du fait que ce type de modèle divise la colonne de l'atmosphère en 18 niveaux. Pour chacun d'eux, la concentration instantanée en humidité et le potentiel maximum, c'est-à-dire l'humidité relative, sont déterminés par modélisation des processus dynamiques. Ensuite, en plus de modéliser un climat récent, le modèle climatique simule un climat futur. Cet avantage est non négligeable pour saisir la non-stationnarité du climat. Finalement, sachant que certaines régions du Québec sont faiblement représentées par le réseau actuel de stations météorologiques, la disponibilité de ces données permet d'étudier le comportement hydrologique d'un plus grand nombre de bassins.

En utilisant les données de sortie d'un modèle régional de climat, cette recherche vise obtenir une estimation plus juste de la quantité totale d'humidité dans la colonne atmosphérique. Le résultat du calcul de la PMP sera à l'échelle de résolution du modèle et non pas à une échelle d'une station. De surcroît, cette méthode s'appliquera tant avec les données du climat récent qu'avec celles du climat futur.

Pour terminer, à notre connaissance, cette démarche est l'une des premières, voire la toute première, à exploiter les données de sortie du MRCC à des fins d'estimation d'une PMP.

1.3 Objectifs des travaux

À terme, ce projet de maîtrise prévoit atteindre différents objectifs, dont un objectif principal et trois objectifs secondaires. Le développement d'une méthode de calcul de la PMP applicable tant en climat récent qu'en climat futur, basée sur des processus physiques est le principal objectif.

Dans l'état actuel des connaissances, la seule façon de parvenir à développer la méthode présentée dans le cadre de ces travaux est d'exploiter les données d'un modèle climatique, en particulier le modèle régional canadien du climat (MRCC). Par conséquent, le calcul de la PMP sera fait à partir des données du MRCC. C'est la première tentative en ce sens.

Le résultat de l'évaluation de la PMP fait ensuite l'objet d'une modélisation hydrologique. Préalablement à cette modélisation, il est impératif de transformer la hauteur totale de la PMP en averse. Le hyéogramme définit la répartition temporelle de la précipitation. Quatre approches de hyéogrammes synthétiques sont abordées. Le deuxième objectif secondaire consiste donc à comparer ces différents hyéogrammes.

Finalement, le troisième objectif secondaire consiste à évaluer une CMP valide sur toute la période de vie utile des ouvrages. Cette CMP deviendra le débit de conception des ouvrages futurs ou qui font l'objet de mise à niveau. Il vise à respecter le règlement sur la sécurité des barrages et assurer un niveau de protection adéquat sur toute la période d'exploitation prévue ou potentielle.

1.4 Hypothèses de recherche

Pour circonscrire un tel projet de recherche, un certain nombre d'hypothèses sont énoncées. Trois hypothèses sont fondamentales, alors que huit autres sont d'ordre méthodologique. Ces hypothèses encadrent et guident le travail de recherche pour l'aboutissement du projet.

La première hypothèse fondamentale concerne la qualité des données du MRCC. Elles proviennent de deux simulations différentes et sont considérées comme étant représentatives du climat récent et du climat projeté. Ce dernier repose sur un scénario d'émission de gaz à effet de serre (GES), tel que défini par le GIEC. Les données en climat projeté sont générées par une simulation pilotée par le scénario SRES-A2 du GIEC. Par le fait même, ce scénario d'émission de GES est également considéré plausible. Pour établir la deuxième hypothèse

fondamentale, il faut savoir que les données relatives à une tuile de la grille du MRCC sont traitées comme des données recueillies à une station météorologique. Par conséquent, les données sur une tuile sont aussi représentatives que celles d'une station. Ceci étant dit, les résultats sont tout de même interprétés en considérant les données de la tuile comme une valeur moyenne et non pas une valeur ponctuelle en un point. La troisième et dernière hypothèse fondamentale stipule que la région identifiée respecte une homogénéité météorologique par rapport au territoire du bassin versant à l'étude. Cette hypothèse nous permet de poser que les averses sont transposables en tout autre endroit à l'intérieur de cette même région.

Les hypothèses d'ordre méthodologique sont :

1. Les tuiles choisies pour circonscrire la région du bassin versant sont représentatives du bassin.
2. La PMP est proportionnelle au ratio de maximisation de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) (proportionnelle avec le potentiel d'humidité ambiante).
3. L'eau précipitable d'une tuile est représentative de l'eau précipitable d'une tempête.
4. L'efficacité d'averse ne varie pas en fonction de l'humidité disponible (voir sous-section 2.1.1).
5. L'orientation de la tempête est optimale par rapport au bassin versant. Elle s'apparente à la forme générale du bassin.
6. L'aire de l'averse est égale à l'aire du bassin versant.
7. Le coefficient d'abattement sur une portion d'averse de six heures est représentatif de celui de l'averse totale.
8. Les paramètres de calibration hydrologique sont stationnaires, donc transposables sous un climat futur.

L'impact global de ces hypothèses est difficile à prévoir. Par exemple, en supposant les paramètres de calibrage stationnaires, aucune analyse ne fournit d'indice si une variation de ces paramètres est envisagée sous un climat projeté. Le modèle climatique MRCC représente

généralement bien le climat récent, dans ses moyennes. Par contre, la représentativité des événements extrêmes qui conduiraient à la PMP n'a pas encore été étudiée.

L'application de la méthode proposée à un bassin versant de petite taille, par exemple est à éviter puisque les données moyennes à l'échelle d'un point de grille ne sont pas représentatives des événements locaux de petite étendue, tel un orage.

CHAPITRE 2

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Le dimensionnement d’ouvrages importants, tels barrages, évacuateurs de crue et même certains ponts, se base sur une crue de conception. Au Québec, pour la sécurité des biens et des personnes situés en aval de ces ouvrages, et lorsque le niveau de conséquence est classé ‘considérable’, la crue de conception correspond à la crue maximale probable (CMP) (Gouvernement du Québec, 2009b). Ce concept est apparu dans les années 1930 dans les travaux de Horton (Horton, 1936), alors qu’il a statué que la valeur limite des crues tend vers une valeur finie. Il a été défini par l’Organisation des Nations Unies (ONU) (1964) comme étant le plus fort débit qui soit raisonnable d’être rencontré à un site donné.

Le climat du Québec régit le cycle annuel des saisons, de même que son cycle hydrologique. La CMP doit être évaluée en tenant compte de cette réalité. En effet, en été ou automne, elle est générée par une précipitation maximale probable qui est un événement extrême, de très faible occurrence. Au printemps, par contre, une précipitation seule n’a pas les mêmes caractéristiques et la CMP est le résultat de la combinaison d’un événement maximal probable, par exemple une PMP (précipitation maximale probable) avec un événement extrême (par exemple, la fonte rapide d’un très grand stock de neige). Il n’est pas question de combiner l’ensemble des pires conditions météorologiques et hydrologiques (Debs, 1995), comme le sous-entendait le concept de ‘crue maximale possible’. Au contraire, de tels scénarios extrémistes sont jugés fort improbables (Debs, 1995) et sont donc exclus. Debs (1995) fait maintenant office de référence en la matière. Dans son mémoire de maîtrise consacrée à la CMP, il a étudié la sensibilité de différentes périodes de retour de l’événement extrême associé à l’événement maximal probable. D’une part, il a établi que la combinaison de la précipitation maximale probable (PMP) avec la fonte rapide d’un manteau nival d’épaisseur extrême génère des débits plus importants que l’inverse (combinaison de l’accumulation maximale probable de neige avec une précipitation extrême) pour la majorité des bassins versants du Québec. D’autre part, il a statué clairement qu’une période de retour

de 100 ans sur l'accumulation de neige fournit un niveau de confiance raisonnable dans les résultats de débit.

2.1 Approches de calcul de la PMP

La nécessité d'établir une CMP amène à étudier les principes de la PMP. Tout comme celle de la CMP, la définition de la PMP a évolué. L'American Meteorological Society (AMS, 1959) décrit la PMP comme étant la plus haute précipitation d'une certaine durée, théoriquement possible au-dessus d'un bassin particulier et à une certaine période de l'année. Hansen *et al.* (1982) ajoutent la spécificité du site d'averse dans la définition : la plus haute précipitation d'une certaine durée, théoriquement possible par une averse de taille donnée, au-dessus d'un lieu géographique particulier et à une certaine période de l'année. Cette définition tient compte du fait que la hauteur d'eau générée par la surface totale d'une averse diffère de la hauteur d'eau reçue sur un bassin de même taille, mais dont la forme ne coïncide pas avec celle de l'averse (Hansen *et al.*, 1982).

Cette dernière définition a été adoptée par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) (WMO, 1986). Cette définition a également été reprise par le National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) (NOAA, 1978) et Hydro-Québec (SNC-Lavalin, 2003). L'OMM précise toutefois que la PMP doit avoir une probabilité de dépassement ‘virtuellement nulle’, c'est-à-dire à la limite de ce qui est physiquement possible. Les auteurs doivent faire preuve de jugement dans la conclusion de leurs études.

La PMP à elle seule, par sa définition, est strictement la hauteur de précipitation. Il faut la distribuer spatialement et temporellement. Cette distribution est réalisée à l'aide du concept de la PMS, soit la ‘probable maximum storm’ qui est définie par le US Army Corps of Engineers, dans le guide d'usager du modèle hydrologique HMR52, comme étant : « hypothetical storm which produces the Probable Maximum Flood from a particular drainage basin » (CEIWR-HEC 1984, p.3). La distribution spatiale comprend la forme des

isohyètes, leur orientation, la superficie, ainsi que la variabilité spatiale. Quant à la distribution temporelle, un hyéogramme la définit.

Il existe plusieurs approches pour estimer une PMP. Il y a d'abord les approches empiriques qui fournissent une évaluation grossière, facile à obtenir, et utile en avant-projet. Puis, il y a les approches statistiques qui requièrent plus de données, dont la méthode développée par Hershfield (1965) qui est la plus connue. Elle permet d'estimer une PMP d'une durée de 24 heures et moins. De façon générale, le résultat des approches statistiques dépend grandement de la qualité et de la période d'enregistrement des données. Plus récemment, El Adlouni *et al.* (2008) ont étudié la distribution d'événements hydrologiques. Tout comme ces derniers, les événements extrêmes de précipitation sont représentés dans l'extrémité droite de la distribution et ils adoptent un comportement qui leur est propre. Par conséquent, ceux-ci doivent être étudiés de façon appropriée, en utilisant la loi statistique qui les représente le mieux (El Adlouni, Bobée et Ouarda, 2008). Ces approches sont reconnues pour être approximatives.

Enfin, il existe quelques méthodes physiques qui fournissent des évaluations différentes. Toutefois, ces méthodes nécessitent une expertise météorologique appropriée. Dans cette catégorie, la méthode de maximisation de l'humidité développée par l'OMM est la plus répandue et la méthode par modélisation d'averse gagne en popularité (Abbs, 1999; Bingeman, 2001).

Ceci étant dit, Debs (1995) a décrit de façon exhaustive l'ensemble des méthodes conduisant à une estimation de la PMP. Il est conseillé de s'y référer, son document étant une base solide. La suite de cette section de la revue bibliographique s'attarde à décrire les principes exploités dans le cadre de ce travail. La sous-section 2.1.1 présente la méthode courante de maximisation de l'humidité et la sous-section 2.1.2 s'attarde sur le calcul de l'eau précipitable. La sous-section 2.1.3 expose un sommaire de la méthode courante d'estimation de la CMP.

2.1.1 Méthode de maximisation de l'humidité

Au Québec, les experts (Atria Engineering Hydraulics inc., Chow et Jones, 1994; SNC-Lavalin, 2003) évaluent la PMP selon une méthode basée sur celle que l'OMM a élaborée autour du concept de la maximisation de l'humidité (WMO, 1986). La maximisation de l'humidité est faite sous l'hypothèse que la quantité d'eau d'une averse est proportionnelle à l'humidité ambiante. Cette procédure exige l'estimation de la quantité d'eau contenue dans une colonne de l'atmosphère et qui serait disponible à l'averse. Cette quantité est connue comme l'eau précipitable et les façons de l'évaluer sont abordées dans la sous-section 2.1.2 ci-dessous.

L'équation suivante

$$PMP = pcp_{averse} * \frac{pw_{max}}{pw_{averse}} \quad (2.1)$$

traduit l'expression qui conduit à la PMP, où pcp_{averse} est la hauteur totale de pluie tombée durant une averse (mm), pw_{averse} est la quantité d'eau précipitable contenue dans l'atmosphère durant la même averse (mm), alors que pw_{max} est le maximum d'eau précipitable qui pourrait être contenue dans l'atmosphère pour la même période de l'année qu'au moment d'occurrence de l'averse (mm). On recherche donc la quantité d'eau qui pourrait précipiter si toute la colonne de l'atmosphère était saturée en humidité.

Lors d'une averse, l'eau précipitée provient de masses d'air qui se déplacent selon divers processus : convection, convergence et sous l'effet du relief. Seule la portion de convergence d'une averse peut être maximisée. La méthode de l'OMM décrit comment détacher la portion d'averse imputable à l'effet du relief. Le Québec est principalement situé sur la formation géologique du bouclier canadien et le relief est peu accidenté. SNC-Lavalin a étudié l'influence des quelques zones montagneuses et conclut que « l'effet orographique (...) est difficilement décelable » (SNC-Lavalin, 2003, p. 4-4), donc de faible importance. Par conséquent, la hauteur de précipitation à maximiser équivaut à la hauteur de précipitation de l'averse.

Le terme $\frac{pw_{max}}{pw_{averse}}$ de l'équation correspond au rapport de maximisation *in situ*, r_{max} (WMO, 1986). Il vise à amplifier la réaction de l'atmosphère (pcp_{averse}) sous des conditions météorologiques ambiantes modifiées par son contenu en humidité. Comme le système en place ne peut être forcé au-delà de ses capacités, une limite supérieure est recommandée. Hansen suggère une limite de 2,0 (National Weather Service, 1988) pour respecter l'équilibre dynamique du processus de formation d'averse. Au Québec, SNC-Lavalin (2003) a choisi également d'établir cette limite à 2,0. Dans les faits, la plage de valeurs acceptées s'étend de 1,5 à 2,0 (Minty, Meighen et Kennedy, 1996).

La notion d'efficacité d'averse (η) est parfois abordée (Bingeman, 2001; Collier et Hardaker, 1996; Jakob *et al.*, 2009), où η est le terme $\frac{pcp_{averse}}{pw_{averse}}$ de l'équation 2.1, sans unité. La maximisation conserve la même efficacité d'averse pour la PMP. En d'autres mots, durant une averse, pour chaque mm d'eau précipitable, il y a une certaine quantité d'eau qui précipite au sol. La PMP est supposée être aussi efficace que l'averse d'origine.

2.1.2 Eau précipitable

D'entrée de jeu, l'eau précipitable n'est pas mesurable puisque la quantité totale de vapeur d'eau sur une colonne atmosphérique ne peut être condensée à la surface terrestre. Les quantités estimées ne peuvent être validées d'aucune façon. En plus d'être requise dans la méthode de maximisation de l'OMM (WMO, 1986), elle sert à prévoir les événements de forte précipitation (Kidder et Jones, 2007). C'est un concept pour quantifier la hauteur de rosée au sol si le point de rosée était atteint sur toute la colonne de l'atmosphère. L'eau précipitable n'inclut pas l'eau sous ses formes liquide et solide en suspension dans l'air. Seule la vapeur d'eau est considérée.

Les quantités d'eau précipitable sont estimées par le biais des données d'humidité dans l'atmosphère. La méthode d'estimation de la quantité d'eau précipitable pw revêt une

importance capitale. Tout d'abord, une première méthode approximative consiste à évaluer p_w en fonction du point de rosée de surface. Ensuite, des méthodes à base physique procèdent à une intégration sur une colonne d'atmosphère. Elles se distinguent entre elles par la variable indépendante utilisée, qui peut être soit la hauteur géopotentielle, soit la pression. Selon le type de données utilisé, il est primordial d'utiliser l'équation appropriée. Enfin, l'eau précipitable peut être dérivée de prises de mesure autres que celle de l'humidité. Un survol de ces approches est présenté ci-après.

Estimation par le point de rosée

L'OMM préconise une estimation en fonction de la température du point de rosée à la surface. Ainsi, sans présenter le calcul explicite, des tables sont jointes en annexe du manuel d'estimation (WMO, 1986), qui compilent, entre autres, la quantité d'eau précipitable retrouvée entre la surface et un niveau de pression (élévation) quelconque. Le niveau de surface est standardisé à 1000 hPa. L'ouvrage est dédié aux régions de latitude moyenne, définie comme étant toute la zone entre le tropique du Cancer et le cercle polaire. L'utilisation, pour d'autres régions de la planète, des tables de l'OMM pourrait être inadéquate.

Le choix du point de rosée, en guise d'indice d'apport d'humidité disponible, repose sur l'hypothèse d'un processus adiabatique. La détermination du point de rosée persistant sur une période de 12 ou 24 heures, c'est-à-dire la plus faible valeur de température enregistrée pendant cet intervalle de temps, permet d'accéder aux tables facilement.

Une étude récente conclut que la PMP pourrait être surestimée par ce calcul d'eau précipitable d'environ 7% (Chen et Bradley, 2006). De plus, cette même étude soulève la question quant à savoir si des averses, telle que la PMP, puissent avoir lieu sous des conditions atmosphériques extrêmes.

Estimation à base physique

Il est possible d'estimer l'eau précipitable à partir de données qui proviennent de différentes sources telles que des radiosondes (Chen et Bradley, 2006) et la modélisation atmosphérique (Kwon et Lim, 2006).

Les levés par radiosonde fournissent minimalement des données de pression, de température et d'humidité sur la colonne atmosphérique, et ce, jusqu'à ce que le ballon éclate en haute altitude. La quantité de données recueillies est fonction de la vitesse d'ascension et de la fréquence d'échantillonnage. Par exemple, une sonde qui s'élève à une vitesse moyenne de 5 m/s et qui enregistre une mesure à une fréquence de 10 secondes fournit une série de données à tous les 50 m, environ. Cette série est ponctuelle, au point de lancement de la sonde. Une sonde est lancée 1 ou 2 fois par jour. Les mesures enregistrées sont représentatives des conditions à ce point qui ne correspond pas au lieu d'averse, à moins que l'averse soit centrée à proximité du point de lancement. Lorsqu'une humidité relative est également disponible, la teneur maximale en humidité peut être déduite.

La sommation, par intégration sur tous les niveaux de pression, de la quantité d'eau précipitable se fait selon l'équation générale (Solot, 1939):

$$pw = -1/g \int_{p=surface}^{p=haute\ atm.} q(p) dp \quad (2.2)$$

où $q(p)$ est l'humidité spécifique d'un niveau de pression p (kg d'eau/kg d'air humide) et g est la constante d'accélération gravitationnelle (m/s^2). L'eau précipitable, pw , est exprimée en kg/m^2 , ce qui est équivalent à une hauteur d'eau en mm. Toutefois, une estimation peut être faite à partir de la pression de surface, si les épaisseurs relatives de niveau de pression sont également connues (Kwon et Lim, 2006). Dans ce cas, il s'agit de l'équation suivante :

$$pw = Ps/g \int_{p=surface}^{p=haute\ atm.} q(p) * \Delta\sigma(p) \quad (2.3)$$

où le Ps est le terme de pression de surface, en hPa, et $\Delta\sigma$ est le terme pour la contribution relative de chaque niveau de pression, par rapport à la totalité de la colonne, sans unité.

Cette même approche est facilement transposable aux données d'humidité générées par des modèles atmosphériques. Des résultats provenant de modèles prévisionnels ont été analysés dans quelques travaux. À titre d'exemple, l'équation 2.3 a été utilisée pour évaluer l'eau précipitable à partir des données du modèle MM5V3² (Kwon et Lim, 2006). D'autres modèles estiment directement les quantités d'eau précipitable, comme le modèle CSURAMS³ (Abbs, 1999). Ces valeurs permettent d'évaluer l'efficacité d'averse, c'est-à-dire le rapport entre la hauteur de précipitation et l'eau précipitable. Basée sur cette évaluation, l'hypothèse de linéarité entre la précipitation et l'eau précipitable, qui est un des fondements de la méthode de maximisation de l'OMM, a été mise en doute (Abbs, 1999).

Les modèles climatiques génèrent suffisamment de variables pour faire le même traitement de calcul et estimer l'eau précipitable. Toutefois, à ce jour, aucune étude ne s'est alimentée de données de sortie de ce type de modèle.

Autres estimations

Il est possible d'obtenir indirectement des quantités d'eau précipitable. C'est le cas de méthodes dérivées de l'imagerie satellitaire ou du délai dans le captage des signaux reçus par les appareils GPS.

Dans le cas de l'imagerie satellitaire, la méthode s'appuie sur les propriétés du signal capté par le satellite. L'analyse de ce signal détermine quelle substance a apposé sa signature à l'onde émise. Pour ce qui est de l'humidité, cette analyse permet également d'évaluer la

² MM5V3 : 5^e version d'un modèle météorologique prévisionnel à méso-échelle développé par l'Université de l'état de Pennsylvanie, en collaboration avec le National Centre for Atmospheric Research

³ CSURAMS: Colorado State University Regional Atmospheric Modeling System

quantité présente dans l'atmosphère. La comparaison ou jumelage des images reçues par différents satellites permet d'améliorer la précision de l'estimation (Kidder et Jones, 2007).

La méthode d'estimation de l'eau précipitable dérivée du signal GPS requiert les données de température au moment et lieu de la réception du signal. En effet, le délai de réception du signal est fonction de la température, ainsi que de la teneur en humidité de l'atmosphère (Kwon et Lim, 2006). Les résultats obtenus par cette méthode ont été comparés à d'autres obtenus par radiosonde et aux valeurs estimées par un modèle prévisionnel MM5V3. Suite à ces travaux, il a été suggéré d'alimenter le modèle avec les résultats obtenus par analyse du signal GPS pour le bonifier (Kwon et Lim, 2006).

2.1.3 Modélisation de la CMP

La modélisation hydrologique est une méthode déterministe d'estimation de la CMP. Son résultat convient à la définition de la CMP, telle que l'a décrite l'OMM.

On connaît la PMP ponctuelle, à l'échelle d'une station, il s'agit de la répartir sur le bassin et dans le temps selon un patron synthétique d'averse pour former une averse à l'échelle du bassin versant, c'est-à-dire définir la PMS (probable maximum storm). À la base, la méthode d'estimation de la PMP développée par l'OMM se rapporte à des données observées ponctuelles, soit aux stations. Avant d'évaluer la réponse hydrologique du bassin versant, il importe d'étendre cette précipitation à l'ensemble du bassin. Or, il n'est pas réaliste de prétendre qu'un hyéogramme ponctuel affecte uniformément la totalité d'un bassin.

L'étude météorologique d'un grand nombre de tempêtes a permis à CEIWR-HEC (1984) et OMM (WMO, 1986) de définir un patron standard d'isohyètes, c'est-à-dire la représentation graphique de la hauteur totale de l'averse, dont chaque courbe a une forme elliptique. Le rapport théorique entre les axes majeur et mineur de ces ellipses est de 2,5. Sur chaque ellipse du patron standard, la proportion de la tempête qui contribue au ruissellement sur le bassin est évaluée. Il est donc important de distinguer la superficie du bassin versant avec la

superficie d'une averse, par rapport à la superficie de chaque courbe d'un isohyète. À chaque incrément de six heures, la hauteur de précipitation est estimée par le cumul des volumes de précipitation, divisé par l'aire du bassin.

Une seconde méthode, beaucoup plus simple, consiste à effectuer la répartition spatiale par abattement, tel que présenté dans le manuel modèle hydrologique HMR52 (CEIWR-HEC, 1984). Autrement dit, les volumes de précipitation de chacun des isohyètes synthétiques sont répartis sur le bassin.

Il est fréquent de recenser des tempêtes qui comprennent plusieurs ‘pics d’averse’ (plus de 10% du total de la tempête reçu sur une durée de six heures). Selon l’OMM (WMO, 1986), une PMP de 72 heures inclut la PMP des durées inférieures, soit 24 et 48 heures et ne comporte qu’un seul pic d’averse. Le hyéogramme de la PMP de 72 heures est construit selon deux lignes directrices. D’une part, il est construit de sorte que les incrément de six heures décroissent progressivement de part et d’autre de l’incrément le plus fort (pic d’averse). D’autre part, puisque le moment fort d’averse est rarement en début de tempête, les quatre plus forts incrément sont placés après les 24 premières heures de l’averse. Dans la littérature, le pic d’averse est placé à la 9^e (CEIWR-HEC, 1984) ou la 6^e (SNC-Lavalin, 2003) période de six heures.

Dans le cadre d’une étude sur les changements climatiques en matière de drainage urbain, le hyéogramme sur des précipitations maximales estivales de durées inférieures à 24 heures a également été étudié par Mailhot, *et al.* (2007b). Ils proposent une méthode par interpolation des cumuls. Les averses observées font tout d’abord l’objet d’une classification. Une telle classification est basée sur le quartile d’intensité maximale de précipitation, telle que proposée par Huff (1967). Pour chaque classe d’averse, la fraction du cumul total d’averse est évaluée. Cette méthode sera utilisée dans la méthodologie proposée sur le calcul de la CMP.

2.2 Science du changement climatique

Déjà en 1986, l'OMM est consciente que les valeurs de PMP sont appelées à changer, non seulement en raison de l'avancement des connaissances, mais également à cause des variations à long terme de l'intensité des radiations solaires (WMO, 1986). À cette époque, ces tendances ont été jugées négligeables, et le climat stationnaire. Toutefois, les recherches sur le climat ont permis de constater que les différences observées sont supérieures aux variations naturelles attendues (GIEC, 2007). Il est maintenant admis qu'une contribution anthropique des quantités de gaz à effet de serre (GES) présents dans l'atmosphère influence significativement le climat actuel. La tendance amorcée se poursuit et progresse en fonction des différentes actions entreprises pour contrer le phénomène. L'évolution future d'émission de GES est élaborée sous différents scénarios en fonction des projections démographiques, des habitudes de consommation et des efforts de réduction d'émission de GES (GIEC, 2000). Ces projections tentent de dresser un portrait des scénarios possibles d'émission et sont élaborés dans le but d'analyser les changements climatiques possibles.

2.2.1 Modélisation du climat

Les premiers modèles climatiques à voir le jour sont les modèles de circulation générale qui simulent le climat à une échelle synoptique ou globale. Ces modèles permettent d'étudier les variabilités et les tendances du climat récent, et aussi de projeter le climat futur en fonction de différents scénarios de forçage de gaz à effet de serre. Ceux-ci sont utilisés pour étudier les changements du climat. La projection du climat à des horizons futurs est réalisée par forçage d'un scénario d'émission de GES. Les incertitudes qui entourent les divers scénarios d'émission peuvent être évaluées par l'emploi de modèles climatiques forcés par un certain de nombre de scénarios qui représentent la palette de projections climatiques. De même, l'emploi de plusieurs modèles climatiques permettent de tenir compte de l'imperfection de ces modèles.

Les premières versions de ces modèles ne comprenaient qu'une composante atmosphérique. Les équations de continuité du momentum, de la masse, de l'énergie et de l'eau, permettent de quantifier notamment les mouvements horizontaux et verticaux des masses d'air, l'humidité de l'air, la pression de surface et la température. L'application des principes de conservation d'énergie et de masse permet d'équilibrer le système planétaire. Puis, une composante océanique a été ajoutée, entre autres, pour améliorer le bilan radiatif important à la surface des océans (Environnement Canada, 2010). L'échelle horizontale de ces modèles globaux est grossière. À titre d'exemple, la troisième version du modèle couplé du climat global (MCCG3), développé au Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique (CCmaC), travaille sur une grille de 3,75 degrés (en latitude et longitude), soit 96x48 mailles. Par exemple, une maille de l'équateur couvre une superficie de plus de 300000km².

Au Québec, la majorité des bassins versants ont une superficie inférieure à 50000km². La résolution spatiale de ces modèles globaux est faible. La maturité atteinte par ces modèles a permis le développement des modèles régionaux de climat, à échelle moyenne. Parmi quelques méthodes de mise à l'échelle, la méthode dynamique est abordée. La grille spatiale du modèle climatique global est réduite jusqu'à l'obtention d'un maillage d'environ 50km pour les modèles régionaux. Le modèle régional canadien du climat (MRCC), développé au département des sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'Université du Québec à Montréal, simule le climat sur différents domaines avec une échelle régionale.

Le MRCC est piloté par un modèle de circulation générale ou par des données atmosphériques (réanalyse), plus précisément par les conditions aux frontières du domaine de simulation. Les champs atmosphériques du modèle global définissent les frontières latérales du MRCC (Environnement Canada, 2008). À l'intérieur de ces frontières, les perturbations sont dirigées par pilotage spectral (Riette et Caya, 2002) pour que la circulation synoptique reste cohérente avec celle du pilote. Pour une description détaillée des versions 4.2 du MRCC, se référer à Music et Caya (2007) et Caya et Laprise (1999).

2.2.2 Utilisation des sorties de modèles numériques en hydrologie

La science du climat, émergente, s'attarde à comprendre le phénomène du changement climatique et son impact, ainsi qu'à proposer des mesures d'adaptation ou d'atténuation. La modélisation du climat à l'échelle régionale est maintenant assez mature pour produire des études de comparaison entre les différents modèles (Laprise, 2008).

Cette nouvelle science du climat oeuvre dans divers domaines, dont celui de l'hydrologie. L'approche habituellement employée consiste à alimenter les modèles hydrologiques avec les sorties des modèles climatiques pour quantifier l'impact des changements climatiques. Par exemple, Minville (2008) a examiné le régime hydrologique d'un réseau de centrales hydroélectriques et a proposé un certain nombre de mesures d'adaptation. Mailhot *et al.* (2007b) ont analysé statistiquement les pluies intenses sur des bassins urbains et proposé de nouvelles courbes intensité-durée-fréquence pour ces événements. Ces deux auteurs ont travaillé avec les données de sortie du MRCC, en guise de données climatiques.

Il existe quelques études où la PMP est calculée à partir de modèles numériques météorologiques (Abbs, 1999; Bingeman, 2001). Par le truchement d'une hausse de température dans un modèle prévisionnel, Abbs (1999) a imposé une augmentation de l'humidité disponible à l'averse. Le facteur de maximisation ainsi obtenu se limite à une valeur de 1,3. Bingeman (2001) a démontré qu'en terrain montagneux, la PMP traditionnelle surestime la CMP. D'une part, Bingeman a évalué la CMP générée par une PMS estimée par le modèle MC2 (Mesoscale Compressible Community). D'autre part, elle a produit une série de débits en alimentant un modèle hydrologique avec les données météorologiques historiques. L'estimé du modèle atmosphérique s'approche des valeurs acceptées par probabilité de dépassement annuel pour une CMP.

L'emploi de ces modèles est suggéré par l'OMM qui note que l'utilisation des données aux stations comporte des inconvénients. Pour n'en citer que quelques-uns, mauvais fonctionnement des appareils, défaut d'enregistrement des données, biais associé au type

d'appareil, données ponctuelles. Il en résulte des séries de données souvent courtes et incomplètes, souvent difficiles à traiter. Dans le but d'estimer une PMP, le National Research Council (National Research Council, 1994) recommande d'appliquer la méthode de l'OMM, malgré ses faiblesses. Il signale la possibilité d'explorer d'autres sources d'information que les stations d'observation, telles que les observations radar, les modèles numériques atmosphériques et les études paléohydrologiques.

En Australie, la variabilité des facteurs à l'origine d'une PMP (dont l'humidité disponible et les courbes intensité-durée-superficie) a été étudiée à partir de neuf différents modèles de circulation général pilotés par trois différents scénarios d'émission de GES (Jakob *et al.*, 2009). Cette étude conclut avec une augmentation générale de la moyenne de l'indice R95pT⁴ et une grande variabilité spatiale pour chaque modèle. À l'échelle régionale, aucune étude n'a été recensée sur l'emploi d'un modèle régional climatique pour l'estimation de la PMP.

Ce qui rend le présent travail innovateur, c'est le fait d'utiliser les données de sortie du MRCC aux fins d'estimer la PMP selon la méthode de l'OMM. C'est également une première que d'estimer les valeurs d'eau précipitable à partir de ces données. Ceci implique d'adapter la méthode du calcul de la CMP de l'OMM afin de considérer la représentativité des données à l'échelle d'une tuile.

⁴ Définition de l'indice R95pT, telle que présentée dans le rapport de Jakob *et al.* (2009) : “the proportion of annual rainfall from the upper 5% of rainfall, for days with at least 1mm of rainfall”

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE DU CALCUL DE LA PMP

Le principe énoncé par l’Organisation météorologique mondiale (OMM) constitue la base de la méthode proposée qui se traduit par l’équation générale suivante, présentée au chapitre 2:

$$PMP = pcp_{averse} * \frac{pw_{max}}{pw_{averse}} \quad (3.1)$$

où pcp_{averse} est la hauteur totale de pluie tombée durant une averse (mm), pw_{averse} est la quantité d’eau précipitable contenue dans l’atmosphère, durant la même averse (mm), alors que pw_{max} , est le maximum d’eau précipitable qui peut être contenue dans l’atmosphère pour la même période de l’année qu’au moment d’occurrence de l’averse (mm).

Il existe deux différences fondamentales entre la méthode élaborée par l’OMM et celle qui est présentée dans ce chapitre. La première différence tient au fait que l’OMM s’appuie sur la température enregistrée au sol et tient compte d’un processus adiabatique pour évaluer les termes d’eau précipitable, pw_{averse} et pw_{max} , sur toute la colonne atmosphérique. Au moment d’élaborer sa méthode, l’OMM n’avait d’autre alternative que de travailler avec les mesures prises près de la surface terrestre. En effet, les mesures par radiosondes sont peu fréquentes (Chen et Bradley, 2006) et les techniques modernes d’instrumentation et de collecte de données ont été mises au point ultérieurement. Maintenant, les efforts investis permettent d’avoir accès à diverses sources de données et méthodes de calcul. Ainsi, la méthode proposée cible l’utilisation des données de sortie d’un modèle régional de climat, et plus particulièrement le modèle développé initialement au département des Sciences de la Terre et de l’Atmosphère de l’Université du Québec à Montréal, le modèle régional canadien du climat (MRCC) (Caya *et al.*, 1995).

La seconde différence provient du découpage spatial du MRCC, fait selon un maillage d’environ 45km par 45km. Une tuile de la grille est représentative d’une superficie

d'environ 2000km². Le calcul de la PMP est fait à l'échelle d'une tuile de la grille. Comparativement, les approches courantes font le calcul à une échelle ponctuelle, soit celle d'une station qui est applicable à une superficie de 25km² (WMO, 1986). Techniquelement, les données du MRCC permettraient de calculer directement une PMP à l'échelle d'un bassin versant. Le développement d'une telle procédure obligerait à tenir compte de l'étendue des averses, mais celle-ci n'est pas évaluée dans le cadre du présent travail.

De façon générale, les termes de l'équation de l'OMM sont évalués en utilisant les données de sorties du MRCC. Ce modèle climatique simule les processus atmosphériques selon une approche physique (Caya *et al.*, 1995). La figure 3.1 présente la méthode proposée de façon schématique. Cette figure illustre le cheminement nécessaire pour parvenir à évaluer une PMP. L'application de l'équation 3.1 sollicite essentiellement trois variables du MRCC, c'est-à-dire la variable de précipitation au sol (sous forme liquide ou solide) et les variables d'humidité spécifique et relative à toutes les couches de l'atmosphère. Ces variables se retrouvent comme intrant de la méthode, et en en-tête de la figure 3.1. Le prochain paragraphe explique les composantes de cette figure.

Dans un premier temps, à partir de la variable de précipitation, les averses sont identifiées, sélectionnées et classées selon leur durée. Deuxièmement, la variable d'humidité spécifique permet d'évaluer la quantité de vapeur d'eau contenue à l'intérieur chaque niveau de pression (q_{averse}), au moment de l'averse. La sommation des quantités partielles sur toute la colonne atmosphérique représente l'eau précipitable durant l'averse (pw_{averse}). Troisièmement, cette même sommation est appliquée à la quantité maximale d'eau qui pourrait être contenue dans l'air (q_{max}), alors que les conditions de saturation sont rencontrées (à 100% d'humidité relative). Seule la valeur maximale saisonnière, sur toute la période ou horizon, est retenue. Enfin, l'évaluation du rapport de maximisation (r_m) est faite par le rapport entre pw_{max} et pw_{averse} . La valeur maximale du produit de la hauteur de précipitation et du rapport de maximisation donne le résultat final de la PMP.

Les sections suivantes abordent la méthode de façon détaillée. Tout d'abord, la section 3.1 décrit la sélection d'averse. Puis, la section 3.2 présente le calcul d'eau précipitable durant l'averse. Enfin, dans la section 3.3, il est question de la maximisation de cette eau précipitable, sur une base saisonnière, alors que la dernière (section 3.4) s'adresse directement au rapport de maximisation.

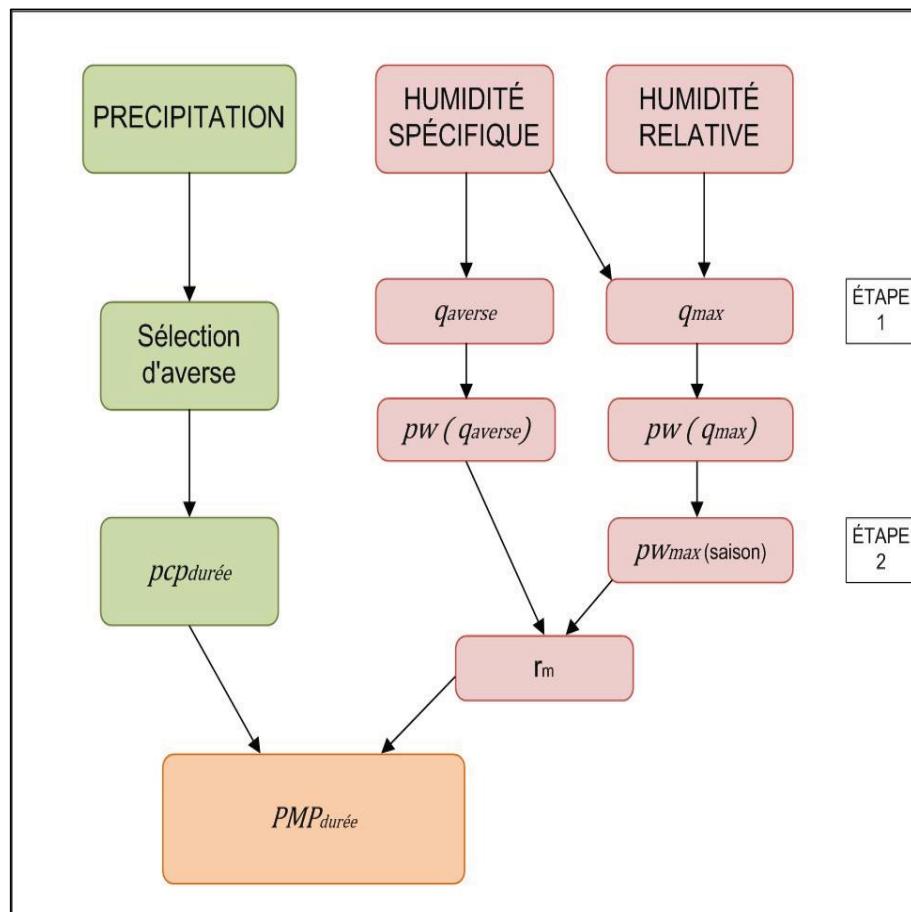


Figure 3.1 Organigramme de la méthode de calcul de la PMP.

Avant d'entrer dans le vif de la méthodologie, il est pertinent de bien définir sommairement la terminologie qui sera dorénavant employée :

- averse : somme des précipitations consécutives sur une tuile en particulier; seules les averses qui comprennent au moins un événement et qui ont une durée comprise entre 24 et 72 heures sont dénombrées (se référer à la section 3.1 pour plus de détails);
- événement : précipitation d'au moins 10 mm, à l'échelle d'une tuile, sur une durée de six heures;
- tempête : ensemble des averses qui se produisent sur des tuiles voisines et qui partagent une période commune entre elles.

3.1 Sélection d'averses

Similairement à des données recueillies par observation à différentes stations météorologiques, le MRCC fournit une série temporelle des quantités de précipitation sur le domaine, pour chacune des tuiles de sa grille. La sélection d'averses basée sur ces données s'applique sur toute la période de temps et toutes les tuiles dans une région qui englobe le bassin versant.

Tout d'abord, la base de la sélection réside dans le critère qui définit si un pas de temps est AVEC ou SANS pluie. Cette approche utilise une limite inférieure de 0,1 mm, ce qui correspond au seuil de détection d'une vaste gamme de pluviomètres. En-deçà de cette quantité, le pas de temps est considéré sec, ou sans pluie, et au-delà, il reçoit une précipitation de la hauteur simulée. Il est à noter que le critère s'applique habituellement sur une durée de 24 heures. Ici, il est appliqué sur un pas d'une durée de six heures. Ainsi, dans la série temporelle de la variable ‘pcp’, toutes les valeurs inférieures à 0,1 mm sont considérées comme nulles. Cette démarche élimine un certain ‘bruit’ dans la série de données, puisqu'aucune valeur n'est initialement nulle. Avoir déterminé cette limite inférieure à une valeur plus grande, par exemple 0,5 mm, aurait modifié à la baisse la durée de certaines averses.

Ensuite, dans la série de données, les averses sont séparées par des jours sans pluie. Pour une averse, la suite des quantités de précipitation reçue à chaque pas de six heures correspond au

hyéogramme de l'averse. L'évolution d'une tempête pourrait être suivie dans le temps et l'espace, mais l'étendue du présent projet ne porte pas sur cet aspect.

Afin de demeurer à l'intérieur d'une région météorologique homogène avec celle du bassin versant, les averses identifiées doivent avoir lieu à proximité du bassin. Cette proximité est assurée par un ensemble de tuiles, c'est-à-dire un sous-domaine dont le contour épouse approximativement la forme du bassin, avec un excédent d'environ 100 km. Les averses qui font partie d'une tempête qui n'intersecte pas ce sous-domaine sont exclues.

Pour terminer, seules les averses ayant lieu durant la saison d'intérêt sont retenues. Le résultat recherché est une PMP d'été-automne. La définition de cette période est présentée à au chapitre 4.

3.1.1 Seuil minimal

L'exercice de maximisation ne s'adresse pas à toutes les averses contenues dans la série de données. D'une part, il cible des événements d'une certaine envergure ou importance. En effet, il n'est pas pertinent de considérer une averse moins forte qu'un seuil déterminé. D'autre part, plutôt que de statuer sur une quantité totale minimale, il est ici question d'établir un seuil minimal de précipitation durant un événement. La durée d'un événement est de six heures et cette durée correspond au pas d'archivage du MRCC.

L'établissement d'un seuil minimal sur un événement cible deux objectifs. Tout d'abord, ce seuil sert à inclure des averses qui résultent de perturbations atmosphériques soutenues, sans égard à la durée d'averse. Également, il vise à limiter le nombre d'averses à maximiser, sans que l'échantillon soit trop restreint. Un seuil trop élevé discrimine certaines averses intéressantes et réduit considérablement la taille de l'échantillon. Quelques tentatives ont permis de déterminer qu'un seuil fixé à 10 mm est adéquat. Donc, un premier tri retient les événements qui répondent à ce seuil minimal de précipitation et détermine la durée d'averse, à l'échelle de la tuile. Les averses de douze heures ou moins ne sont pas considérées, ainsi

que celles qui durent plus de 72 heures, puisqu'elles ne répondent pas au critère de durée pour la PMP du bassin versant à l'étude⁵.

3.1.2 Durée d'averse

La totalité des averses est répartie selon leur durée, soit 24, 48 ou 72 heures, au sens strict. Ceci signifie, par exemple, qu'une averse de 48 heures n'est pas incluse dans la série d'averses de 72 heures. Ceci est un choix méthodologique qui est basé sur la durée de l'averse d'où provient chaque événement.

Ainsi, en prenant le cas d'une averse de durée de 24h, celle-ci couvre typiquement quatre périodes de six heures qui totalisent 24 heures. En partant du principe que la variable 'pcp' du MRCC est une intensité moyenne sur la période de six heures, il est permis de poser l'hypothèse que la durée 'réelle' de précipitation à l'intérieur du premier et du dernier pas de temps d'une averse est de trois heures, avec une intensité doublée de sa valeur. De ce fait, la hauteur de précipitation totale reste inchangée.

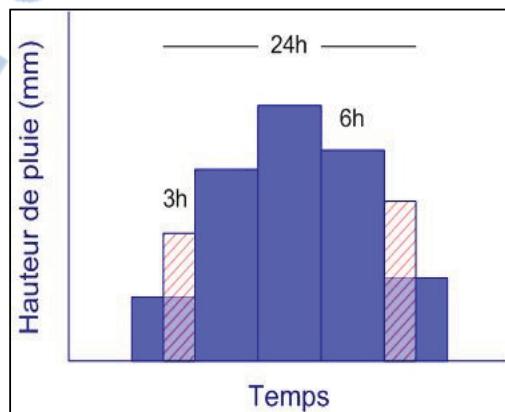


Figure 3.2 Hyéogramme type d'une averse de 24h.

⁵ La durée de l'averse doit s'apparenter au temps de concentration du bassin versant, c'est à dire au temps de parcours le plus long sur le bassin, jusqu'à son exutoire.

En appliquant cette hypothèse à une averse de 24 heures (voir figure 3.2), cette dernière couvrira cinq pas de temps. Ainsi, pour identifier les averses de 24h, celles qui surviennent sur trois à cinq pas de temps sont retenues. Dans le même ordre d'idées, celles qui surviennent sur six à neuf pas de temps et dix à treize pas de temps sont classées comme des averses d'une durée de 48h et 72h, respectivement.

3.2 Eau précipitable durant l'averse

L'eau précipitable correspond à la quantité d'eau, sous sa forme gazeuse et contenue dans l'atmosphère, qui est 'physiquement' disponible pour la condensation ou la précipitation. On peut également dire que l'eau précipitable représente la hauteur de rosée qui serait obtenue si la température du point de rosée était atteinte en tout point de la colonne atmosphérique. Cette définition exclut l'eau des nuages ou en suspension dans l'air, qu'elle soit sous forme liquide ou solide. Elle peut être estimée par les valeurs d'humidité spécifique.

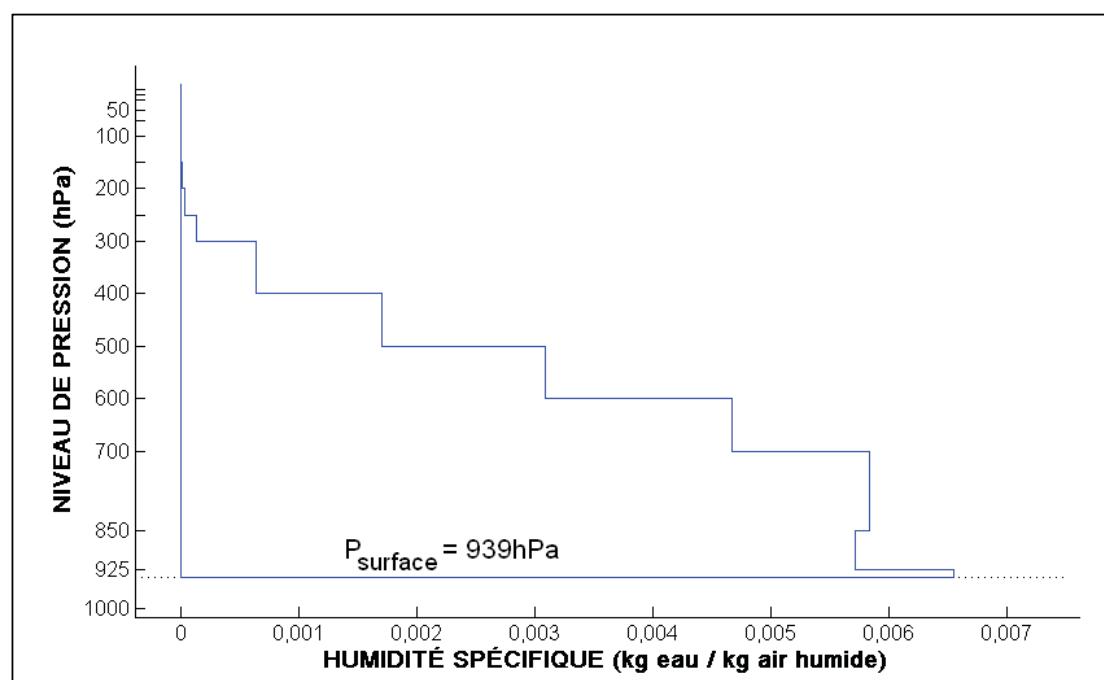


Figure 3.3 Exemple de profil d'humidité du MRCC, selon la simulation 'aft' en date du 1961-07-14-18.

Tout au long de la colonne atmosphérique, la concentration en humidité varie grandement. La figure 3.3 présente un exemple de profil d'humidité extrait des données du MRCC. On peut y remarquer que les plus grandes concentrations d'humidité se trouvent près de la surface. Le calcul d'eau précipitable résulte de la sommation des quantités d'eau contenue dans chacune des couches de pression situées au-dessus de la surface. L'équation générale (Solot, 1939) se présente sous la forme d'une intégrale :

$$pw = \frac{1}{g} \int_{p=surface}^{10hPa} q(p) dp \quad (3.2)$$

où pw est la quantité d'eau précipitable en kg par unité de surface, équivalent à une hauteur d'eau (mm), $q(p)$ est l'humidité spécifique d'un niveau de pression en kilogramme de vapeur d'eau par kilogramme d'air humide, dp est la variation de pression entre la base et le sommet de chaque niveau (Pa) et g est la constante d'accélération gravitationnelle (m/s^2). Le MRCC fournit les valeurs d'humidité spécifique pour chacun des 18 niveaux de pression identifiés, de 10 à 1050 hPa.

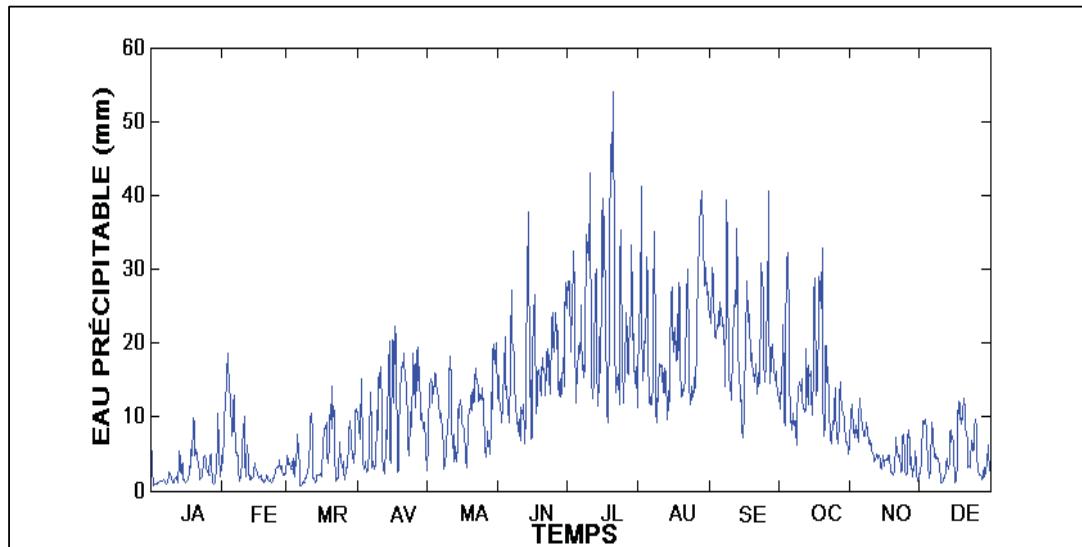


Figure 3.4 Profil annuel type d'eau précipitable de l'année 1968, simulation 'aft' et sur la tuile 144 du MRCC.

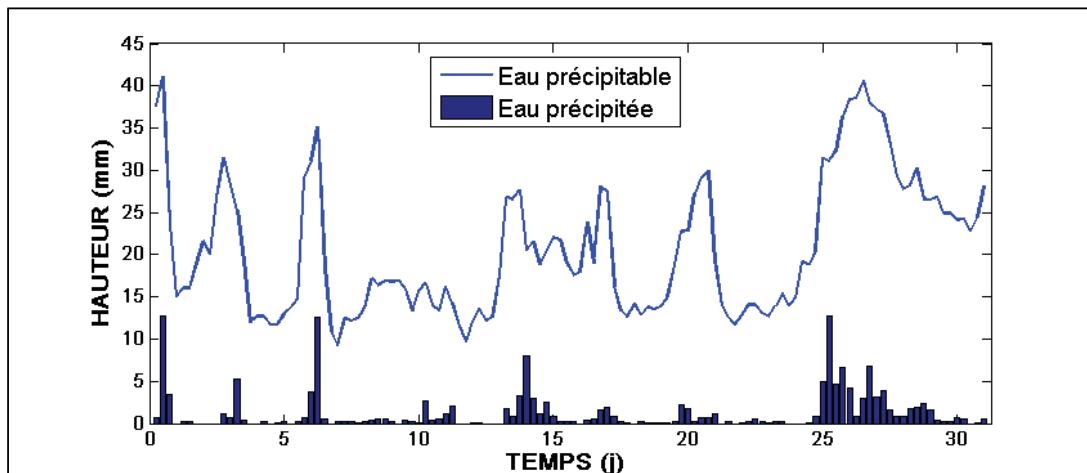


Figure 3.5 Variation type d'eau précipitable, pour le mois d'août 1968, simulation 'aft' et sur la tuile 144 du MRCC.

La figure 3.4 présente l'évolution de la quantité d'eau précipitable pour la période du 1^{er} janvier au 31 décembre 1968 à un point de grille⁶. De façon générale, la courbe suit un profil semblable à celle de la température de surface. En d'autres mots, on peut constater des variations sur une base annuelle, mensuelle et même journalière. En effet, durant les mois d'hiver, l'atmosphère contient moins d'humidité que durant les mois d'été.

À partir de la figure 3.4, l'examen détaillé du mois d'août révèle une certaine corrélation avec les événements de précipitation. La figure 3.5 permet de visualiser les variations sur les quantités d'eau précipitable par rapport aux quantités d'eau retirée de l'atmosphère sous forme de précipitation. En effet, après chaque averse, il se produit une baisse relativement marquée de la quantité d'eau précipitable.

Pour terminer, la détermination de l'eau précipitable représentative d'une averse tient compte d'une pratique courante (Doray, 2009; SNC-Lavalin, 2003). Cette pratique consiste à considérer la plus grande valeur d'eau précipitable « présente dans une colonne d'air avant

⁶ La figure présente les valeurs sur le point de grille no 144 (latitude : 52,08737°N et longitude : 68,79442°W). Pour les coordonnées des points de grille fournies par le MRCC, voir l'annexe II.

ou pendant la tempête » (Doray, 2009). La période antérieure à l'averse est de courte durée, soit deux jours.

3.3 Eau précipitable maximale

Lorsque l'atmosphère est saturée en vapeur d'eau, par définition, son humidité relative est égale à 100%. Le calcul du maximum d'eau précipitable est basé sur cette relation. La méthode utilisée pour évaluer la quantité maximale d'eau précipitable reprend la même démarche que celle décrite ci-haut pour l'eau précipitable durant l'averse (section 3.2 ci-dessus). Cependant, l'ajout de deux étapes distingue cette méthode-ci. La première étape supplémentaire établit la quantité d'eau que peut contenir l'atmosphère à saturation, à l'aide de la définition de l'humidité relative (équation 3.3). En effet, le rapport entre la quantité d'humidité de l'atmosphère, sous les conditions ambiantes, et l'humidité maximale correspond à l'humidité relative. Le MRCC fournit les deux termes d'humidité, soit spécifique et relative, desquels peut être déduite l'humidité maximale recherchée, en vertu de l'équation suivante :

$$RH = q_{averse} / q_{max} \quad (3.3)$$

Donc, l'humidité spécifique maximale q_{max} est obtenue par :

$$q_{max} = q_{averse} / RH \quad (3.4)$$

où q_{averse} est l'humidité spécifique d'un niveau de pression en kilogramme de vapeur d'eau par kilogramme d'air humide et RH est l'humidité relative (sans unité). L'équation 3.2 est reprise, cette fois-ci avec le terme d'humidité maximisée, soit $q_{max}(p)$, sous la forme suivante :

$$pw_{max} = \frac{1}{g} \int_{p=surface}^{10hPa} q_{max}(p) dp \quad (3.5)$$

La sommation sur toute la colonne établit la quantité maximale d'eau précipitable sous les conditions de saturation de l'atmosphère.

La deuxième étape ajoutée se rapporte à la saisonnalité des résultats. En accord avec le principe énoncé par l'OMM (Organization World Meteorological, 1986), une limite saisonnière se décrit comme étant la valeur maximale sur une période coulissante de 15 jours. Par conséquent, la valeur maximale retrouvée à l'intérieur d'une fenêtre de 30 jours, centrée sur l'événement le plus intense de l'averse, constitue la valeur retenue de pw_{max} . Par exemple, sur une période de 40 ans et pour établir l'humidité maximale en date du 16 juillet, seule la valeur maximale retrouvée entre le 1^{er} et le 31 juillet, sur l'ensemble des 40 années de données, est retenue.

3.4 Rapport de maximisation

Le principe de maximisation supporte l'hypothèse de linéarité entre la quantité d'eau précipitée et le potentiel de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère. Donc, pour une certaine période de l'année et dans le cas d'une averse importante, plus le coefficient d'humidité relative est faible, plus le potentiel de maximisation (r_{max}) est grand. De l'équation 2.1, on peut isoler le rapport de maximisation, qui est en réalité le facteur multiplicatif de la hauteur de précipitation pcp . Chaque averse est maximisée individuellement, avec son propre rapport de maximisation :

$$r_{max} = pw_{max}/pw_{averse} \quad (3.6)$$

où pw_{averse} représente l'eau précipitable (mm), telle que définie dans la section 3.2 et pw_{max} représente l'eau précipitable maximale (mm), telle que définie dans la section 3.3 ci-dessus. Le rapport de maximisation est sans unité.

Il est à noter que le National Weather Service suggère de limiter le rapport de maximisation à 2 pour la période été-automne (SNC-Lavalin, 2003). Cette recommandation vise à conserver

la stabilité des processus dynamiques de formation d'averse. Par conséquent, le rapport de maximisation retenu sera le moindre de 2 ou du résultat de l'équation 3.6.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE DU CALCUL DE LA CMP

La PMP finale correspond à la hauteur totale de précipitation pour laquelle l'ampleur de la réponse du bassin versant est la plus grande, toutes durées confondues. Cette réponse varie en fonction de la taille du bassin, sa forme, sa topographie, son type de sol, ainsi que des conditions initiales à l'averse. La répartition temporelle de l'averse, c'est-à-dire le hyéogramme, joue un rôle prépondérant. De plus, le résultat varie également en fonction du type de modèle hydrologique. Toutefois, cet aspect est relié à l'incertitude du modèle utilisé et ne sera pas abordé dans le cadre de ce travail.

Des conditions optimales permettent la meilleure infiltration d'eau dans le sol et un ruissellement initial moindre, jusqu'à saturation du sol. Ce processus de saturation a lieu en début d'averse et il est suivi par une augmentation du ruissellement qui favorise un accroissement du débit d'écoulement pour alimenter le débit à l'exutoire. Par contre, un sol qui a atteint un certain taux de saturation en humidité ou un sol argileux très sec ne permet pas nécessairement à l'eau de s'infiltrer rapidement et, par conséquent, ne retarde pas le ruissellement de l'eau précipitée. Dans ce cas, l'eau se dirige rapidement vers l'exutoire.

Le diagramme du processus du calcul de la CMP est présenté à la figure 4.1. Il débute avec les PMP de chacune des durées (24, 48 et 72h) identifiées à l'échelle de la tuile du MRCC, soit 2000km^2 . Cette hauteur de précipitation est combinée à un patron synthétique d'averse, la PMS (probable maximum storm) (CEIWR-HEC, 1984). Ce patron permet la mise à l'échelle (de la tuile au bassin versant) et définit la répartition temporelle, le hyéogramme. Une façon de faire cette mise à l'échelle est par un coefficient d'abattement de surface pour que la hauteur de précipitation soit représentative à l'échelle du bassin versant ($\text{PMP}_{\text{bassin}}$). Cet aspect est présenté à la section 4.1. Par la suite, plusieurs méthodes de hyéogramme explorent la répartition temporelle de la PMP. La section 4.2 et ses sous-sections détaillent les différentes approches proposées pour l'établissement du hyéogramme. Enfin, la section

4.3 aborde la modélisation hydrologique de la PMP sur le bassin. Le processus complet fournit la réponse du bassin versant à la PMP, c'est-à-dire la CMP.

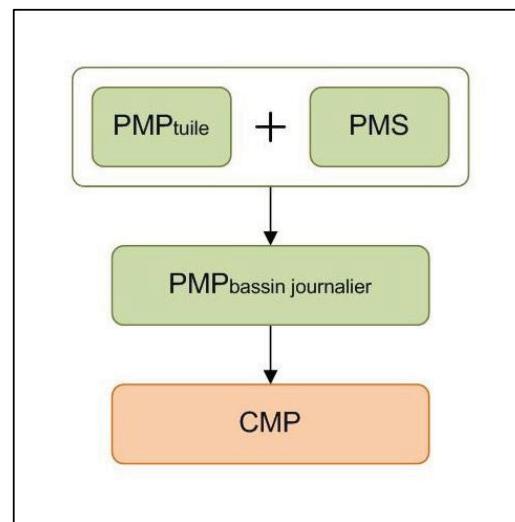


Figure 4.1 Organigramme de la méthode de calcul de la CMP.

4.1 Coefficient d'abattement de superficie

La hauteur de précipitation obtenue dans l'estimation de la PMP est dérivée et applicable sur une superficie équivalente à celle d'une tuile du MRCC, c'est-à-dire environ 2000 km². Cependant, dans le cadre de ce projet, la superficie du bassin versant à l'étude est largement supérieure à 2000 km². Par conséquent, il n'est pas réaliste (ou trop conservateur) d'appliquer directement cette hauteur de PMP à l'ensemble du bassin. Par ailleurs, le modèle visé pour évaluer la réponse hydrologique du bassin est de type ‘global’, c'est-à-dire qu'il ne tient pas compte des variations spatiales des quantités de précipitation reçues sur l'ensemble du bassin versant. En d'autres mots, ceci veut dire que pour une averse qui couvre une superficie de 1000 km² et qui a lieu sur un bassin versant de 5000 km², aucun mécanisme ne permet au modèle hydrologique de considérer que seulement un cinquième du bassin reçoit l'averse.

Bon nombre de tempêtes ont lieu sur une superficie plus grande que celle du bassin versant et la portion de la tempête associée à une tuile a été identifiée au chapitre précédent par le terme ‘averse’. Ce terme est précisé pour distinguer une portion de tempête, d'une superficie équivalente à celle du bassin versant, soit l'averse_{bassin}. Il faut donc répartir la quantité totale de l'averse, à l'échelle de la tuile, sur la superficie totale du bassin. Ainsi, il est clair que cette même quantité d'eau, lorsqu'elle sera répartie sur la superficie du bassin, présentera une hauteur moindre. Elle constitue l'averse_{bassin}. Toutefois, la relation n'est pas linéaire (NOAA, 1982; SNC-Lavalin, 2004; WMO, 1986) : une précipitation ‘ponctuelle’ étalée sur un territoire cinq fois plus grand n'est pas cinq fois plus faible. Les études de courbes intensité-durée-superficie, comme celle de Mailhot *et al.* (2007b) le démontrent. Il y a donc lieu de procéder à un ajustement, sous forme d'abattement, pour corriger la précipitation à l'échelle de la tuile, c'est-à-dire l'averse et l'étendre à l'échelle du bassin, l'averse_{bassin}.

L'approche courante (NOAA, 1982; WMO, 1986) consiste à évaluer, par la méthode des isohyètes, sur chaque portion d'averse, le volume de précipitation à l'échelle du bassin. Dans ce cas, la hauteur de précipitation de cette portion d'averse correspond à ce volume divisé par la superficie du bassin.

Le principe général du coefficient d'abattement, adopté dans le cadre de ce travail, est d'évaluer la hauteur moyenne de précipitation sur la superficie du bassin, sur l'événement de plus forte intensité de l'averse. Un tel rapport est évalué sur chacune des averses de même durée et l'abattement correspond à la moyenne des valeurs obtenues pour l'ensemble de ces averses. Un coefficient d'abattement est calculé pour chaque durée d'averse. Deux hypothèses sous-tendent le principe d'abattement proposé. Tout d'abord, l'averse_{bassin} est présumée avoir une superficie équivalente à celle du bassin versant. Ensuite, le coefficient d'abattement sur l'averse totale peut être approximé par l'abattement instantané d'une portion de six heures de précipitation. Cette portion correspond au moment de l'événement le plus intense de l'averse.

La zone des tuiles qui totalisent une superficie équivalente à celle du bassin versant est centrée sur la tuile d'intensité maximale d'averse. Le système de grille du MRCC impose une forme rectangulaire à cette zone, de $nbi \times nbj$ tuiles. L'orientation de l'averse n'étant pas établie formellement, deux cas sont considérés. La zone peut avoir une largeur de nbi tuiles et une longueur de nbj tuiles, aussi bien qu'une largeur de nbj tuiles et une longueur de nbi tuiles. La figure 4.2 illustre ces deux cas.

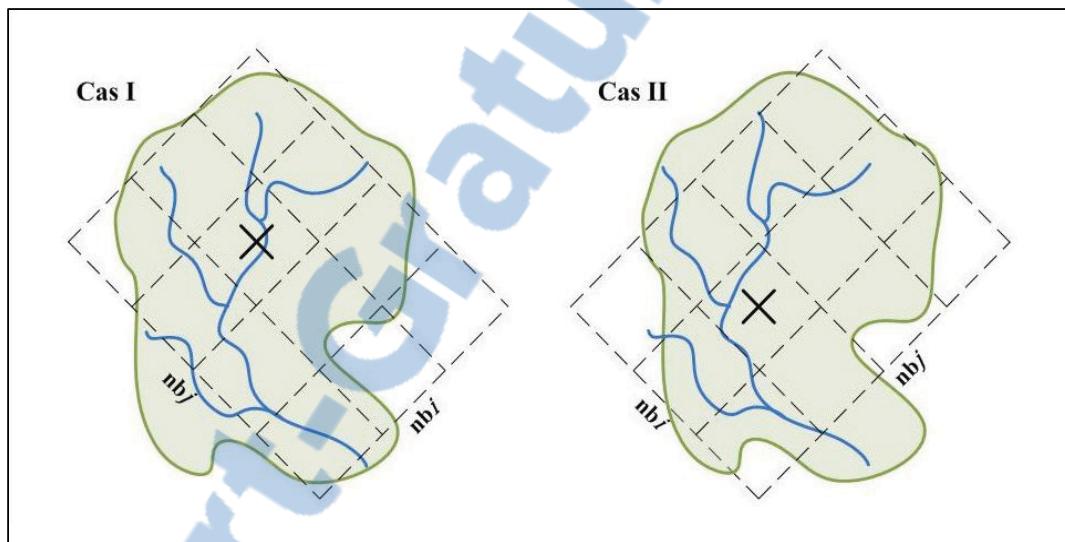


Figure 4.2 Orientation de l'averse_{bassin}, pour la tuile d'intensité maximale marquée d'un 'X'.

En condition de changements climatiques, les précipitations extrêmes sont appelées à être modifiées par leur fréquence et leur intensité (GIEC, 2007). Puisque l'abattement s'adresse à ces extrêmes, il serait hasardeux de lui attribuer un caractère de stationnarité. Il sera, par conséquent, évalué sous chacun des horizons prévus.

4.2 Hyéogramme de la PMP

L'établissement d'un hyéogramme est réalisé sur une base unitaire. En d'autres mots, pour chaque averse de la sélection (voir section 3.1), la quantité de précipitation de chaque incrément est divisée par la précipitation totale de l'averse. On obtient ainsi des fractions

unitaires d'averse. Dans les prochaines sections, quatre approches sont examinées. La première méthode est celle développée par le National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA, 1982) et la seconde est une adaptation de celle-ci, faite par la firme SNC-Lavalin (2003). Les deux dernières méthodes sont présentées à titre exploratoire. Leur étude est réalisée sur les fractions cumulatives d'averse, c'est-à-dire la sommation des fractions de précipitation reçue depuis le début d'averse. Chacune de ces dernières méthodes se complète par la reconstitution du hyéogramme unitaire, par soustraction des valeurs cumulatives.

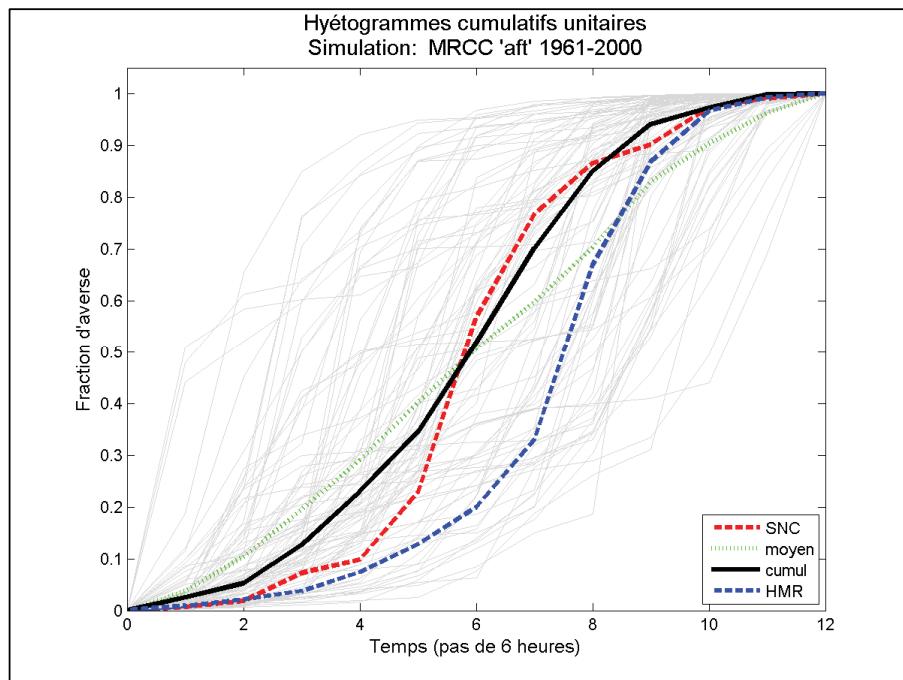


Figure 4.3 Exemple de hyéogramme standard.

La figure 4.3 montre l'évolution typique d'une averse, sous le climat récent, selon les diverses méthodes d'hyéogramme cumulé retenues dans ce travail. L'annexe I comprend l'ensemble des hyéogrammes cumulatifs pour toutes les durées d'averse et tous les horizons.

4.2.1 Méthode HMR

Dans le Hydrometeorological Report No 52, le NOAA (1982) propose un hyéogramme standard pour une averse de 72 heures, tel qu'illustré à la figure 4.4 et qui comprend un seul pic d'averse. Tout d'abord, les fractions d'averse sont classées en ordre croissant sur chaque averse. Ensuite, la valeur moyenne de ces fractions est calculée à chaque incrément. La sommation des fractions moyennes est standardisé à nouveau, puisque le résultat de cette moyenne est rarement égal à 1 (100%). Pour terminer, cette méthode réarrange la séquence d'averse de sorte que la plus forte fraction de pluie ait lieu après les premières 48 heures d'averse. Chaque incrément a une durée égale à la fréquence des données utilisées, soit de six heures. NOAA (1982) et OMM (WMO, 1986) préconisent que l'incrément le plus important soit situé après la première période de 24 heures.

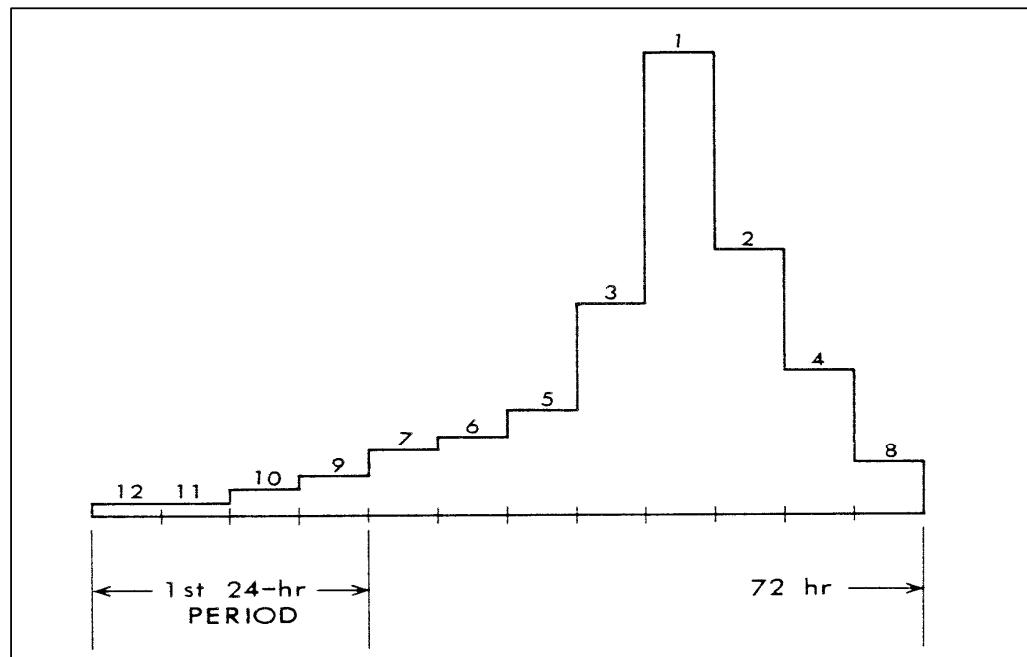


Figure 4.4 Hyéogramme standard proposé par le NOAA.
Tirée de NOAA (1982, p.16)

Ici, les incrément respectent une numérotation de 1 à 12, où l'incrément 1 est la portion d'averse de six heures qui reçoit la plus forte intensité de pluie et l'incrément 12 est celui qui reçoit la plus faible intensité de pluie. Séquentiellement, l'averse débute par l'incrément 12 (voir figure 4.4), suivi des incrément 11, 10, 9, 7, 6, 5, 3, 1, 2, 4 et termine par l'incrément 8. Pour une averse de durée inférieure à 72 heures, le même diagramme permet de construire le hyéogramme type (NOAA, 1982). Par exemple, une averse maximisée de 48 heures contient les huit plus grands incrément de six heures. Le hyéogramme résultant omet les quatre plus faibles incrément, soit les incrément 9 à 12. La séquence devient 7, 6, 5, 3, 1, 2, 4 et 8.

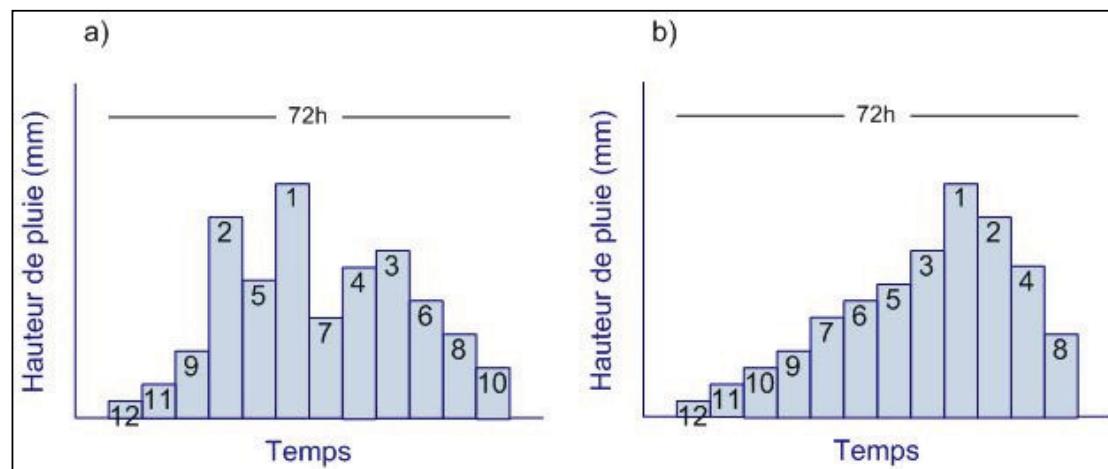


Figure 4.5 Hyéogramme ordonné selon HMR sur la séquence de l'averse originale maximisée en a) et sur la séquence d'averse de la PMP, telle que présenté par la méthode HMR en b).

La figure 4.5 illustre la ‘réorganisation’ des incrément pour obtenir un hyéogramme de PMP standard selon cette méthode et susceptible de générer une réponse hydrologique la plus grande qui soit.

4.2.2 Méthode SNC

SNC-Shawinigan propose une version légèrement différente de ce hyéogramme, tel qu’illustré à la figure 4.6. La différence entre ce hyéogramme-ci et celui présenté

précédemment réside dans l'emplacement de l'incrément ayant la plus forte intensité de pluie. Dans ce cas-ci, cet incrément est devancé à la mi-temps de l'averse. L'hypothèse de ce choix de répartition est que le sol atteindrait le niveau de saturation plus rapidement. Cette différence est la seule et peut être d'une importance non-négligeable.

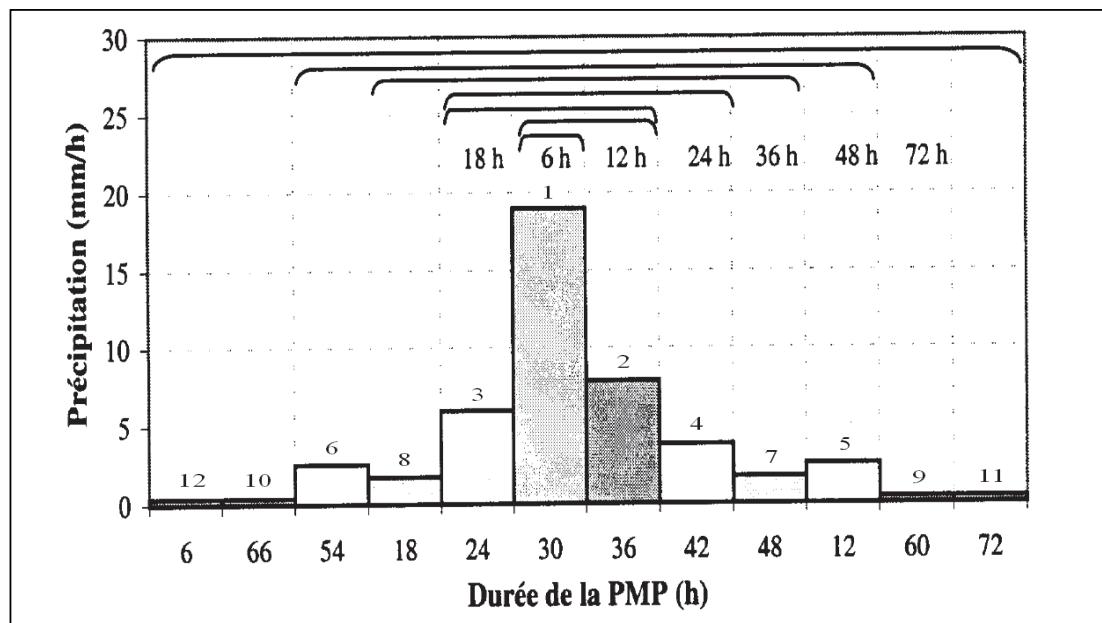


Figure 4.6 Hyéogramme standard proposé par SNC-Lavalin.
Tirée de SNC (2003, p.4-16)

On identifie une séquence selon le même procédé que ce qui a été fait précédemment et on obtient une averse comme suit : 12, 10, 6, 8, 3, 1, 2, 4, 7, 5, 9 et 11. Le hyéogramme d'une averse de 48 heures est également tronqué des intensités les plus faibles.

4.2.3 Méthode par moyenne de la fraction cumulative

La troisième approche est simple et consiste à faire une moyenne des fractions de pluie reçue à chaque portion d'averse de six heures. La moyenne des fractions cumulatives est calculée à chaque période de six heures. La figure 4.7 illustre le calcul de cette moyenne simple. La légende de cette méthode affiche ‘moyen’.

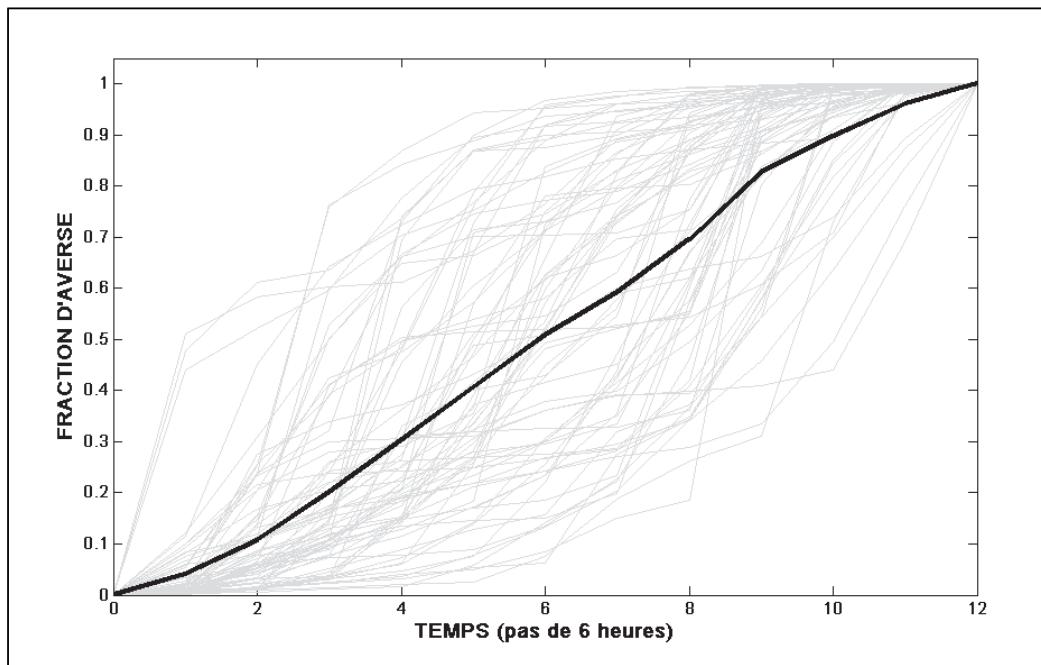


Figure 4.7 Méthode du hyéogramme 'moyen'.

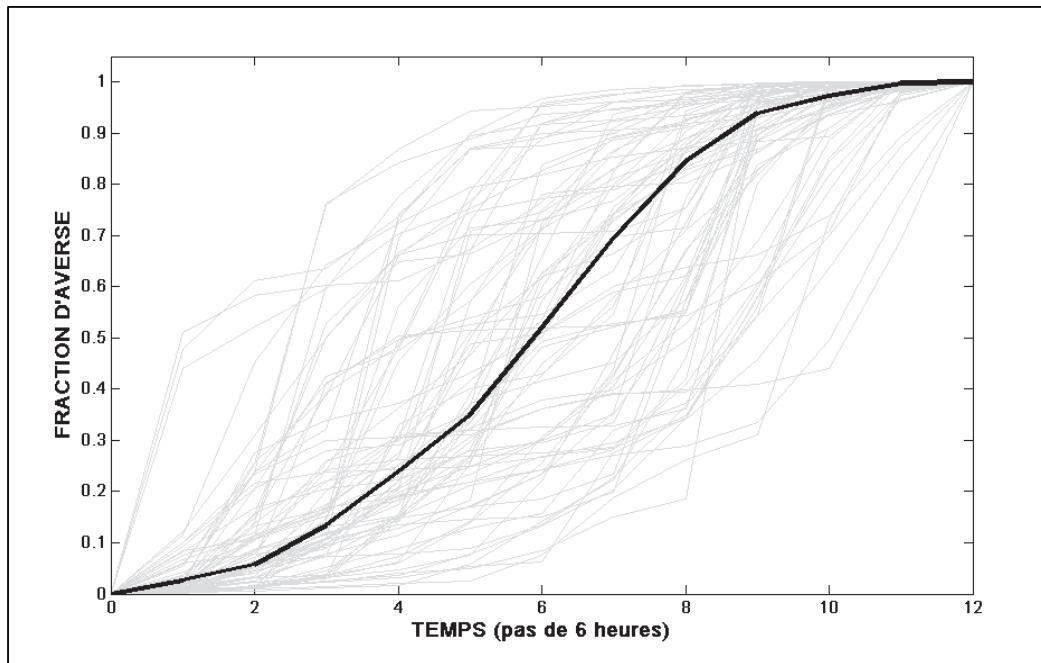


Figure 4.8 Méthode du hyéogramme 'cumul'.

4.2.4 Méthode par moyenne du temps moyen

Enfin, une dernière méthode ressemble à la précédente et s'inspire de la méthode par interpolation des cumuls présentée par Mailhot *et al.* (2007b). Elle procède au calcul du temps moyen pour obtenir une fraction cumulative d'averse. Ce processus comprend trois étapes et s'applique à l'ensemble des averses. Premièrement, il est nécessaire de définir le nombre de divisions de fraction à estimer. Ici, un nombre de vingt divisions est déterminé subjectivement, soient les fractions de [0 0,05 0,1 0,15 0,2 0,8 0,85 0,9 0,95 1]. Deuxièmement, à chaque division de la courbe cumulative, le temps requis pour cumuler la fraction d'averse est interpolé et une moyenne de ces temps est faite sur l'ensemble des courbes. Une courbe moyenne est ainsi obtenue. Troisièmement, les fractions cumulatives qui correspondent aux pas de six heures d'averse sont déduites par interpolation. La figure 4.8 illustre le calcul de cette moyenne par cumul. La légende de cette méthode affiche ‘cumul’.

4.3 Modélisation hydrologique de la PMP

La modélisation hydrologique est réalisée à l'aide du logiciel HSAMI, développé par Hydro-Québec (Bisson et Roberge, 1983; Fortin, 2000). Ce modèle est conceptuel et de type pluie-débit. Il est plus amplement présenté ultérieurement, au chapitre intitulé ‘Modélisation hydrologique’.

Cette section-ci aborde deux particularités de la modélisation hydrologique propres aux travaux de cette recherche. Tout d'abord, il est question du calibrage du modèle. Puis, le mode d'insertion de la PMP dans la série de données de précipitation fait également l'objet de deux sections distinctes. Une section porte sur l'insertion selon l'OMM et une autre section porte sur une insertion aléatoire.

4.3.1 Calibrage du modèle

Le calibrage du modèle hydrologique a comme objectif de caler les 23 paramètres du modèle HSAMI sur les caractéristiques du bassin versant. C'est la recherche du groupe de paramètres qui permettent au modèle de fournir des débits simulés qui soient les plus fidèles possibles aux débits observés. Le coefficient de Nash-Sutcliffe sert de critère de validation.

Habituellement, le calibrage porte sur des périodes complètes, c'est-à-dire que les débits de toutes les saisons sont calés. Cette façon de procéder permet d'obtenir un total des volumes de ruissellement simulés comparable au total des volumes de ruissellement observés. Sur une base annuelle, les plus grands débits sont les crues printanières. Par définition, le coefficient de Nash-Sutcliffe accorde une importance plus grande aux valeurs fortes retrouvées au printemps. Il est normal que les paramètres de fonte de neige aient un poids important. Le calibrage ajuste donc le groupe de paramètres davantage en fonction de la fonte.

Un tel ajustement n'est pas optimal pour simuler les pointes de débit en été et en automne. Pour cette raison, un calibrage sur les débits de cette portion d'année a été effectué. La période en question débute après la crue printanière (température journalière minimale supérieure à 0°C) et se termine avant que le sol soit complètement gelé (température journalière maximale inférieure à 0°C).

Le calibrage du modèle sur la période été-automne vise à ce que les paramètres qui agissent sur les processus de ruissellement ne soient pas biaisés par les paramètres de fonte. Le nombre de paramètres qui ont de l'influence est réduit et les paramètres d'été sont plus significatifs, c'est-à-dire qu'ils ont plus de poids par rapport aux paramètres de fonte.

4.3.2 Mode d'insertion de la PMP inspirée de l'OMM

L'OMM recommande d'insérer la PMP après une première tempête, c'est-à-dire lorsque le niveau de saturation du sol est élevé. L'artifice employé pour s'en assurer est d'imposer une demi-PMP environ six jours avant le début de la PMP complète (SNC-Lavalin, 2004). Cette façon de faire permet d'atteindre deux objectifs : le sol est saturé au niveau recherché et, également, l'atmosphère a suffisamment de temps pour se recharger en humidité et réunir les conditions favorables pour générer une précipitation de l'envergure d'une PMP.

Une alternative proposée ici est d'identifier des conditions limites de saturation du sol. Dans un premier temps, une période où le niveau de saturation est faible et, dans un deuxième temps, une période où le niveau de saturation est élevé fournissent des limites inférieure et supérieure à la CMP. Dans les deux cas, l'insertion de la séquence (demi-PMP + PMP) après deux jours secs, au moment où le ruissellement de la dernière averse s'achève, modifie la série de données de précipitation. Les débits de pointe simulés à l'aide des paramètres de calibrage et des données météo modifiées par l'ajout de la séquence de PMP correspondent aux limites de la CMP. Cette alternative vise à évaluer la sensibilité des conditions initiales de saturation du sol.

4.3.3 Mode d'insertion aléatoire de la PMP

Une méthode probabiliste consiste à lancer 1000 fois l'application HSAMI, en insérant la PMP de façon aléatoire dans la série météo. L'insertion doit être faite à l'intérieur de la période été-automne. L'ensemble des 1000 débits de pointe simulés est reproduit graphiquement selon une fonction de probabilité de densité, pour laquelle l'aire sous la courbe est égale à 1. La distribution des débits de pointe obtenue reflète l'influence des conditions initiales (ex. : humidité du sol) du bassin sur la magnitude de la CMP. On peut associer une probabilité de non-dépassement au niveau de confiance recherché. Ceci doit être interprété de la façon suivante, soit une CMP évaluée selon un niveau de confiance de

95%. Advenant une averse d'intensité égale à la PMP, il y a 95% des chances que le débit généré par les conditions initiales soit inférieur à cette CMP.

Les résultats sont compilés graphiquement sur une courbe de densité de probabilité (pour exemple, voir figure 4.9) ou sur une courbe de distribution cumulative inverse (pour exemple, voir figure 4.10). Par exemple, une crue de conception basée sur la PMP, selon une probabilité de non-dépassement de 95%, serait égale à environ 7400 m³/s, selon la figure 4.10.

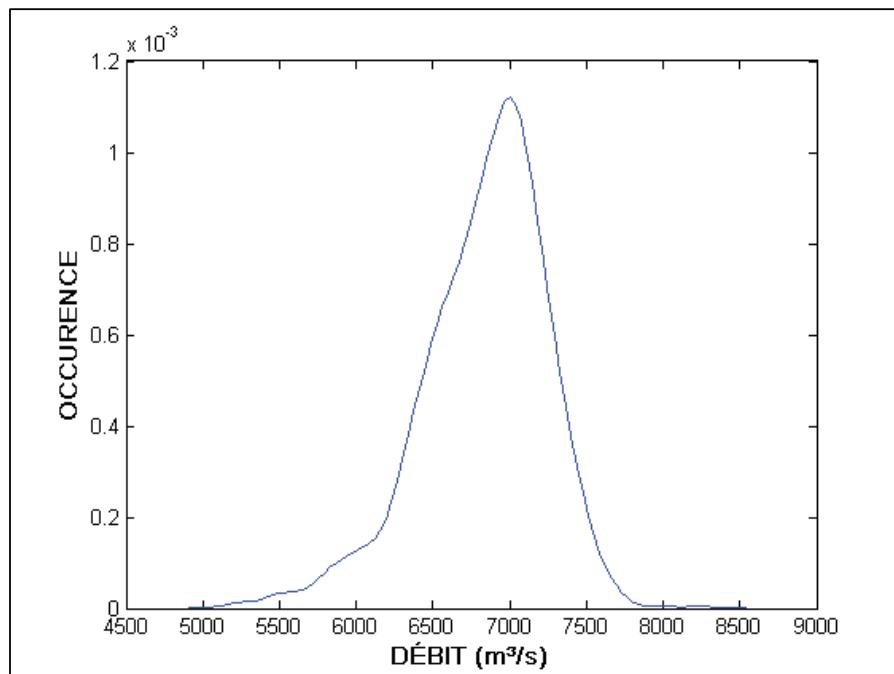


Figure 4.9 Exemple d'une courbe de densité de probabilité.

La décision de faire un calibrage sur la période été-automne est un choix méthodologique. Il vise à représenter le plus adéquatement possible les débits générés par les averses sur la période d'été-automne et simulées par le MRCC. Dans le même ordre d'idées, la période estivale doit être redéfinie pour chacun des horizons étudiés pour pouvoir apprécier les variabilités de la réponse hydrologique en climat futur. Les données météorologiques qui

proviennent du NLWIS seront donc utilisées uniquement dans le but d'obtenir les paramètres de calibrage.

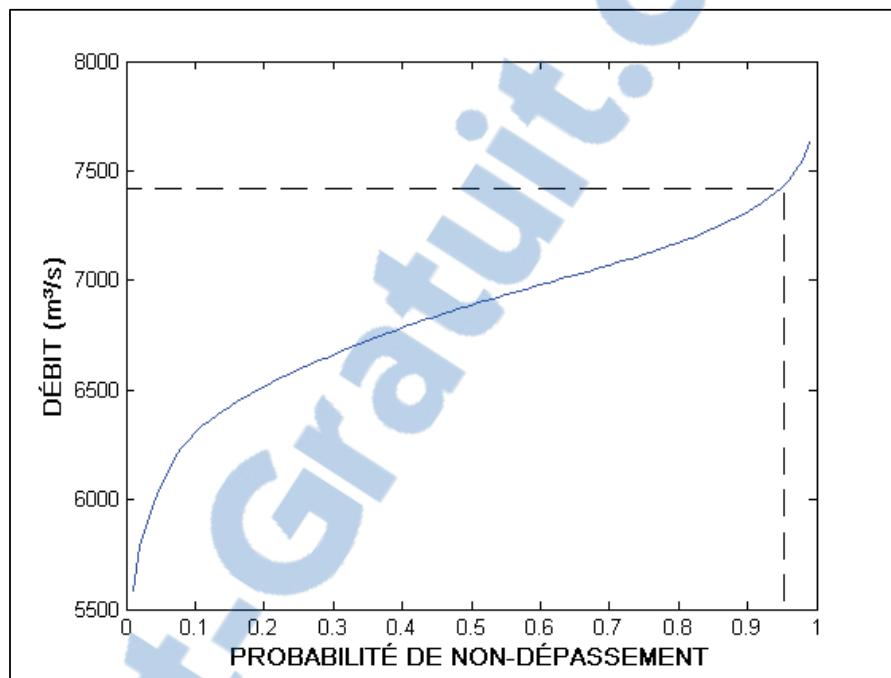


Figure 4.10 Exemple de courbe cumulative de distribution.

4.3.4 Définition des périodes d'été-automne des horizons

Les procédures de sélection d'averses et d'insertion de la PMP requièrent une période de référence et celle-ci correspond à la période ‘été-automne’. Pour les besoins de cette recherche, cette période débute après la crue printanière et se termine au début de l'hiver, soit au moment où la capacité d'infiltration du sol est représentative des conditions hivernales. Les averses à maximiser doivent, par conséquent, avoir eu lieu durant cette période. La détermination de cette période s'appuie sur le cycle hydrologique.

L'hypothèse de stationnarité est appliquée aux paramètres du modèle hydrologique. Les débits simulés de chaque horizon et simulation climatique sont générés à partir du seul jeu de paramètres connu par le calibrage et des données météorologiques de l'horizon étudié. La

définition des périodes d'été-automne de chaque horizon et simulation se base sur plusieurs informations. Tout d'abord, il s'agit des débits simulés par le modèle hydrologique. Ensuite, ce modèle fournit également des variables qui renseignent sur l'état de gel du sol et de la couverture de neige au sol.

Puisque les dates de début et de fin de cette période varient grandement, cette opération est réalisée visuellement par l'étude de l'hydrogramme simulé du bassin, en combinaison avec les indices de gel et de couverture du sol.

CHAPITRE 5

ÉTUDE DE CAS

Le bassin versant choisi pour cette étude est celui de Manic5. Ce chapitre présente, tout d'abord, une description du bassin versant, puis décrit les données nécessaires à l'estimation de la PMP, ainsi que celles qui sont nécessaires à l'estimation de la CMP.

5.1 Description générale du bassin versant

Le bassin versant Manic5 est situé au cœur de la province de Québec, dans la région administrative de la Côte-Nord. Il reçoit les apports du sous-bassin Petit Lac Manicouagan, situé en amont et déverse ses propres apports dans la rivière Manicouagan. Il couvre une superficie totale d'environ 29160 km², incluant le sous-bassin du Petit Lac Manicouagan. Cependant, les données hydrométriques utilisées concernent exclusivement le bassin Manic5, la superficie nette de ce bassin est d'environ 24610 km². Deux centrales hydroélectriques sont aménagées à l'exutoire de ce bassin, avec un potentiel de production de plus de 2600 MW.

La topographie du bassin Manic5 n'est pas très accidentée. Les plus hauts sommets se trouvent du côté est, sur les Monts Groulx, avec leurs quelques 1100 m d'élévation. L'exutoire du bassin versant se trouve à environ 200m. Les rares informations sur le type de sol le décrivent comme étant du podzol, sur lequel il est courant de retrouver des conifères (De Koninck, 2002). La végétation du bassin Manic5 est une forêt boréale dont l'épinette noire est la principale espèce présente (De Koninck, 2002). La base de données GéoBase complète les informations recueillies et la figure 5.1 offre une représentation graphique de l'occupation du territoire.

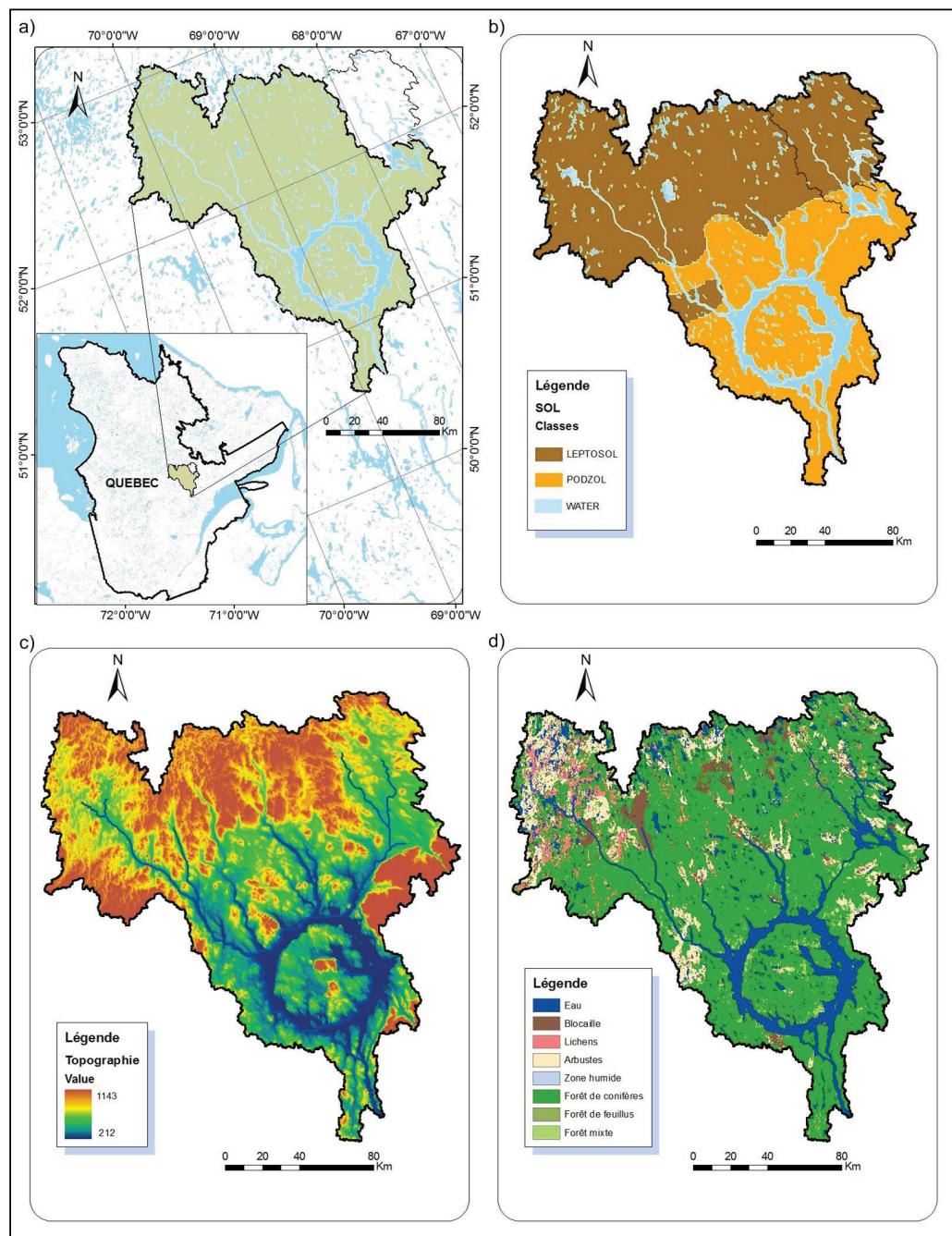


Figure 5.1 Mini atlas du bassin versant Manic5⁷, en a) réseau hydrographique, en b) classes de sol, en c) topographie et en d) couverture du sol.

⁷ Source des données géospatiales : www.geobase.ca

Situé entre les parallèles 50 et 53°N et entre les méridiens 67,5 et 70°W, ce bassin accumule les précipitations durant la période hivernale et son régime hydrologique reflète la fonte printanière de cette neige accumulée. Cette crue est la plus importante de l'année. Sur l'hydrogramme moyen illustré à la figure 5.2, la crue moyenne a lieu vers la fin du mois de mai. Toutefois, des périodes importantes de crue peuvent survenir également en été et automne. Le laminage de crue est influencé par la présence du réservoir Manicouagan. Par régulation, ce réservoir augmente le temps requis pour atteindre un débit de pointe à l'exutoire du bassin, c'est-à-dire le temps de concentration.

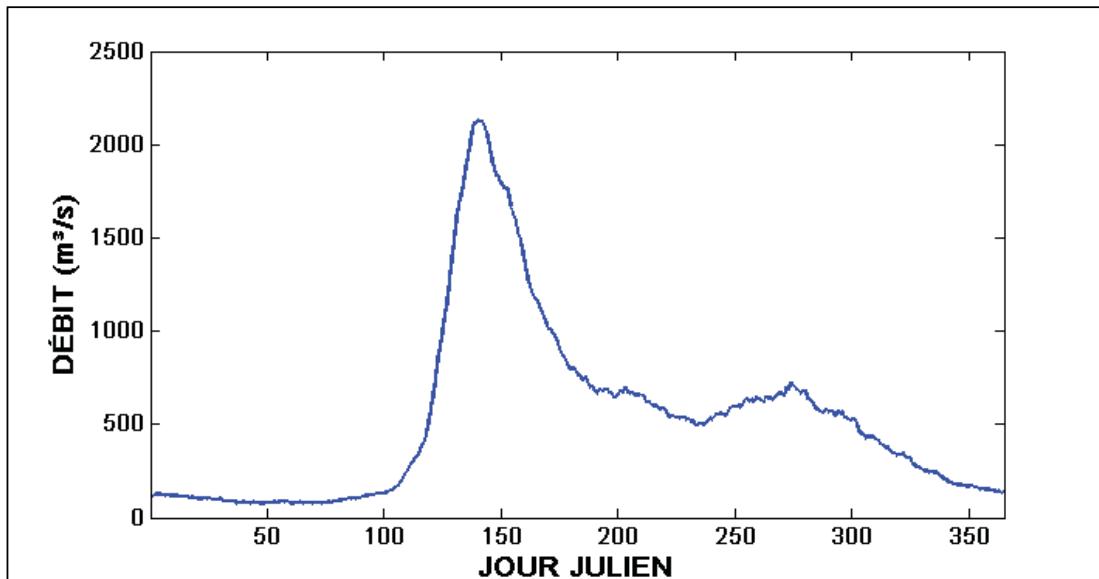


Figure 5.2 Hydrogramme observé moyen du bassin Manic5, pour la période de 1966 à 2003.

5.2 Données nécessaires à l'estimation de la PMP

Le modèle régional canadien du climat (MRCC) simule le climat à partir des conditions limites définies par un modèle de circulation générale ou par une réanalyse d'observations. Le domaine de simulation est centré sur le Québec, avec une résolution horizontale de 45km (vrai au parallèle 60°N). Le MRCC simule les données avec un pas de temps de quinze minutes et les archive à une fréquence de six heures. Les données disponibles sont les

données d'archivage. Les résultats de simulation sous la version 4.2.3 du modèle sont sélectionnés. Parmi les quelques 300 variables archivées par Ouranos, la méthode développée nécessite trois variables simulées par le MRCC. Il s'agit des variables ‘pcp’, ‘shum’ et ‘rhum’.

Tout d'abord, la variable ‘pcp’ représente l'intensité moyenne⁸ sur une durée de 6 heures et son unité est ‘mm/s’, c'est un taux moyen de précipitation sur une tuile. Le MRCC comprend des valeurs non nulles à tous les pas de 6h. Toutefois, une valeur inférieure à 0,1mm est considérée nulle et la période couverte par le pas de 6h ne reçoit aucune précipitation. Une conversion en hauteur de précipitation est faite par la simple multiplication de ce taux par la durée du pas, en secondes. Par conséquent, l'appellation ‘pcp’ s'adresse indistinctement à un taux de précipitation ou à une hauteur de précipitation, selon le contexte. L'incertitude de la hauteur totale de précipitation durant l'averse correspond à celle associée au modèle MRCC.

Ensuite, la variable d'humidité spécifique ‘shum’ représente la quantité de vapeur d'eau contenue à l'intérieur d'une couche de l'atmosphère, c'est-à-dire dans une masse de 1kg d'air humide. C'est un rapport de masse moyen sur l'épaisseur d'un niveau de pression, en kg d'eau/kg d'air. Cette variable est instantanée et représentative de l'état de l'atmosphère pendant le dernier pas de 15 minutes de la période de 6 heures. De plus, elle est la base de l'estimation de la vapeur d'eau contenue entre deux niveaux de pression, en équivalent en eau liquide (voir équation 3.2).

Enfin, la variable ‘rhum’ représente l'humidité relative, c'est-à-dire le taux de saturation de l'air en humidité. Cette variable est également instantanée, donc elle est cohérente avec la variable d'humidité spécifique.

⁸ La précipitation est sous forme liquide ou solide. La valeur du taux de précipitation de la neige est son équivalent en eau.

Le fait que ces deux dernières variables ('shum' et 'rhum') soient des valeurs instantanées peut sembler inconsistante avec la variable de précipitation. Puisque le but de ce projet porte sur des conditions extrêmes et que certaines données utilisées sont des valeurs moyennes, il pourrait s'introduire un biais dans l'évaluation de pw_{averse} et de pw_{max} . La question est abordée dans le chapitre 8.

5.2.1 Couverture spatiale et temporelle

Les données sont issues de simulations du MRCC, version 4.2.3 et le domaine de couverture est centré sur le Québec. La résolution horizontale de la grille est de 45km (vrai à 60°N). Le bassin versant Manic5 couvre une superficie de 24610km². Une tuile de la grille du MRCC couvre environ 2025km². Au sens strict du terme, 12 tuiles du MRCC sont nécessaires pour couvrir le bassin Manic5.

Par contre, un plus grand nombre de tuiles est retenu, soit 57 tuiles. Ce nombre est basé sur le fait que chacune des tuiles est considérée équivalente à une station météorologique. Les tuiles situées à environ 100 km du bassin versant (voir figure 5.3) ont été incluses dans le processus de sélection d'averses. Le détail des coordonnées de ces points de grille est disponible à l'annexe II.

Deux simulations du MRCC, version 4.2.3 sur le domaine du Québec ont été sélectionnées pour faire la présente étude de cas. Tout d'abord, la simulation 'aft' a été choisie pour représenter le climat récent. Cette simulation couvre la période de janvier 1961 à juillet 2002, inclusivement. Cette simulation est pilotée par la réanalyse globale ECMWF ERA40 (European Center for Medium-Range Weather Forecasts ReAnalyses) (Uppala *et al.*, 2005), qui est disponible selon une grille régulière de 2,5 degrés en latitude et longitude.

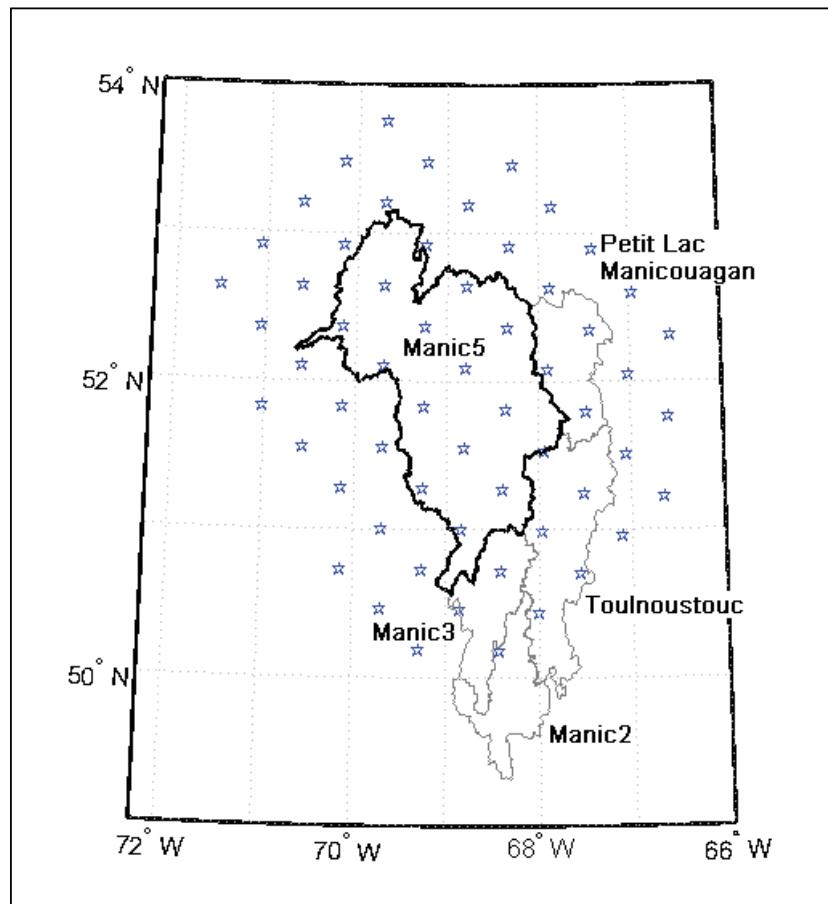


Figure 5.3 Points de grille du bassin versant de la rivière Manicouagan.

Pour satisfaire le besoin de l'étude en condition de changement climatique, la couverture complète à partir de 1961 jusqu'à 2100 est requise. La simulation 'afx', également issue de la version 4.2.3 du MRCC, offre cette couverture temporelle. Elle est pilotée par un modèle de circulation générale, soit le modèle couplé climatique global, version 3 (MCCG3) (Flato et Boer, 2001; Scinocca *et al.*, 2008). Le modèle global (MCCG) et, par conséquent le modèle régional (MRCC), sont forcés par la projection d'émission de gaz à effet de serre SRES A2, tel que décrit par Nakicenovic *et al.* (2000).

5.2.2 Horizons à l'étude

Le climat récent de la simulation ‘afx’ est représenté par la période 1961-2000, soit 40 ans. Le climat projeté est représenté par trois horizons futurs qui sont définis par tranches de 30 ans. Un premier horizon s’étend de 2011 à 2040, un deuxième va de 2041 à 2070 et pour terminer, un dernier horizon de 2071 à 2100. Ce découpage temporel permet une étude des changements potentiels sous un climat en évolution.

5.3 Données nécessaires à la modélisation hydrologique

Deux types de données sont nécessaires à la modélisation hydrologique : les données météorologiques et les données hydrométriques. Les données météorologiques fournissent les quantités d’eau précipitées, sous leur forme liquide et solide, ainsi que les températures minimales et maximales. Ces dernières permettent d’estimer les pertes par évapotranspiration, ainsi que le taux de fonte de la neige. Les données météorologiques sont décrites dans la section 5.3.1. Quant aux données hydrométriques, elles permettent d’étalonner le modèle hydrologique. Ces données sont présentées dans la section 5.3.2.

5.3.1 Données météorologiques

Les données météorologiques utilisées proviennent de plusieurs sources, selon l’utilisation, c’est-à-dire pour la détermination de la période ‘été-automne’, pour le calibrage ou pour le calcul de la CMP.

La procédure de calibrage requiert des données colligées avec les données hydrométriques. Le National Land and Water Information Service (NLWIS), mis sur pied par Agriculture et Agroalimentaire Canada, fournit des données météorologiques de qualité qui regroupent les observations de plus 7500 stations (Hutchinson *et al.*, 2009). Les données journalières de 1961-2003 sont interpolées sur une grille de 10km de résolution, avec le logiciel ‘ANUSPLIN’ (Hutchinson *et al.*, 2009), qui tient compte de la topographie des lieux. Elles

sont disponibles pour la presque totalité du territoire canadien (au sud de 60°N). Cette méthode d'interpolation est efficace pour couvrir un bassin versant qui est desservi localement par peu de stations météorologiques. Environ 250 tuiles NLWIS assurent la couverture du bassin Manic5. Des moyennes journalières de chacune des variables de température minimale, de température maximale et de précipitation sont calculées à l'échelle du bassin Manic5, donc sur les 250 tuiles de la grille NLWIS. Les données utilisées correspondent à la même période de disponibilité des données hydrométriques, soit de 1966 à 2003.

Quant à elles, les procédures de détermination de la période ‘été-automne’ et de calcul de la CMP utilisent des données météorologiques de même source que celles requises pour l'estimation de la PMP, soient les mêmes simulations du MRCC. Des moyennes journalières sont également calculées à l'échelle du bassin, sur les 57 tuiles de la grille du MRCC. Quatre variables sont requises : ‘pcp’, ‘pcpn’, ‘stmn’ et ‘stmx’. Les deux premières (‘pcp’ et ‘pcpn’) permettent d'obtenir les quantités de précipitation totale et de précipitation solide (neige), alors que les deux dernières (‘stmn’ et ‘stmx’) fournissent la température minimale et la température maximale, évaluées près de la surface, comme si c'était une station. Les précipitations sous forme liquide sont obtenues par la soustraction de la précipitation solide de la précipitation totale.

La procédure de détermination de la période ‘été-automne’ utilise intégralement les données météorologiques. Par contre, la procédure du calcul de la CMP modifie la série météorologique avec la PMP, telle qu'évaluée selon la méthodologie du chapitre 3.

5.3.2 Données hydrométriques

Les données hydrométriques originales du bassin versant Manic5 sont gracieusement fournies par Hydro-Québec. Ces données correspondent aux apports naturels reconstitués sur le bassin. Elles ne comprennent pas les apports du bassin du Petit Lac Manicouagan, situé en amont et qui a une superficie approximative de 4500km². Les données disponibles couvrent

la période de 1966 à 2003. Ces données observées sont utilisées seulement pour fixer les paramètres de calibrage. Par la suite, la modélisation hydrologique des données météorologiques de chacun des cinq horizons génère les débits sur chacune des périodes. L'analyse de ces séries définit les périodes été-automne.

5.4 Préparation du modèle hydrologique

La modélisation hydrologique est réalisée à l'aide d'un modèle déterministe, conceptuel et global, HSAMI (Fortin, 2000; Minville, 2008). Ce modèle est de type pluie-ruissellement. Hors des périodes hivernale et de fonte, ceci signifie, dans un premier temps, que le volume d'eau précipitée est partagé entre l'évapotranspiration, l'infiltration et l'écoulement à la surface. En d'autres mots, cette eau n'a d'autres choix que de retourner dans l'atmosphère, de pénétrer dans le sol, ou de s'écouler librement vers un cours d'eau. Dans un second temps, ces volumes d'eau sont distribués dans trois réservoirs différents (les sols non saturés, les sols saturés et les lacs) et acheminés vers l'exutoire du bassin selon le concept d'hydrogramme unitaire (Fortin, 2000).

Le modèle HSAMI requiert un jeu de 23 paramètres qui sont ajustés par calibrage. Cette étape est discutée dans la prochaine section où il est également question de la validation du modèle.

5.4.1 Calibrage et validation du modèle

Les données météorologiques utilisées pour le calibrage hydrométrique du bassin Manic5 proviennent du National Land and Water Information Service (NLWIS). Ces données ont été privilégiées par rapport aux données du MRCC en raison de leur cohérence avec les données hydrométriques.

Dans un objectif prévisionnel du cycle hydrologique d'un bassin versant, les étapes de calibrage et validation visent généralement une période de temps complète. Autrement dit, si

le calibrage porte sur une période de trois ans, l'ensemble des paramètres sont ajustés de sorte que les résultats sur les 1095 données journalières de débit soient optimisés. Bien que HSAMI soit un modèle qui travaille bien en période de crue printanière, ses paramètres sont ajustés uniquement sur les débits d'été-automne pour répondre aux besoins de l'étude. Dans ce cas-ci, puisque l'intention ultime est de simuler une crue d'été-automne, il est pertinent de concentrer les efforts d'optimisation sur les débits de ces saisons exclusivement. Par conséquent, le calibrage se fait sur une copie de la série de données journalières, amputée des débits d'hiver et jusqu'à la fin de la crue printanière.

Le calibrage utilise l'outil interne du modèle HSAMI. À partir d'un jeu de 23 paramètres de base, dont huit se rapportent au processus de fonte et d'accumulation nivale, cet outil ajuste chacun des paramètres pour que les débits simulés s'approchent le plus possible aux débits observés. L'ensemble des données hydrologiques journalières disponibles couvre la période du 1^{er} janvier 1966, jusqu'au 31 décembre 2003. Les données de température minimale, température maximale et de précipitation sont extraites de la base donnée NLWIS pour la même période. Les paramètres utilisés ici proviennent d'un calibrage basé sur les débits observés sur une période de 15 ans, soit les années 1989 à 2003, inclusivement. Une période de même longueur a été identifiée pour la validation, soit les années 1974 à 1988.

La troncature de la série de d'observations tient compte de deux contraintes. Une première contrainte établit la fin de la période été-automne lorsque l'indice de couvert nival est supérieur à 0. La deuxième contrainte est plus fastidieuse à réaliser : il s'agit de statuer la fin de chaque crue. Le processus est réalisé visuellement en scrutant un minimum local sur l'hydrogramme observé. La figure 5.4 présente l'hydrogramme observé d'une année type. La période d'été-automne débute après la crue printanière. L'opération est effectuée sur les quinze années ciblées pour le calibrage. Sur la figure 5.4, la période débute au 27 juin et se termine au 20 décembre de l'année en cours.

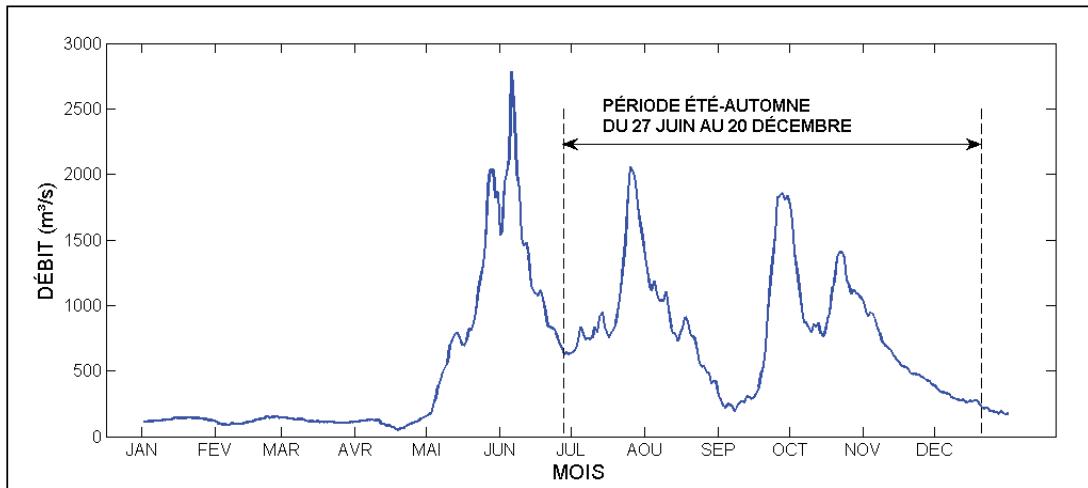


Figure 5.4 Identification de la période été-automne sur une année type (1967).

Le résultat du calibrage présente un coefficient de Nash-Sutcliffe égal à 0,72 et celui de la validation est égal à 0,65. Compte tenu de la période restreinte du calibrage (été-automne seulement). Ce résultat est jugé satisfaisant. La figure 5.5 illustre les résultats de calibrage et de validation⁹. Bien que les paramètres aient été établis en fonction des débits d'été-automne, les crues printanières sont néanmoins bien représentées.

⁹ L'annexe III présente le régime hydrologique sous chacune des séries météorologiques. Les séries sous le climat récent sont NLWIS, MRCC 'aft' et MRCC 'afx' (1961-2000). Les séries sous les horizons futurs (2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100) proviennent de la simulation MRCC 'afx'.

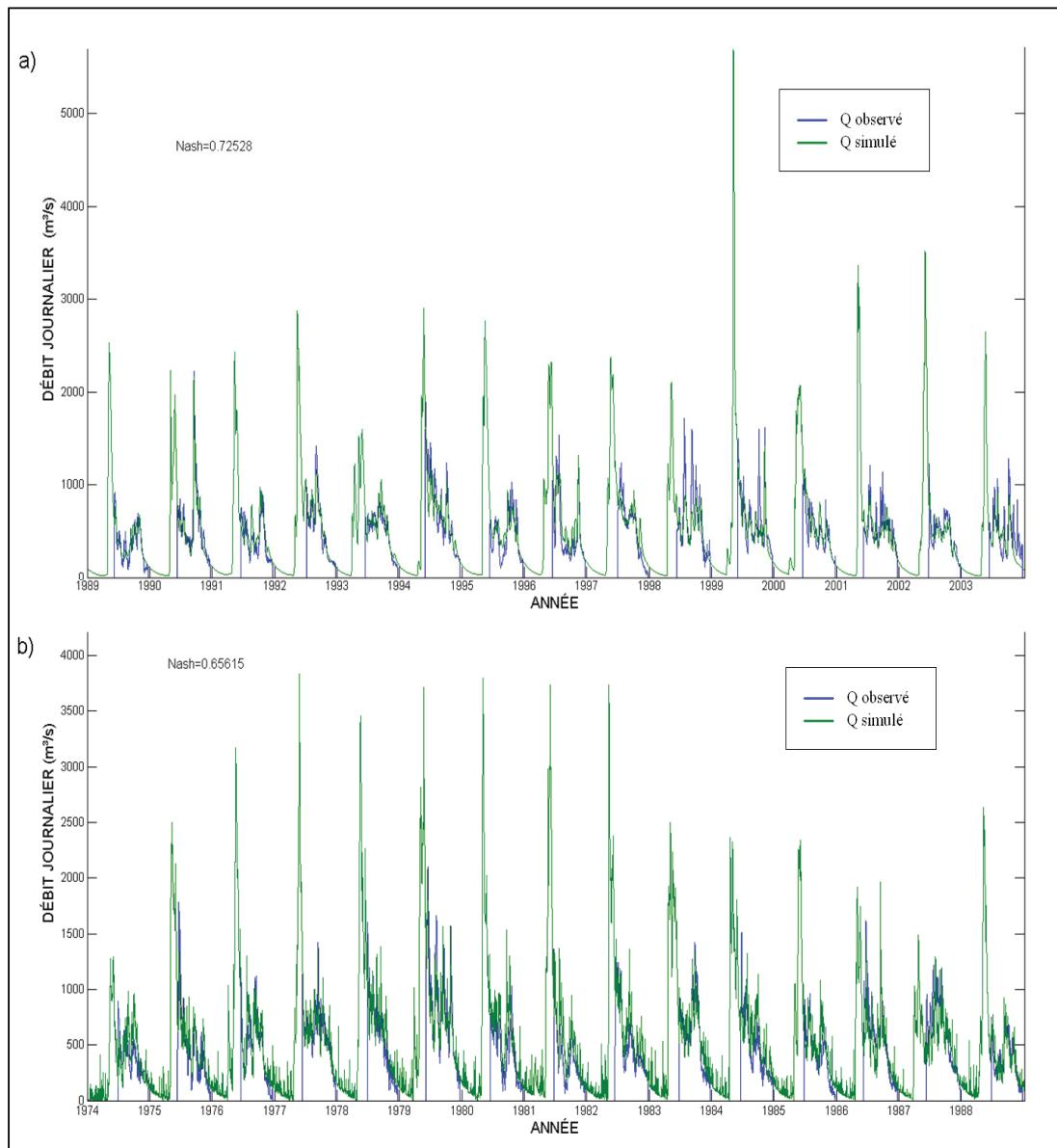


Figure 5.5 Résultats de calibrage du bassin Manic5. a) calibrage sur période de 1989 à 2003 et b) validation sur période de 1974 à 1988.

CHAPITRE 6

ESTIMATION DE LA PMP

Ce chapitre présente les résultats des différentes étapes du calcul de la PMP sur le bassin versant Manic5, en climat récent et sous différents horizons projetés.

6.1 Sélection des averses

À partir des données de précipitation, la première sélection rapporte un très grand nombre d'événements. Ceux-ci ont été identifiés à l'intérieur de la période annuelle d'été-automne prélevée sur l'hydrogramme simulé. Un exemple d'hydrogramme simulé est présenté à la figure 6.1. Sur celle-ci, la fin de crue et le début de gel déterminent la durée de la période été-automne.

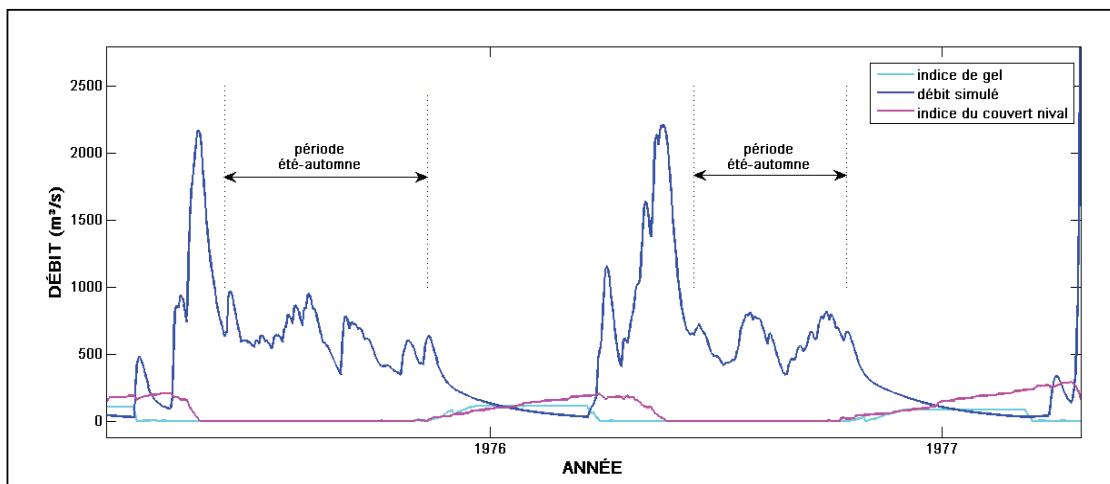


Figure 6.1 Détermination de la période d'été-automne à partir de l'hydrogramme simulé.

Comme il a été défini au chapitre 3, un événement consiste en une précipitation de 10mm et plus d'eau tombée sur une tuile sur une durée de six heures. Une averse est le total d'une précipitation reçue sur une tuile et elle comprend un ou plusieurs événements. Le tableau 6.1

compile le nombre de tempêtes qui ont eu lieu à proximité du bassin versant pour chacun des horizons et chacune des durées pour la période été-automne, ainsi que le nombre d'averses associées. Il est à noter que l'horizon récent débute au 1^{er} janvier 1961. Toutefois, il se termine au 31 juillet 2002 et au 31 décembre 2000, pour les simulations 'aft' et 'afx', respectivement. Ceci implique que la simulation 'aft' porte sur une période de plus de 41 ans, alors que la simulation 'afx' porte sur une période de 40 ans.

Pour faciliter la lecture du tableau 6.1, les valeurs qui correspondent à la simulation 'aft' sont le prorata sur 40 ans et une moyenne par décennie a été calculée. Tel que défini au chapitre 3, un événement est la portion d'averse pour laquelle un minimum de 10 mm de précipitation est simulé par le MRCC. Ainsi, une tempête peut être représentée par autant d'événements qu'il y a de tuiles qui ont enregistré un ou plusieurs hauteurs de précipitation supérieure à 10mm. Seules les tempêtes ayant lieu en été-automne sont incluses.

Tableau 6.1 Compilation des tempêtes et des averses pour les simulations 'aft' et 'afx', de 1961 à 2100, durant la période été-automne

HORIZON		NB TOTAL TEMPÈTES	MOYENNE PAR DÉCENNIE	NB TOTAL AVERSES	MOYENNE PAR DÉCENNIE
aft	1961-2000	625	156	31823	7956
		571	143	30557	7639
afx	2011-2040	509	170	27156	9052
	2041-2070	549	183	31300	10433
	2071-2100	637	212	36942	12314

Deux éléments méritent d'être soulignés. Premièrement, sur le même horizon en climat récent (1961-2000), les simulations 'aft' et 'afx' présentent un nombre de tempêtes différent l'une de l'autre. La simulation 'afx' affiche environ 9% moins de tempêtes, par rapport à la simulation 'aft'. Deuxièmement, à l'intérieur de la simulation 'afx', au fil du temps, le

nombre de tempêtes croît constamment, avec une augmentation de 48% pour l'horizon 2071-2100 (sur la moyenne par décennie, par rapport à l'horizon récent).

Tableau 6.2 Compilation des averses, selon la durée, pour les simulations 'aft' et 'afx' de 1961 à 2100, durant la période été-automne

		Durée d'averse	24h	48h	72h
		Horizon			
aft		1961-2000	9060	13237	9526
			8984	13581	7982
afx		1961-2000 75%	6738	10186	5986
		2011-2040	9353	11716	6087
		2041-2070	10600	13048	7652
		2071-2100	13075	15642	8225

Le tableau 6.2 affiche la répartition des averses identifiées au tableau 6.1, en fonction de la durée d'averse. On remarque qu'en climat récent (1961-2000) le nombre d'averses de durée de 24, 48 et 72 h varie de -1%, 3% et -16%, respectivement, par comparaison de la simulation 'afx' avec la simulation 'aft' (tableau 6.2).

Les horizons futurs couvrent une période plus courte de 30 ans. Pour fins de comparaison et d'analyse avec les horizons futurs, les résultats 'afx' de l'horizon 1961-2000 sont ramenés à un horizon de 30 ans, avec l'application d'un facteur de correction de 75%. Cette correction du nombre d'averses de la simulation 'afx-1961-2000' est présentée avec une trame de fond gris au tableau 6.2. Le nombre d'averses suit une tendance à la hausse, de 1961 jusqu'à 2100. La figure 6.2 illustre les données du tableau 6.2 qui se rapportent aux horizons sur 30 ans de la simulation 'afx'. Il y est plus facile de constater que le nombre d'averses de 24h, 48h et 72h augmente de 94%, 54% et 37%, respectivement.

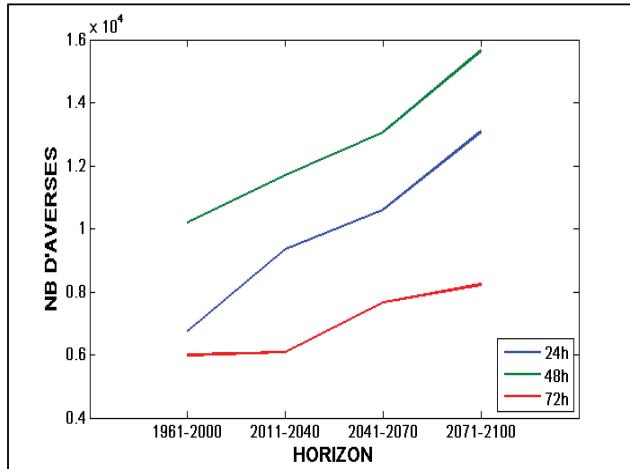


Figure 6.2 Évolution du nombre d'averses identifiées au tableau 6.2, pour la simulation 'afx'.

Cette répartition ne permet pas de qualifier les différents types d'averse. Tout au plus, il pourrait s'agir d'une variation du climat, que la cause soit naturelle ou d'origine anthropique.

6.2 Eau précipitable durant l'averse

Pour des fins de démonstration, une averse type est choisie arbitrairement à partir des données de la simulation ‘aft’. Cette averse, d'une durée de 72 heures, débute le 12 octobre 1961 à 12 :00 et se termine en date du 17 octobre à 06 :00. Cette portion de tempête a lieu sur la tuile-centre du bassin Manic5. L'eau précipitable est calculée sur toute la colonne d'atmosphère durant l'averse, à partir de la surface. La figure 6.3 illustre le profil d'humidité simulé par le MRCC, au moment le plus fort de l'averse. La représentation graphique convient au caractère de la variable utilisée ‘shum’, c'est-à-dire une moyenne à chaque niveau de pression. Cette représentation est préférée au diagramme aérologique qui convient particulièrement aux données ponctuelles.

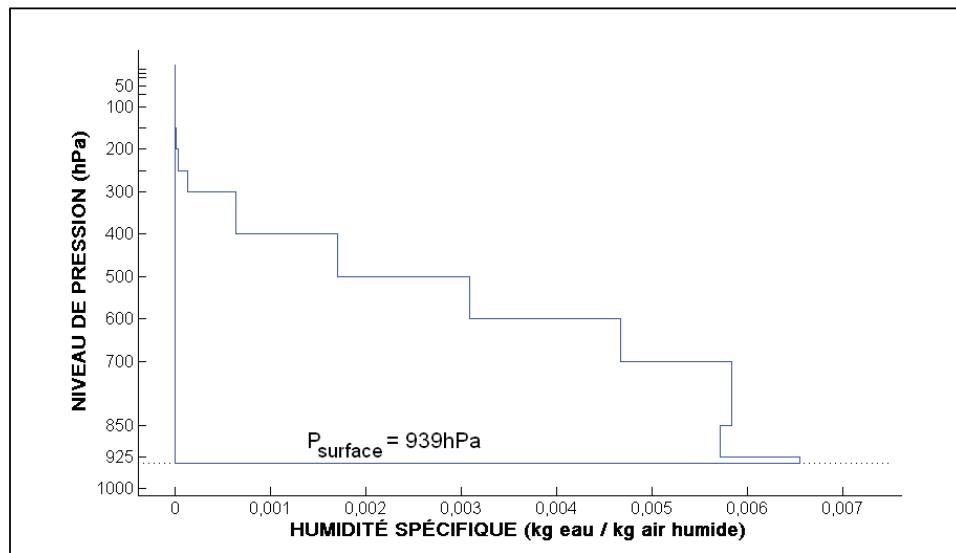


Figure 6.3 Profil d'humidité spécifique en date du 15 octobre 1961, à 18 :00.

La figure 6.4 permet de suivre l'évolution de l'averse. Le graphique inférieur, en b), affiche l'humidité spécifique de chacun des niveaux de pression, depuis la haute atmosphère jusqu'à la surface. La courbe de valeurs les plus grandes (couleur rouge) correspond à l'humidité spécifique du niveau de pression le plus près de la surface. Il est à noter que sept courbes sont apparentes, sur une possibilité de 18 niveaux de pression. Ceci s'explique par le fait que les courbes des niveaux de pression inférieure à 300 hPa se superposent puisque, comme le démontre la figure 6.3, l'humidité spécifique présente à ces altitudes est très inférieure à 0,001 kg/kg.

Le graphique supérieur de la même figure 6.4, en a), présente le hyétogramme de l'averse de 72 heures (barre verticale) et l'eau précipitable calculée pour la période entourant l'averse (courbe bleue). La valeur de pw_{averse} correspond à la valeur maximale de cette courbe bleue. La courbe verte de ce graphique affiche, quant à elle, la variable pw_{max} qui sera abordée dans la prochaine section.

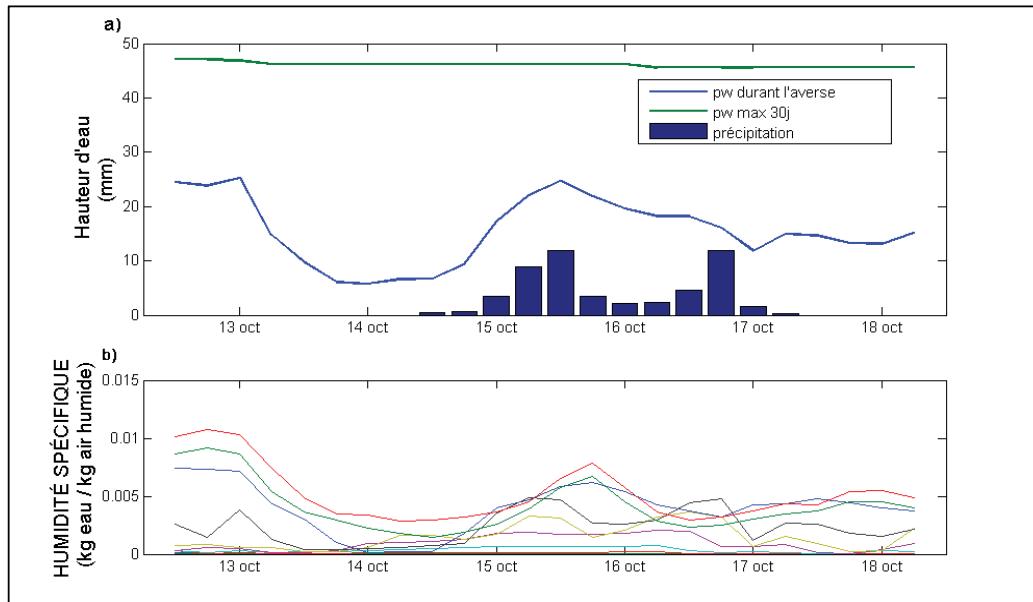


Figure 6.4 Évolution au cours d'une averse type,
en a) de la hauteur de précipitation, de l'eau précipitable durant l'averse et
de l'eau précipitable maximale (valeur saisonnière, sur 30 jours)
et en b) de l'humidité spécifique de chacun de 18 niveaux de pression.

6.3 Eau précipitable maximale

Les équations 3.4 et 3.5 permettent d'évaluer l'eau précipitable maximale (pw_{max}). La figure 6.5 présente la sensibilité du seuil d'humidité relative (RH) dans le calcul du maximum d'eau précipitable. Elle est valide pour l'étude des averses sous forme liquide, exclusivement. En période hivernale, les valeurs affichées peuvent provenir de condition de température de surface inférieure ou supérieure au point de congélation. Par définition, le maximum saisonnier retient la plus grande valeur, alors que la température est supérieure à 0°C et les précipitations sont sous forme liquide.

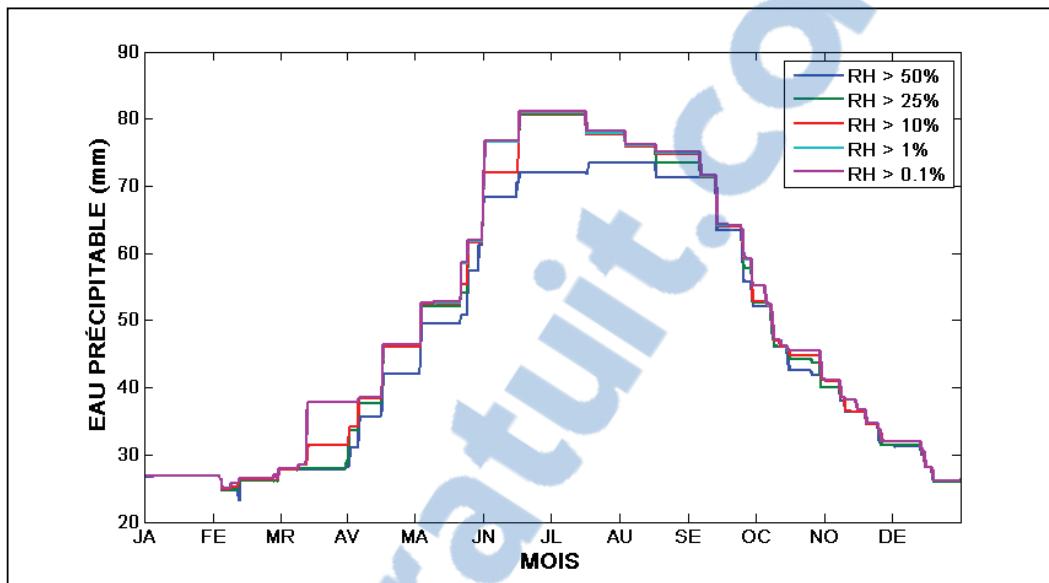


Figure 6.5 Sensibilité du seuil RH dans le calcul de maximisation d'eau précipitable, valeur saisonnière 30 jours, résultat présenté sur les données MRCC 'aft', tuile au centre du bassin Manic5 (no 144).

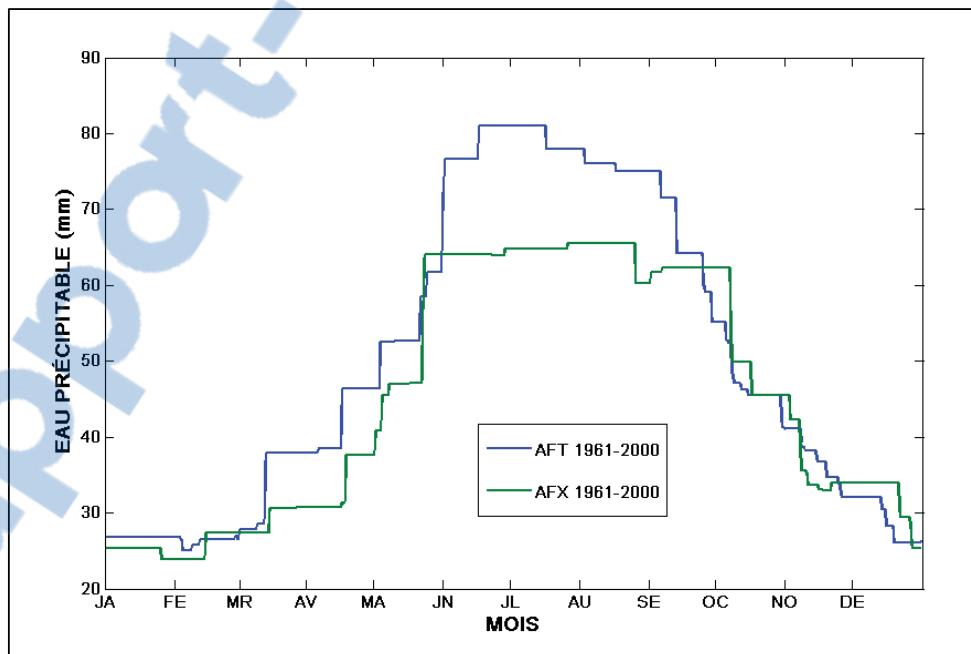


Figure 6.6 Quantité maximale d'eau précipitable sous le climat récent (1961-2000) pour les simulations 'aft' et 'afx' (tuile 144).

Les valeurs d'humidité relative possibles sont comprises entre 0 et 1. L'équation 3.4 place l'humidité relative au dénominateur. Une valeur nulle dans cette équation provoque une erreur de calcul (division par 0). La sensibilité du seuil d'humidité relative présente quelques variations entre les courbes de 50, 25 et de 10%. Sur la figure 6.7, les tracés sous les seuils de 1% et 0,1% se chevauchent. La ligne cyan qui correspond à la courbe de 1% n'est nullement apparente. Aucun gain supplémentaire ne justifie l'adoption du seuil de 0,1%. En conclusion, le seuil de 1% a été retenu pour l'estimation de pw_{max} .

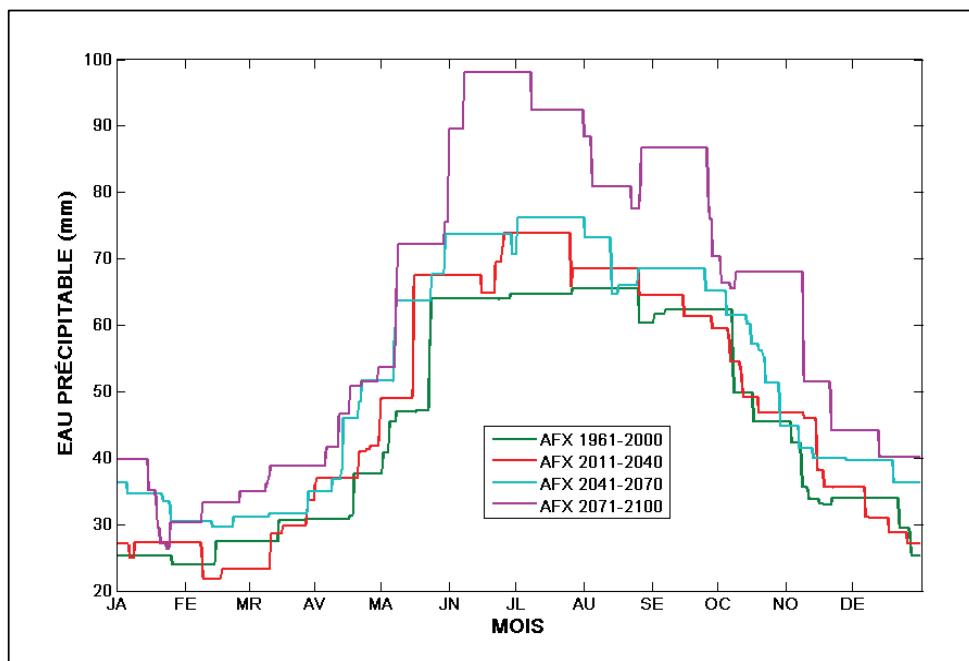


Figure 6.7 Quantité maximale d'eau précipitable pour tous les horizons couverts par la simulation 'afx' (tuile 144).

La figure 6.6 permet d'apprécier un biais possible entre deux simulations utilisées, 'aft' et 'afx', occasionné par le pilote utilisé par chacune des simulations. La différence est non-négligeable, en particulier durant les mois d'été. Quant à la figure 6.7, elle permet d'illustrer la progression de la quantité maximale d'eau précipitable, depuis 1961 jusqu'à 2100, sous la même simulation 'afx'. La période de référence est l'horizon 1961-2000 (ligne verte). De façon générale, cette figure démontre une légère augmentation du maximum possible d'humidité contenue dans l'atmosphère, sous les horizons 2011-2040 et 2041-2070 (lignes

rouge et cyan). Toutefois, sous l'horizon 2071-2100 (ligne magenta), la période été-automne présente une augmentation prononcée.

La figure 6.8 et la figure 6.10 illustrent la même réalité que les deux figures précédentes, mais à l'échelle régionale. Ces figures représentent les valeurs moyennes de juillet à octobre, inclusivement, de pw_{max} , pour différents horizons de temps. On constate que, de façon générale, les plus grands potentiels d'eau précipitable se retrouvent dans le sud de la région. C'est cohérent avec les patrons de température moyenne qui décroissent vers le nord. Sur la figure 6.8, on remarque que la simulation ‘aft’ (en a)) affiche des valeurs supérieures à celles de la simulation ‘afx’ (en b)).

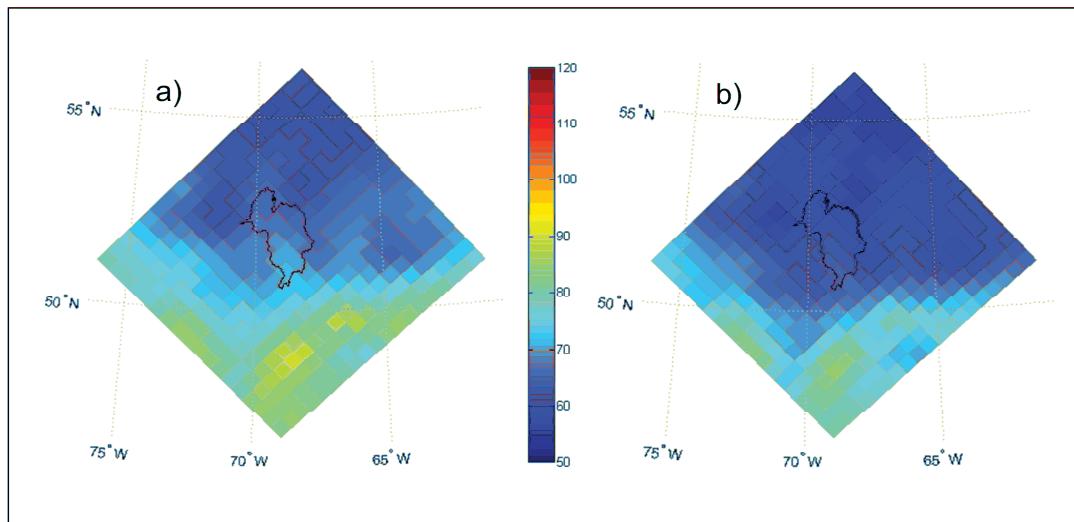


Figure 6.8 Moyenne de pw_{max} (mm) de juillet à octobre, inclusivement, en climat récent de 1961-2000, selon a) simulation ‘aft’ et b) simulation ‘afx’.

À titre d'exemple, sur une tuile près du centre du bassin Manic5, en climat récent de 1961-2000, on calcule des valeurs de pw_{max} de 67mm et 60mm pour les simulations ‘aft’ et ‘afx’, respectivement (voir figure 6.8). Cette diminution d'eau précipitable est peut-être un élément de réponse au nombre inférieur de tempêtes identifiées (voir section 6.1).

La figure 6.9 montre la différence entre les simulations ‘aft’ et ‘afx’ et illustre le biais régional sur la quantité maximale d’eau précipitable. Plus particulièrement, sur le bassin versant Manic5, la différence de pw_{max} entre les deux simulations est de l’ordre de 7 mm.

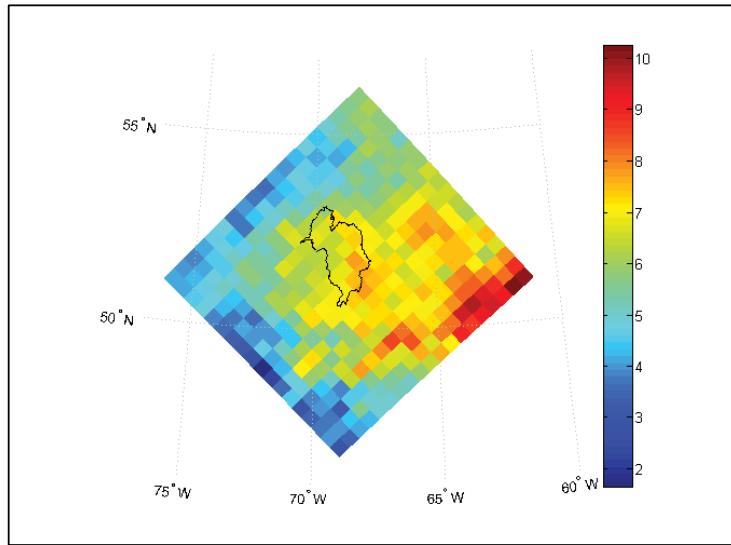


Figure 6.9 Écart entre les moyennes de pw_{max} (mm) de juillet à octobre, inclusivement, entre les simulations 'aft' et 'afx'.

Pour faciliter la comparaison temporelle, la figure 6.8 b) est reportée sur la figure 6.10, en a). Les résultats des trois horizons futurs 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100 sont également présentés en b), c) et d), respectivement. Il apparaît de façon marquée que l’horizon 2071-2100 comporte un potentiel plus grand d’eau précipitable. Des valeurs de 60mm, 63mm, 67mm et 82mm sont obtenues pour les quatre horizons de la simulation ‘afx’, respectivement, sur la même tuile du centre du bassin. La croissance est de 5%, 12% et 37%, respectivement.

Pour les fins de maximisation, la valeur saisonnière de pw_{max} est lue sur le graphique de l’averse, semblable à celui de la figure 6.4. Si un tel graphique n’est pas disponible, la valeur peut être lue sur le graphique de la figure 6.6 ou celui de la figure 6.7, selon l’horizon. Dans tous les cas, pw_{max} est lu directement sur l’un des graphiques, au pas d’intensité de précipitation maximale.

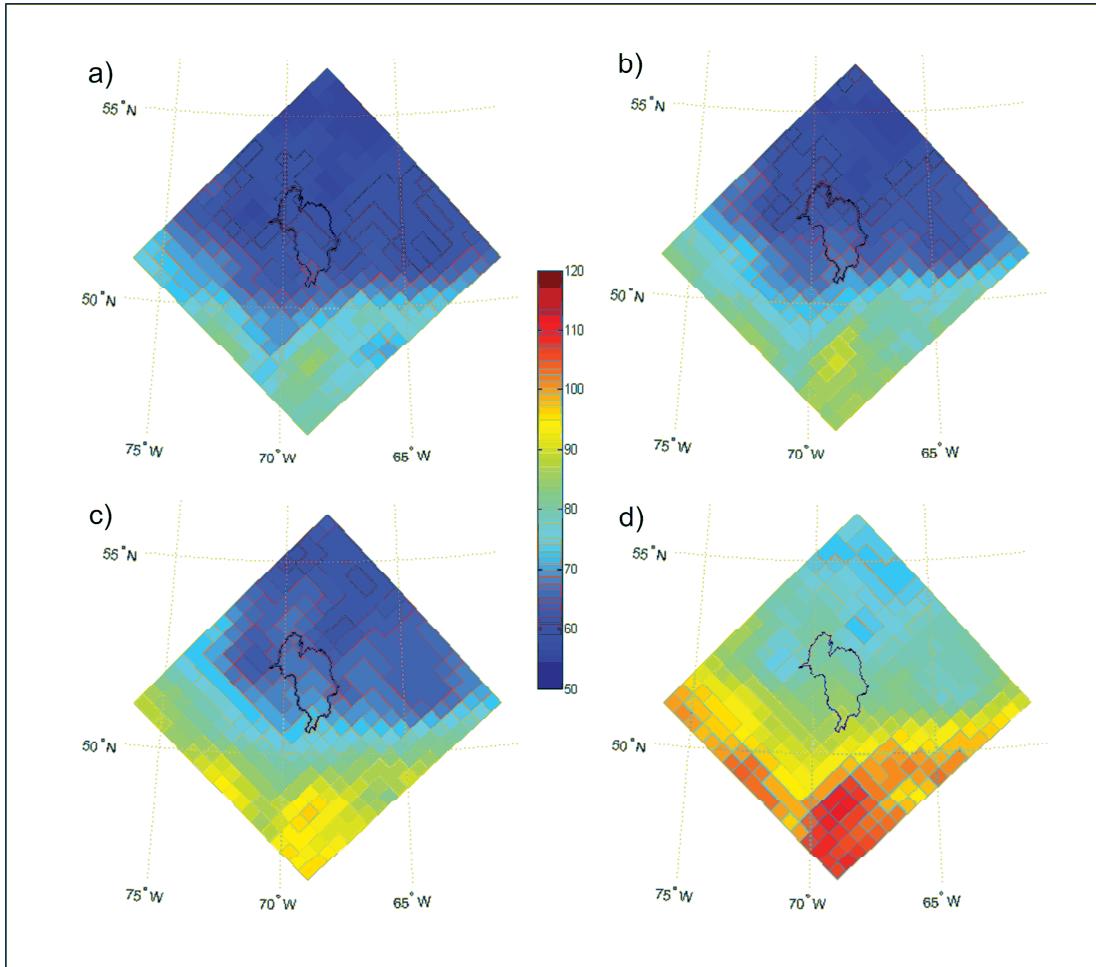


Figure 6.10 Moyenne de pw_{max} (mm) de juillet à octobre, inclusivement, en climat récent et futur selon la simulation 'afx', a) 1961-2000, b) 2011-2040, c) 2041-2070 et d) 2071-2100.

6.4 Maximisation et calcul de la PMP

Les résultats de la PMP, à l'échelle de la tuile, sont dépendants du rapport de maximisation appliqué qui est presque constant (voir tableau 6.3). Ce dernier est limité à 2, conformément aux recommandations du NWS, et pour ne pas extrapoler exagérément. Selon le tableau 6.4 et de façon générale, la PMP augmente avec la durée de l'averse.

Tableau 6.3 Rapport de maximisation selon l'horizon et la durée d'averse

Horizon		Durée d'averse	24h	48h	72h
aft	1961-2000		2	1,72	2
			2	2	1,76
afx	2011-2040		2	1,89	2
	2041-2070		2	2	2
	2071-2100		2	2	2

Pour les horizons futurs, les résultats obtenus pour la PMP de 24 heures et présentés dans le tableau 6.4 ne présentent aucune tendance particulière. Les résultats varient d'au plus 10 mm par rapport à l'horizon récent. Par contre, selon le même tableau, les PMP de 48 et 72 heures connaissent une tendance un peu plus marquée entre les horizons, avec une même tendance à la hausse de 40 et 53 mm, respectivement.

Tableau 6.4 Valeurs calculées de précipitation maximisée (mm), selon l'horizon et la durée d'averse

Horizon		Durée d'averse	24h	48h	72h
aft	1961-2000		135,2	189,4	201,0
			144,5	171,2	188,3
afx	2011-2040		134,9	210,8	208,7
	2041-2070		154,7	196,5	241,5
	2071-2100		143,0	195,9	216,3

CHAPITRE 7

MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DE LA CMP

Ce chapitre décrit les résultats des différentes étapes de la modélisation de la CMP. En premier lieu, les résultats du facteur de réduction par abattement est présenté dans la section 7.1. Puis, les résultats des différentes méthodes de hyéogrammes sont présentés dans la section 7.2. Pour terminer, la section 7.3 expose les différents résultats de la modélisation hydrologique, à proprement parler.

7.1 Coefficient d'abattement

Le tableau 7.1 fait état des coefficients d'abattement moyens calculés selon l'approche décrite à la section 4.1 pour les différents horizons et les différentes durées d'averse. Comme il n'y a aucune analyse de superficie de tempête, le coefficient d'abattement a été calculé en incluant possiblement des tempêtes dont la superficie est inférieure à celle du bassin versant. Par conséquent, il est probable que le coefficient d'abattement calculé impose une réduction trop forte de la PMP. Dans ce cas, les résultats de la PMP à l'échelle du bassin et de la CMP pourraient être sous-estimés.

Tableau 7.1 Coefficient d'abattement moyen, selon l'horizon et la durée d'averse

Horizon \ Durée d'averse		24h	48h	72h
aft	1961-2000	0,874	0,874	0,879
afx	2011-2040	0,886	0,893	0,888
	2041-2070	0,878	0,882	0,878
	2071-2100	0,875	0,884	0,877
		0,861	0,866	0,867

On peut tout de même remarquer qu'il y a une légère progression à la baisse dans le temps. Étant donné le nombre important d'événements (voir le tableau 6.1) sur lequel ce calcul se base, un test statistique est réalisé pour déterminer si la variabilité des résultats est négligeable. La distribution des séries de coefficient d'abattement sur l'ensemble des averses ne suit pas une loi normale. Le test non-paramétrique de Wilcoxon confirme que les séries sont différentes à un niveau de risque de 5%. La baisse remarquée est statistiquement significative et peut atteindre 3%.

Tableau 7.2 Valeurs de PMP à l'échelle du bassin (mm),
selon l'horizon et la durée d'averse

Horizon		Durée d'averse	24h	48h	72h
aft	1961-2000	118,2	165,5	175,9	
		128,0	152,8	166,9	
	2011-2040	117,8	185,5	182,2	
		134,4	173,6	212,3	
	2071-2100	122,9	169,7	187,7	

Cet écart sur le coefficient d'abattement se transpose sur la PMP à l'échelle du bassin (voir tableau 7.2). Par exemple, à l'échelle de la tuile et sous les horizons 2041-2070 et 2071-2100, les PMP de 48 heures présentent 0,5 mm d'écart (tableau 6.4). À l'échelle du bassin, cette différence est d'environ 4 mm (tableau 7.2).

7.2 Hyéogramme

Les hyéogrammes des différentes méthodes issus de l'ensemble des averses se distinguent principalement par la pointe d'averse. Plus particulièrement, la distinction apparaît par son intensité et son positionnement dans le hyéogramme.

Les figures 7.1 et 7.2 affichent des hyéogrammes de durée de 72 heures, pour la simulation ‘aft’; l’un au pas de temps de 6h, l’autre au pas de temps journalier. Il ont été générés avec l’aide des hyéogrammes cumulatifs de la figure 4.3. Les hyéogrammes correspondants pour la durée de 48 heures sont présentés aux figures 7.3 et 7.4. D’une courbe à l’autre, sur une même figure, le volume total d’averse est inchangé, mais la répartition temporelle est différente, ce qui influence la réponse hydrologique du bassin.

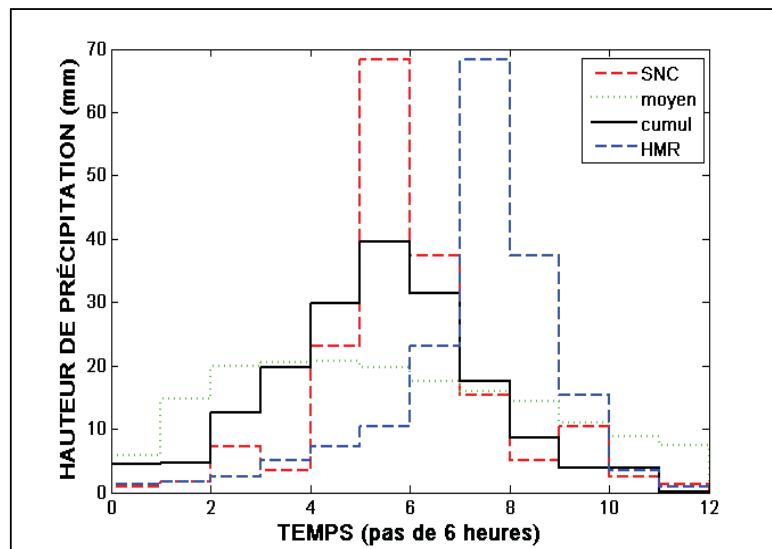


Figure 7.1 Hyéogramme au pas de 6h de la PMP de 72h, simulation ‘aft’.

Cette forme graphique met en évidence le fait que les hyéogrammes calculés selon les méthodes ‘moyen’ (ligne pointillée verte) et ‘cumul’ (ligne pleine noire) sont lissés par rapport aux hyéogrammes ‘SNC’ (ligne tiretée rouge) et ‘HMR’ (ligne tiretée bleue).

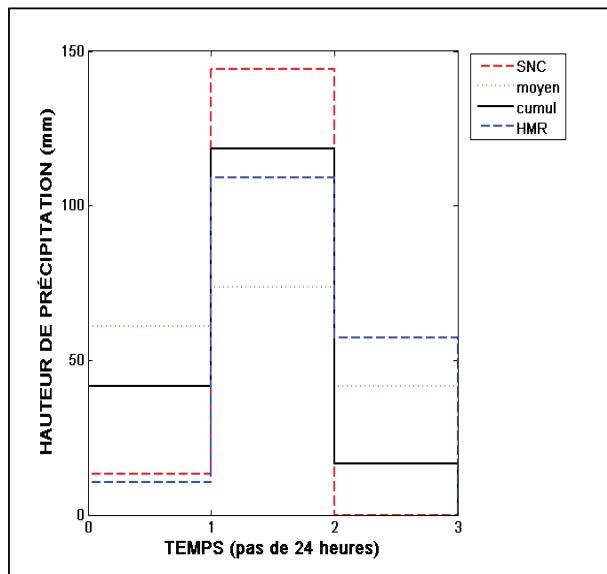


Figure 7.2 Hyégramme journalier de la PMP 72h, simulation 'aft'.

Selon les figures 7.1 et 7.3, les pointes d'averse de la PMP de 48h et de la PMP de 72h n'ont pas lieu au même moment à partir du début d'averse. Deux facteurs expliquent ce fait. D'une part, ce décalage est le résultat de la durée d'averse et d'autre part, il est fonction de l'application de la méthode de l'OMM. Pour la PMP de 48h, le pic d'averse selon 'SNC' est devancé de six heures, par rapport à celui selon 'HMR'. Pour la PMP de 72h, le pic d'averse selon 'SNC' est devancé de douze heures, par rapport à celui selon 'HMR'. Au final, les hyéogrammes 'SNC' et 'HMR' devancent de 12 et 18 heures, respectivement, le pic d'averse de la PMP de 48h, par rapport à celle de 72h.

Les figures 7.2 et 7.4 démontrent l'effet de la conversion du hyéogramme de 6h en hyéogramme journalier. Sur une averse de 72h, la journée de plus forte intensité est la deuxième et ce, pour toutes les méthodes. Par contre, sur une averse de 48h, seule la méthode 'HMR' conserve cette deuxième journée comme étant celle qui reçoit la plus forte précipitation (voir figure 7.4). La première journée de toutes les autres méthodes reçoit la plus forte précipitation.

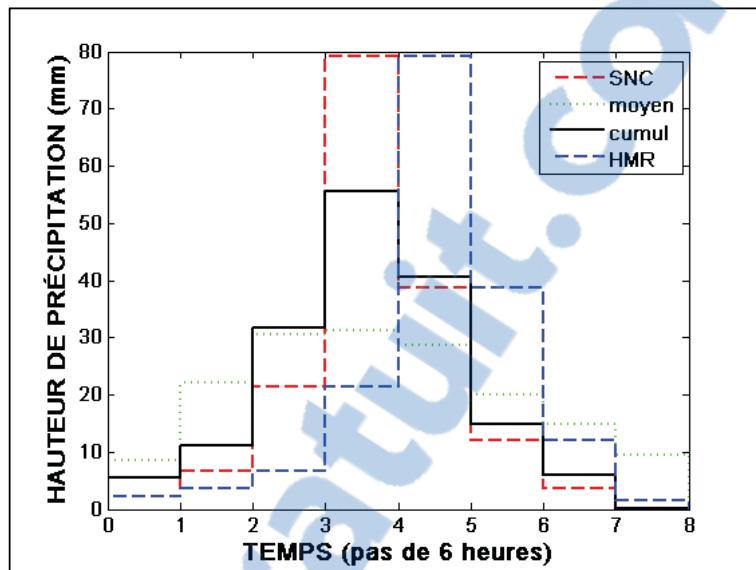


Figure 7.3 Hyéogramme au pas de 6h de la PMP de 48h, simulation 'aft'.

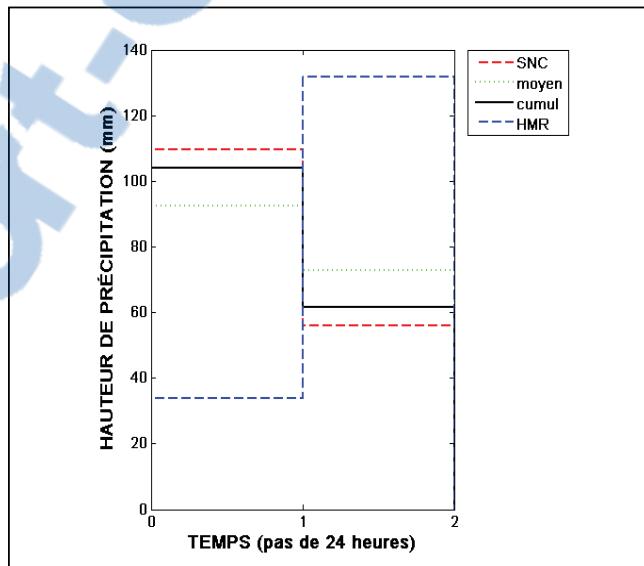


Figure 7.4 Hyéogramme journalier de la PMP 48h, simulation 'aft'.

7.3 Calcul de la CMP

Les résultats de la modélisation hydrologique des PMP de 24 à 72 heures de la simulation ‘aft’, avec insertion aléatoire de la PMP, sont d’abord présentés aux figures 7.5 à 7.7 pour les différents modèles de hyéogrammes. Ces courbes de la simulation ‘aft’ (voir figure 7.5 à figure 7.7) sont qualitativement représentatives de celles de l’ensemble des horizons¹⁰. Sur ces figures, le graphique de gauche affiche les courbes de fréquence en fonction du débit. On peut visuellement saisir que la cloche de distribution varie d’un modèle de hyéogramme à l’autre, par exemple sur la figure 7.7. Quant au graphique de droite, il informe de la probabilité de non-dépassement des débits. L’interprétation de cette courbe est la suivante. Advenant une averse de l’ampleur de la PMP estimée (voir le tableau 6.4), la probabilité que le débit à l’exutoire du bassin versant soit inférieur au débit simulé se lit sur la courbe cumulative.

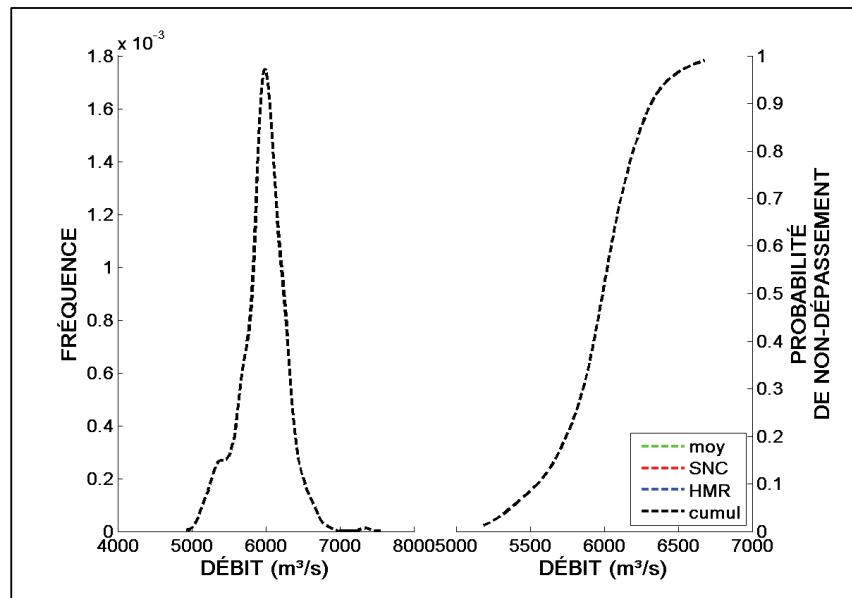


Figure 7.5 Densité de probabilité des débits selon le mode aléatoire d’insertion de la PMP de 24h, simulation ‘aft’.

¹⁰ L’ensemble des courbes de simulation ‘aft’ et ‘afx’ sont présentées à l’annexe IV.

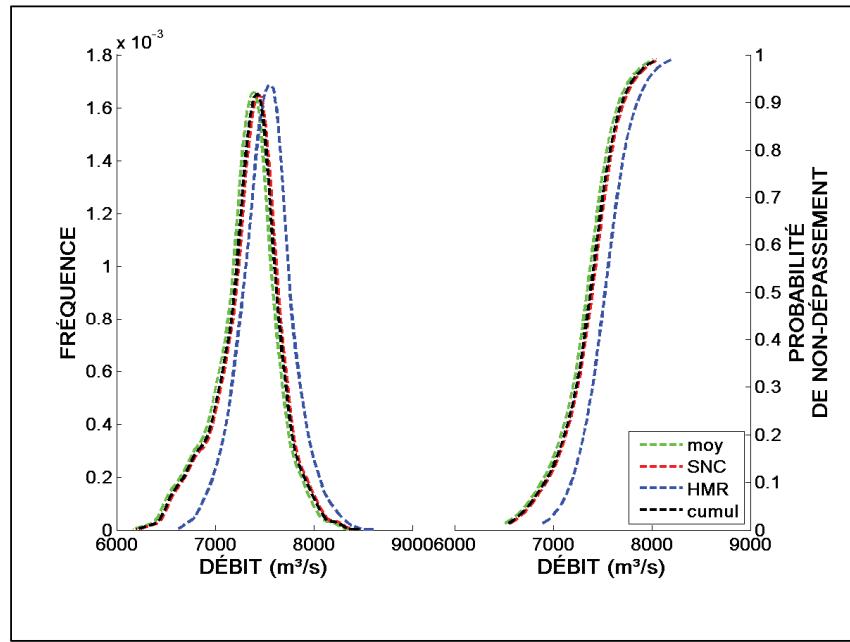


Figure 7.6 Densité de probabilité des débits selon le mode aléatoire d'insertion de la PMP de 48h, simulation ‘aft’.

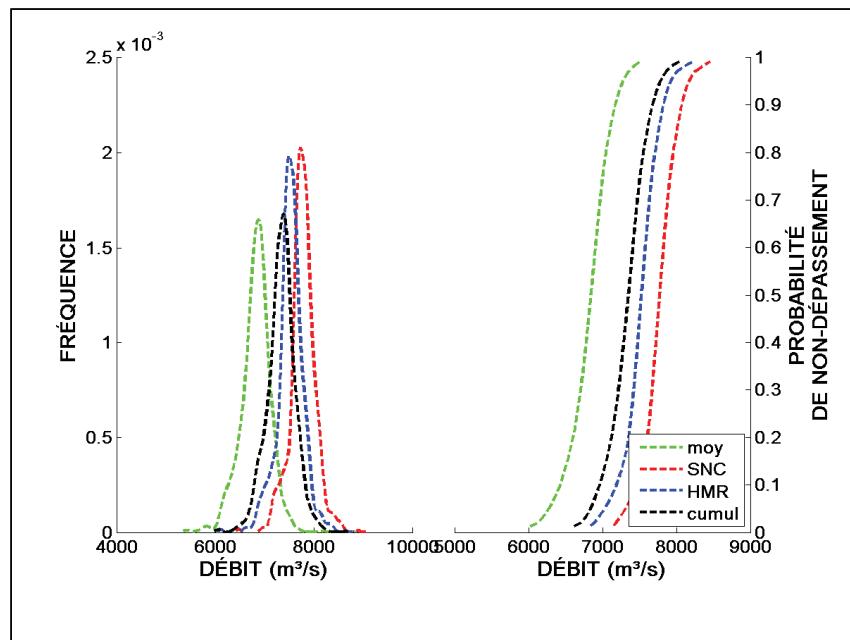


Figure 7.7 Densité de probabilité des débits selon le mode aléatoire d'insertion de la PMP de 72h, simulation ‘aft’.

Quatre constatations peuvent être faites. Premièrement, les courbes de densité de probabilité des débits simulés pour une PMP de 24h se superposent parfaitement (voir figure 7.5). Ceci s'explique par le pas de temps journalier du modèle hydrologique. Deuxièmement, dans aucun cas, la méthode ‘moy’ ou la méthode ‘cumul’ n’engendre une CMP plus importante. Troisièmement, dans tous les cas, les plus forts débits de pointe des PMP de 48 heures sont simulés avec le hyéogramme ‘HMR’, pour lequel l’intensité de précipitation la plus forte est au 5^e pas de six heures (de la 25^e à la 30^e heure de l’averse). C’est HMR qui a la pointe de l’hyéogramme journalier la plus forte sur 48 heures. De même, les plus forts débits de pointe des PMP de 72 heures sont simulés selon le hyéogramme ‘SNC’ et l’intensité de précipitation la plus forte est au 6^e pas de six heures (de la 31^e à la 36^e heure de l’averse). C’est SNC qui a la pointe de l’hyéogramme journalier la plus forte sur 72 heures. Pour compléter, la méthode ‘moy’ offre les débits de pointe les plus faibles.

Maintenant, les débits générés par les PMP de 48 et 72 heures en climat futur sont présentés et comparés avec ceux du climat récent. Les résultats générés selon les différents hyéogrammes sont présentés aux figures 7.9 et 7.10.

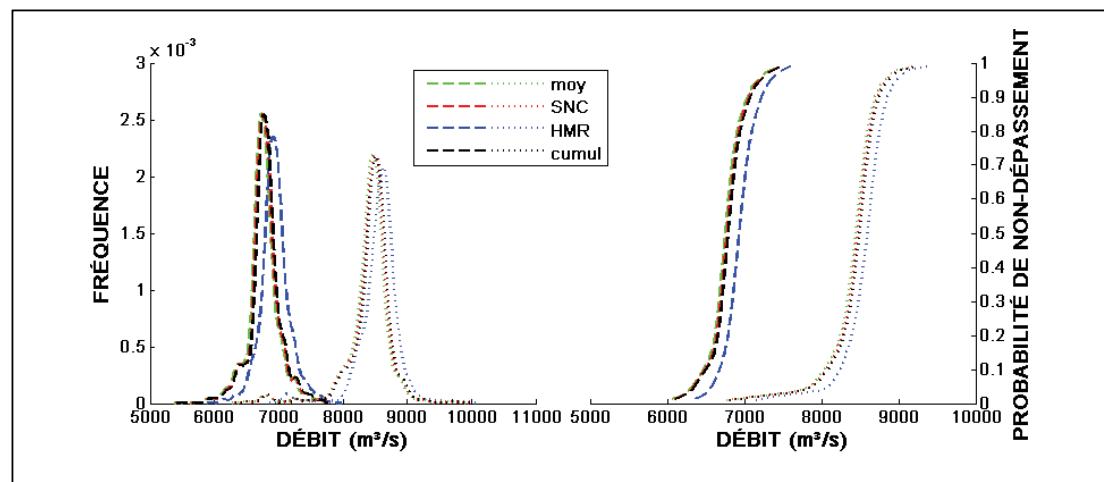


Figure 7.8 Comparaison des densités de probabilité des débits selon le mode aléatoire de la PMP de 48h de la simulation 'afx', entre l’horizon récent (1961-2000, lignes tiretées) et l’horizon futur (2011-2040, lignes pointillées).

Selon une PMP de 48 heures et une probabilité de non-dépassement de 95%, la CMP est évaluée à $7334 \text{ m}^3/\text{s}$, en climat récent, alors qu'elle est évaluée à $8974 \text{ m}^3/\text{s}$, en climat futur (figure 7.8). Ces valeurs sont lues sur la courbe la plus à droite de chaque horizon et représentent une augmentation de 22%. Pour une PMP de 72 heures et un même niveau de confiance, la CMP est évaluée à $7737 \text{ m}^3/\text{s}$ en climat récent, alors qu'elle est évaluée à $9876 \text{ m}^3/\text{s}$ en climat futur (figure 7.9). Ceci représente une augmentation de 27%.

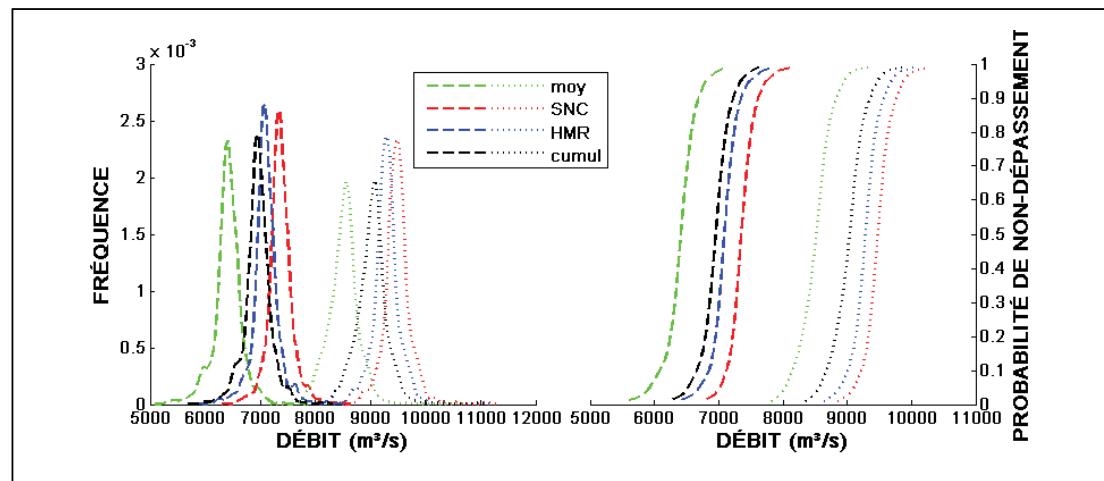


Figure 7.9 Comparaison des densités de probabilité des débits selon le mode aléatoire de la PMP de 72h de la simulation 'afx', entre l'horizon récent (1961-2000, lignes tiretées) et l'horizon futur (2041-2070, lignes pointillées).

Les résultats de la modélisation hydrologique, selon la méthode d'insertion inspirée par celle de l'OMM, sont représentés par une plage de valeurs dans le tableau 7.3. La valeur la plus petite est obtenue par insertion de la séquence de PMP (demi-PMP+PMP) en sol faiblement saturé et la valeur la plus grande, en sol fortement saturé. Ces résultats suivent la même variabilité que les résultats de la maximisation d'averses au tableau 6.4.

Tableau 7.3 Plage de valeurs pour les débits simulés (m^3/s) selon la méthode d'insertion inspirée par celle de l'OMM, pour les simulations 'aft' et 'afx' et pour les durées d'averse de 24 à 72 heures

Horizon	Durée d'averse	24h	48h	72h
aft	1961-2000	6547 - 7333	8352 - 8891	8433 - 8901
afx		7235 - 7975	7600 - 8133	7915 - 8373
	2011-2040	6802 - 7186	9633 - 10030	8859 - 9177
	2041-2070	7414 - 8315	8713 - 9393	10301 - 10784
	2071-2100	6476 - 7320	8493 - 8797	8955 - 9220

On pourrait croire que l'ampleur des débits générés varie en fonction de la PMP de l'horizon, quelque soit le mode d'insertion de la PMP. Cependant, les résultats sont plus subtils. L'exemple de la PMP de 48h, sous les horizons 2041-2070 et 2071-2100 est éloquent. En effet, dans les deux cas, la $\text{PMP}_{\text{tuile}}$ a une hauteur d'environ 196mm (voir le tableau 6.4), mais pourtant, la distribution de la CMP est significativement différente (voir le tableau 7.3). Les raisons possibles derrière ce comportement, en apparence surprenant, seront discutées au chapitre suivant.

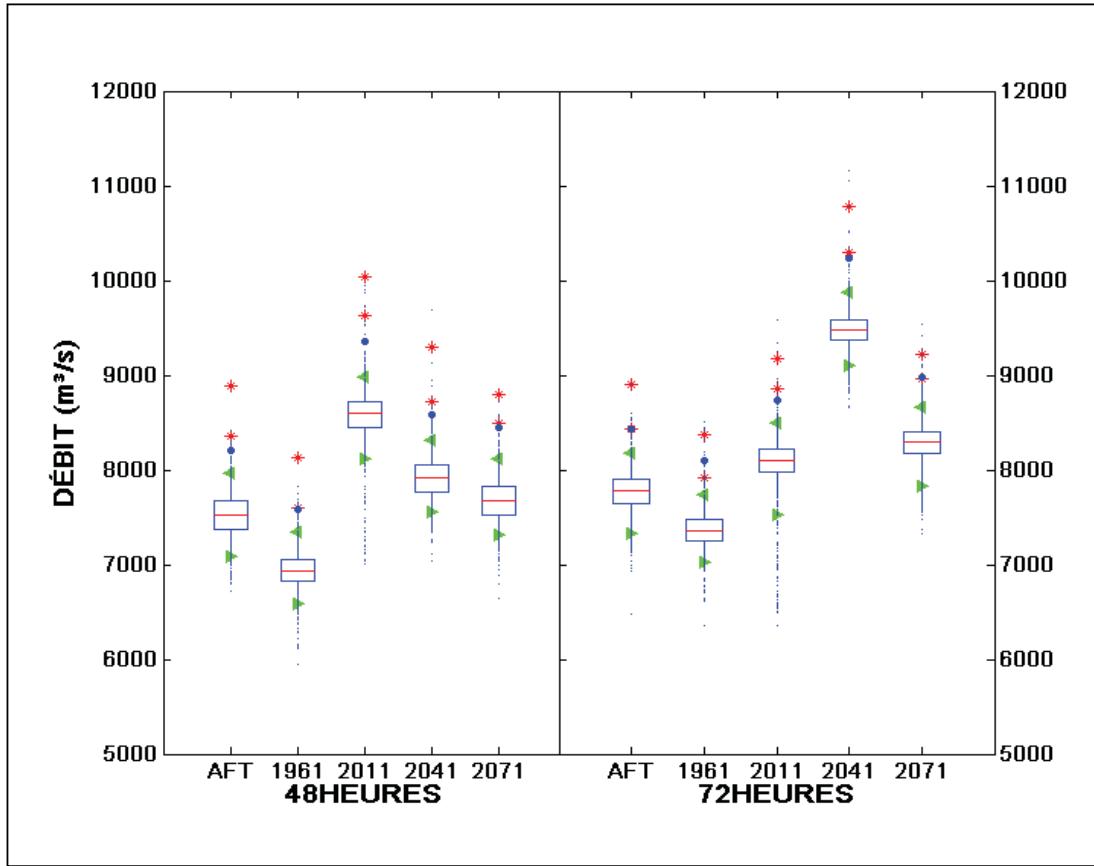


Figure 7.10 Compilation des débits de pointe pour les averses de 48 heures (à gauche) et de 72 heures (à droite).

La figure 7.10 regroupe une partie des résultats précédents, c'est-à-dire les débits de pointe générés par les PMP de 48 et de 72 heures, pour les deux modes d'insertion. Seule la série dont la moyenne est la plus élevée, c'est-à-dire dont la cloche de distribution est la plus à droite (voir figure 7.7, par exemple), est représentée. Les séries de débits générés aléatoirement sont représentées par les boîtes à moustaches conventionnelles, où la boîte inclut les 25 et 75 centiles. Les centiles 5, 95 et 99 sont ajoutés. La ligne rouge à l'intérieur de la boîte représente la médiane de la distribution. Les centiles 5 et 95 sont indiqués par des triangles dirigés vers la droite et la gauche, respectivement. Le centile 99 est identifié par un cercle bleu. De plus, les débits obtenus selon le mode d'insertion inspiré par l'OMM sont représentés sur la figure 7.10 par des astérisques rouges.

On note que les résultats générés par la PMP de 24 heures ne sont pas illustrés sur la figure 7.10. Selon les figures 7.5 à 7.7, les débits générés par cette durée d'averse sont en-deçà de ceux générés par une durée supérieure. Par définition, ils ne constituent pas une CMP.

Sur tous les horizons, tant pour les averses de 48 et de 72 heures, les débits simulés selon le mode d'insertion inspiré de l'OMM sont supérieurs au 95^e centile de la distribution des débits simulés selon le mode d'insertion aléatoire de la PMP. En quelques cas seulement, la plage inférieure se compare au 99^e centile.

CHAPITRE 8

DISCUSSION

Tout au long du processus d'évaluation de la PMP et de la CMP, plusieurs éléments méritent une attention particulière. Mais avant d'émettre quelque commentaire que ce soit quant aux résultats, il est important de rappeler que ceux-ci sont teintés des choix méthodologiques. Entre autres, la PMP est évaluée pour le bassin versant de Manic5, à l'aide des données de sortie des simulations ‘aft’ et ‘afx’ issues de la version 4.2.3 du modèle MRCC (modèle régional canadien du climat).

Les résultats de la PMP sont dépendants du découpage temporel des données du MRCC. Chaque période de 30 ans constitue une banque de données en elle-même, ce qui va à l'encontre du principe conventionnel selon lequel la série d'observations la plus longue est prisée. Toutefois, les résultats pour une série complète, jusqu'à 2100, peuvent être tirés d'une analyse globale des résultats sous les différents horizons. Ils sont également conditionnés par les biais propres à ces données simulées, comparativement aux données observées. Aucune correction de biais n'a été apportée.

8.1 Discussion sur la PMP

Sous la simulation ‘afx’, l'augmentation du nombre de tempêtes par décennie est de 45% (voir tableau 6.1) pour le climat de l'horizon le plus lointain (2071-2100), par rapport au climat récent, et l'augmentation du nombre d'averses de 24 heures est de 94% (voir tableau 6.2). Quant aux averses de 48 et 72 heures, la comparaison des mêmes horizons permet de constater que leur augmentation est moins forte, soit de 54% et 37%, respectivement (voir tableau 6.2). Déjà les courbes IDF des averses de 24 heures et moins ont fait l'objet d'une étude (Mailhot *et al.*, 2007a). Une étude semblable qui visera les averses de 48 et 72 heures pourrait déterminer si ces résultats demeurent dans le même ordre de grandeur ou s'il y a lieu d'apporter des corrections aux courbes de ces durées d'averse à l'aide d'un facteur ARF (aerial reduction factor). Ce facteur établit la relation entre une précipitation simulée sur une

tuile du MRCC par rapport à une précipitation enregistrée à une station, en fonction de la durée d'averse.

La décision d'accepter un seuil d'humidité relative à 1% a un impact déterminant sur le rapport de maximisation. Le ratio pw_{max}/pw_{averse} calculé est souvent supérieur à la limite recommandée (voir la section 3.4 et le tableau 6.3). Dans la majorité des cas, il aurait été conservateur d'accepter le ratio calculé comme étant le rapport de maximisation. Il est possible qu'une modification du seuil d'humidité relative produise un rapport de maximisation à l'intérieur de la limite recommandée et préserve l'équilibre dynamique du système. Selon ce seuil de 1%, en date du 1^{er} juillet sous le climat récent, la figure 6.6 affiche des valeurs maximales saisonnières de 80,9 et 64,7 mm d'eau précipitable, pour les simulations ‘aft’ et ‘afx’, respectivement. Il y a donc un écart possible de -20% pour cette période de l'année. Par contre, en date du 1^{er} octobre, on peut lire sur la même figure des valeurs de 55,2 et 62,3 mm d'eau précipitable. Dans ce cas, l'écart possible est de 13%. Ces différences sont dues au pilote utilisé pour chacune des simulations ‘aft’ et ‘aft’, ERA-40 et CGCM3, respectivement, qui font en sorte que le climat simulé à l'échelle régionale par le MRCC est différent.

Il a été mentionné que les variables d'humidité spécifique et relative sont des variables instantanées sur le dernier pas de calcul (15 minutes) de la fréquence d'archivage. L'incidence d'utiliser ces valeurs instantanées comparativement aux valeurs maximales sur le pas d'archivage (6 heures) n'est pas étudiée, elle ne fait pas partie des objectifs de recherche. Cependant, il faut considérer que pw_{averse} est une valeur maximale sur la période d'averse, et pw_{max} est également une valeur maximale d'une fenêtre mobile d'une durée de 30 jours sur les valeurs maximales annuelles de l'horizon. Dans ce cas, pw_{averse} et pw_{max} , peuvent être sous-estimés. Toutefois, le rapport de maximisation qui en découle est le quotient des deux quantités d'eau précipitable. L'erreur qui pourrait être induite reste à analyser.

Selon la figure 6.6, deux éléments pourraient expliquer l'écart entre les simulations ‘aft’ et ‘afx’ : une variabilité naturelle ou un biais. Les figures 6.8 et 6.9 illustrent l'écart dans les

valeurs de pw_{max} . Si ces figures illustraient les valeurs pour une date spécifique de l'année, il y aurait lieu de croire à une variabilité naturelle. Cependant, il s'agit des valeurs moyennes sur 40 ans, entre juillet et octobre, inclusivement. Par conséquent, un biais est présent entre les simulations ‘aft’ et ‘afx’.

La méthode de maximisation proposée est à parfaire, puisqu'en majorité, la limite de 2,0 (SNC-Lavalin, 2003) est imposée dans la plupart des cas (voir tableau 6.3). Par conséquent, tel qu'il est défini, le rapport de maximisation n'a donc pas une grande influence dans le résultat de la PMP, en ce sens que la multiplication de la hauteur de précipitation par une constante de 2 aurait fourni un résultat semblable pour la PMP. Avant de remettre en question la recommandation du NWS, le prochain paragraphe suggère de reviser certains aspects de la méthode proposée.

Dans le cadre de la définition actuelle, plusieurs modifications permettraient de préciser l'évaluation du rapport de maximisation. Une première modification serait de revoir à la hausse le seuil d'humidité relative. À titre d'exemple, la figure 6.5 fournit les valeurs de pw_{averse} selon un seuil de 50% sur tous les niveaux de pression. Une seconde modification tiendrait compte uniquement des niveaux de pression qui influencent le processus de précipitation dans l'évaluation de pw_{averse} et pw_{max} permettrait également de mieux circonscrire le rapport de maximisation à l'intérieur de limites raisonnables. Quant à une troisième modification, elle nécessite une analyse plus approfondie des tempêtes, en regard de l'aire de l'averse. En effet, la valeur de pw_{averse} recherchée selon la méthode de l'OMM n'est pas nécessairement sur la même tuile que l'averse maximisée et elle dépend de la provenance de la source d'humidité et de la direction et de la force des vents. Il est possible que pour la valeur de pw_{max} , il soit plus approprié d'employer la valeur associée à la tempête dont l'averse provient. Enfin, pour les deux simulations du MRCC utilisées, les données verticales sont disponibles pour 18 niveaux de pression. Par contre, elles sont été générées en tenant compte de 29 niveaux. Il serait intéressant de refaire l'évaluation des quantités d'eau précipitable sur la base des données verticales simulées.

Quoiqu'il en soit, la relation entre l'eau précipitable de l'averse et l'eau précipitable maximale est complexe. Il n'est pas simple d'établir quelle serait une limite acceptable. Les météorologues (ou autre autorité en la matière) sont invités à étudier le concept de la limite du rapport de maximisation et à proposer des balises d'acceptation ou de rejet du rapport de maximisation.

De façon générale, à long terme, une tendance semble se détacher des présents résultats de la PMP. Comparativement au climat passé récent, le résultat global des horizons futurs de chaque durée d'averse présente une PMP supérieure. Sans pour autant tirer des conclusions définitives sur l'existence d'une véritable tendance dans l'évolution de la PMP, ce travail permet toutefois de présenter une nouvelle approche physique d'estimation de l'eau précipitable. Celle-ci ouvre ainsi la voie à la présentation d'une tout aussi nouvelle approche physique d'estimation de la PMP. Son application, à l'aide des données de sortie de plusieurs simulations climatiques, pourrait confirmer l'existence d'une tendance.

Jusqu'ici, la PMP a été estimée à l'échelle de la tuile et elle doit être rapportée à l'échelle du bassin versant avant faire l'objet d'une étude hydrologique par modélisation de la CMP. Pour éviter cette démarche, une étude future pourrait considérer d'estimer directement la PMP à l'échelle du bassin versant. La sélection d'averse serait basée sur la recherche du plus grand volume de précipitation sur un nombre de tuiles équivalent à la superficie du bassin, toute proportion gardée pour une même tempête.

8.2 Discussion sur la CMP

Les résultats de la CMP sont dépendants de plusieurs choix méthodologiques. Parmi ceux-ci, l'impact de certains de ces choix ne peuvent être quantifiés, comme celui d'utiliser un modèle hydrologique global journalier et celui de faire le calibrage sur période été-automne seulement. Sur la figure 7.5, le fait que les courbes qui proviennent des quatre différents hyéogrammes soient superposées démontre cependant que l'utilisation d'un modèle hydrologique journalier n'est pas appropriée. En effet, la réponse du bassin à l'échelle

temporelle des différents hyéogrammes reste inconnue, puisque ces données sont cumulées au pas journalier, avec une valeur totale identique. Il aurait fallu utiliser un modèle qui travaille à un pas de temps équivalent à celui des données pour saisir plus finement la réaction du bassin. Le résultat final aurait une meilleure cohérence avec les données du MRCC.

Par contre, les conséquences du choix du mode d'insertion de la PMP, de la méthode d'abattement et du hyéogramme sont analysées dans les paragraphes qui suivent.

Le mode d'insertion de la PMP préconisé par l'OMM, sans égard aux conditions initiales de sol, est discuté ici. Le fait d'insérer une demi-PMP avant la PMP (OMM, 1994), laisse croire que les conditions de sol et de ruissellement, initiales à la PMP, sont semblables, peu importe le jour d'insertion. Il existe une corrélation entre l'humidité initiale du sol et le débit de pointe de la crue. Le coefficient de corrélation est de 88%. La figure 7.10 démontre des différences marquées sur les débits, selon que la séquence demiPMP + PMP est insérée au moment où le sol est faiblement saturé ou lorsque le sol est à saturation élevée. En effet, il existe un écart de 3 à 7% entre les débits correspondants. L'influence de la variation de l'humidité du sol n'est donc pas négligeable. En fonction du niveau de confiance à rencontrer, la CMP évaluée selon ce mode d'insertion pourrait être surestimée jusqu'à 10% selon une probabilité de non-dépassement de 99% (points bleus de la figure 7.10). La surestimation pourrait atteindre plus de 13% selon une probabilité de non-dépassement de 95% (triangles orientés vers la gauche de la figure 7.10).

La corrélation établie précédemment entre l'humidité du sol et le débit permet également d'expliquer les résultats de la simulation HSAMI de la PMP de 48 heures, sous les horizons 2041-2070 et 2071-2100, insérée selon le mode aléatoire. En effet, les résultats de la PMP, à l'échelle de la tuile, sont identiques, la PMP_{2041} est la même que la PMP_{2071} , soit de 196mm (tableau 6.4). On pourrait s'attendre à ce que les débits générés soient similaires. Pourtant, les débits de pointe selon PMP_{2041} sont, en moyenne, 3% plus élevés que ceux en vertu de PMP_{2071} . Un test de Chi-carré révèle que les deux séries de 1000 débits ne suivent pas une

loi normale. Le test non-paramétrique de Wilcoxon confirme que les deux séries de débit ne sont statistiquement pas identiques, avec un niveau de risque de 5%. La différence de 3% de la moyenne est donc statistiquement significative.

Pour expliquer cette différence, les mêmes tests statistiques ont été conduits sur les valeurs d'humidité du sol des deux horizons. Le test de Chi-carré n'est pas concluant quant à la distribution des données. Le test de Wilcoxon confirme que les deux séries d'humidité ne sont statistiquement pas identiques, avec un niveau de risque de 5%. Il existe bien une forte corrélation entre l'humidité du sol et le débit de pointe. La variabilité temporelle de l'humidité du sol n'explique toutefois pas celle du débit de pointe. Deux séries de simulations ont été réalisées sur les horizons 2041 et 2071, avec une PMP identique à l'échelle du bassin. Les séries de débit de pointe correspondantes présentent un écart statistiquement significatif de 0,3%.

Deux autres séries de simulations ont été réalisées sur l'ensemble des horizons à partir d'une PMP de même intensité, à l'échelle du bassin. Une première série fournit des débits générés par une PMP de 169 mm et une seconde, par une PMP de 174 mm. Un écart de 5mm sur la PMP explique un écart de 3% sur la moyenne des débits. Le tableau 7.2 confirme un écart de 4 mm entre les PMP₂₀₄₁ et PMP₂₀₇₁, à l'échelle du bassin. Similairement, un écart de 30 mm explique un écart environ 20% sur la CMP. La précision dans l'estimation de la PMP sur le bassin est donc prédominante par rapport à la variabilité de l'humidité du sol dans l'estimation de la CMP.

Maintenant, l'horizon 2011-2040 mérite une attention particulière. D'une part, la PMP de 48 h est légèrement supérieure à celle de 72 heures. Deux raisons peuvent expliquer cette situation. La première concerne la relativement courte période de l'horizon (30 ans). La seconde est que le partage des averses en durées distinctes n'inclut pas les averses de 48 heures dans la série d'averses de 72 heures. Ce choix méthodologique va à l'encontre du principe préconisé par l'OMM qui vise à ce que les PMP de durées inférieures soient comprises à l'intérieur de la PMP de 72 h. D'autre part, nonobstant ce qui précède, il est important de se rappeler que les débits sont générés par des averses réparties selon deux

différents hyéogrammes. Le hyéogramme de la PMP de 48 heures est celui de la méthode ‘HMR’ et situe la pointe d’averse à la cinquième période de six heures, alors que le hyéogramme de la PMP de 72 heures est celui de la méthode ‘SNC’ et il situe la pointe d’averse à la sixième période de six heures.

En fonction de la durée d’averse produisant la PMP sur un bassin particulier, le débit de pointe pourrait être sous-estimé d’environ 4%. Dans ce cas-ci, une PMP de 48 heures évaluée selon le hyéogramme ‘SNC’ place la pointe d’averse plus tôt (au 4^e pas) et inversement, une PMP de 72 heures évaluée selon le hyéogramme ‘HMR’ place la pointe plus tard (au 9^e pas). Bref, l’application pure et simple d’un hyéogramme particulier n’est pas recommandée. Il est plutôt suggéré, dans un premier temps, d’évaluer adéquatement le temps de concentration du bassin versant, puis, de procéder à une analyse de sensibilité pour déterminer à quel moment fixer la portion maximale de l’averse pour qu’elle produise le débit de pointe le plus fort. Pour terminer, le hyéogramme complet est construit en plaçant, de part et d’autre, les fractions d’averse selon une intensité décroissante, en s’inspirant de la méthode préconisée par HMR ou SNC.

Parmi les paramètres qui interviennent dans l’estimation de la CMP, le mode d’insertion de la PMP est celui qui influence le plus le résultat. Puis, chacun des aspects de la définition d’une averse a un effet distinct sur la CMP. Ce qui signifie que les effets de l’intensité de la PMP à l’échelle de la tuile, sa réduction à l’échelle du bassin (abattement) et la répartition temporelle peuvent être cumulatifs ou s’annuler. L’estimation adéquate de chacun des paramètres améliorerait le niveau de confiance dans le résultat global.

Dans l’ensemble, pour le bassin versant de Manic5, les résultats de la CMP obtenus à l’aide des données de sortie du MRCC en climat projeté sont supérieurs à ceux de la CMP en climat récent. Sous la simulation ‘afx’ 1961-2000, la PMP de 72 heures génère une CMP de 7737m³/s, selon un niveau de confiance de 95%, tandis que la même simulation, en climat projeté, prévoit que la CMP atteindrait 9876m³/s (voir figure 7.10). C’est une augmentation

marquée de plus de 27%. Cette comparaison est faite entre les horizons de la simulation seulement. Elle est significative, à condition que les séries comparées soient représentatives.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce travail a porté sur l'élaboration d'une nouvelle méthode d'estimation d'une PMP et qui pourrait être accessible, en vue de l'application du Règlement sur la sécurité des barrages. Il est une base de référence pour les travaux futurs. L'estimation de la PMP, à l'aide des données de sortie d'un modèle régional de climat, le MRCC (modèle régional canadien du climat), permet d'obtenir des résultats sous un climat récent, mais également d'estimer une PMP sous un climat projeté. Il n'est certes pas question de concevoir des ouvrages sur la base des estimations incluses dans ce rapport avant que la robustesse de la méthode soit validée. Toutefois, la cohérence des processus physiques du modèle régional permet de poser l'hypothèse que les sorties du MRCC sous le climat projeté présentent un portrait possible de ce que pourrait être le climat futur. Assurément, seul l'avenir fournira des données observées sous ces horizons futurs, mais dans un processus prévisionnel, les données du MRCC sont les seules qui soient actuellement disponibles pour représenter cette période.

Sommairement, la méthologie de l'estimation de la PMP est semblable à celle qui a été élaborée par l'OMM. Elle se distingue particulièrement par la méthode d'évaluation des quantités d'eau précipitable. Cette méthode consiste à extraire les averses importantes des séries météorologiques issues du MRCC et à les maximiser à l'aide d'un rapport de maximisation dérivé du rapport entre le maximum d'eau précipitable qui pourrait être contenu dans l'atmosphère et la quantité d'eau précipitable durant l'averse. Les valeurs d'eau précipitable sont estimées par les variables d'humidité spécifique et relative des données de sortie du MRCC. Puis, l'estimation de la CMP consiste, d'une part, à insérer de façon aléatoire, et un certain nombre de fois, la PMP dans une série météorologique du MRCC. Ainsi, une grande variété de conditions de débit en rivière et de saturation du sol initiales à la PMP sont couvertes par cette méthode. Une courbe de fréquence est établie à partir de cette série de débits de pointe ainsi obtenus. D'autre part, une CMP est estimée par l'insertion de la PMP précédée d'une demi-PMP. La probabilité de non-dépassement de ce dernier résultat est évaluée en le comparant à la courbe de fréquence obtenue précédemment.

Afin de faciliter l'application à d'autres bassins versants, l'approche a été codée à l'aide d'un langage informatique sous forme de scripts, en fonction du format des données du MRCC fournies par Ouranos. Ce format n'est pas standardisé, il est défini en fonction du domaine spatial et temporel, ainsi que de la capacité de transfert des fichiers ainsi créés.

Les résultats présentés sont empreints des incertitudes intrinsèques aux résultats issus du MRCC auxquelles s'ajoutent celles associées au pilote utilisé et celles associées aux méthodes d'estimation de la PMP et de modélisation hydrologique de la CMP. Il est tout de même intéressant de noter que le taux de saturation du sol varie d'un horizon à l'autre. Certes, il influence la CMP, mais celle-ci est plus sensible à la variation d'intensité de la PMP à l'échelle du bassin. C'est donc dire que la précision de l'estimation de la PMP et du coefficient d'abattement nécessite une attention particulière.

À la lumière du travail réalisé dans le cadre de la présente maîtrise, différents aspects méritent d'être explorés ou approfondis. Tout d'abord, en ce qui concerne l'estimation de la PMP, l'emploi de différentes simulations du MRCC, de même que différents modèles régionaux de climat, permettrait de définir une plage plus complète d'incertitudes associées aux modèles atmosphériques et aux scénarios d'émission de GES (SRES). Il existe une telle panoplie de simulations climatiques et chacune peut varier selon la résolution spatiale, le modèle de circulation générale qui le pilote et la période couverte. Toutefois, il est recommandé que le modèle régional soit guidé par un pilote spectral. Lorsqu'une tempête franchit le domaine du modèle régional, ce pilote lui impose une trajectoire similaire à celle qui a été générée dans le modèle de circulation générale.

La méthodologie proposée repose sur l'hypothèse que l'eau précipitable d'une tuile est représentative de celle de la tempête. Il y aurait lieu de valider cette hypothèse. De plus, une nouvelle étude d'analyse de sensibilité du seuil d'humidité relative ou bien l'application d'une ou plusieurs recommandations émises au chapitre précédent, produirait des résultats différents certes, mais également une estimation plus fine du rapport de maximisation.

En ce qui concerne la modélisation hydrologique, la réduction du pas de temps de calcul de la CMP, par l'emploi de la fonction de calcul de la CMP de HSAMI, par exemple, ou de tout autre modèle dont la simulation se fait à un tel pas de temps, permettrait d'obtenir une estimation plus fine de la CMP. Un pas de temps de six heures conviendrait aux données du MRCC. D'une part, il permettrait d'établir le temps de concentration sur le bassin et par le fait même, la durée de la PMP. Et d'autre part, il permettrait de faire l'analyse de sensibilité du hyéogramme synthétique. Ce dernier pourrait être différent d'un bassin à l'autre.

L'emploi concourrant de plusieurs modèles hydrologiques permettrait de quantifier une plage d'incertitudes associées à ce type de modèle. De façon plus extensive, un modèle hydrologique distribué, tel que Hydrotel ou Watflood, permettrait de suivre la trajectoire de la tempête.

Et pour terminer, ce travail a porté uniquement sur l'estimation de la PMP estivale. La réalité du territoire septentrional requiert de considérer la fonte de la neige, puisque la crue printanière est habituellement la plus importante. Une telle étude pourrait s'inspirer des travaux de Debs (1995) qui a défini les composantes de la CMP printanière.

En définitive, ce qu'il convient de retenir, c'est que ce travail est exploratoire. Certains modèles régionaux de climat ont déjà produit des données de sortie à une résolution spatiale de 15 km. À cette échelle plus fine, ces modèles seraient plus sensibles à certaines perturbations atmosphériques à caractère local. Le même exercice du calcul de la PMP et de la CMP pourrait être repris en tenant compte de ces nouvelles données.

ANNEXE I

HYÉTOGRAMMES UNITAIRES CUMULATIFS

Cet annexe présente les hyéogrammes unitaires cumulatifs pour l'horizon récent 1961-2000 (simulations ‘aft’ et ‘afx’) et pour les horizons futurs 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100 (simulation ‘afx’). Chacune des durées (24, 48 et 72 heures) a fait l'objet d'une analyse.

Il est à noter que dans le cas des hyéogrammes d'averse de 24h, seulement trois courbes sont apparentes. Ceci s'explique par le fait que la séquence d'averse selon les approches du NOAA et de SNC-Lavalin (ici noté HMR et SNC, respectivement) sont identiques, c'est-à-dire 3, 1, 2 et 4. Par conséquent, la courbe HMR se superpose parfaitement à la courbe SNC.

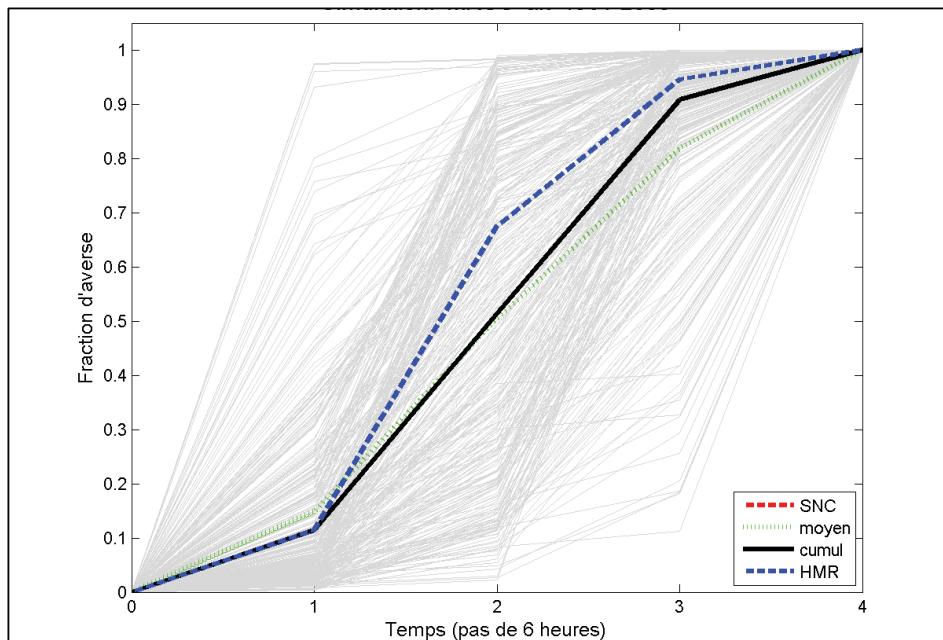


Figure-A I-1 Hyéogrammes unitaires cumulatifs des averses de 24h,
simulation 'aft'.

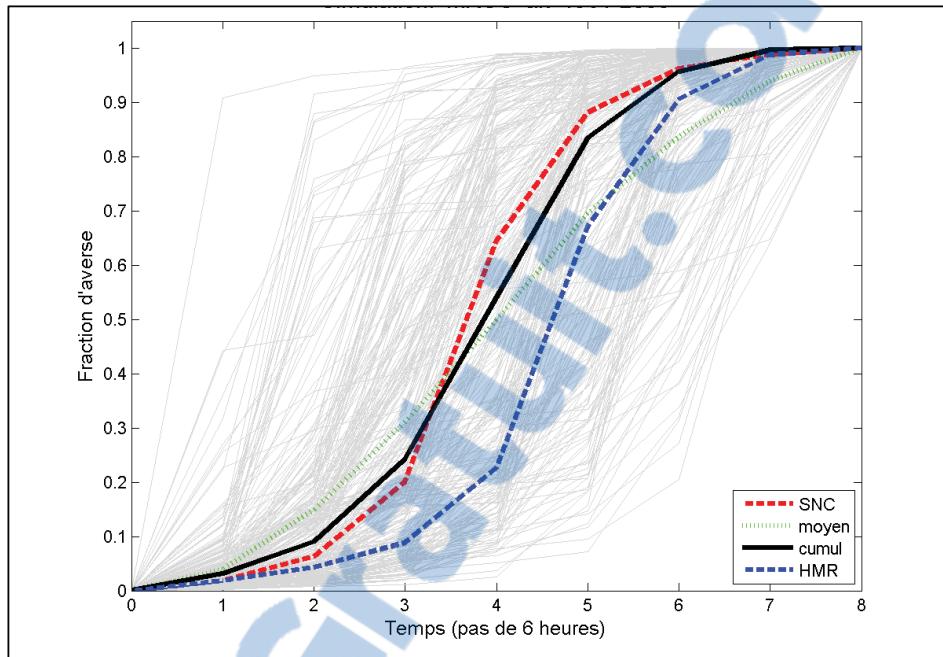


Figure-A I-2 Hyéogrammes unitaires cumulatifs des averses de 48h,
simulation 'aft'.

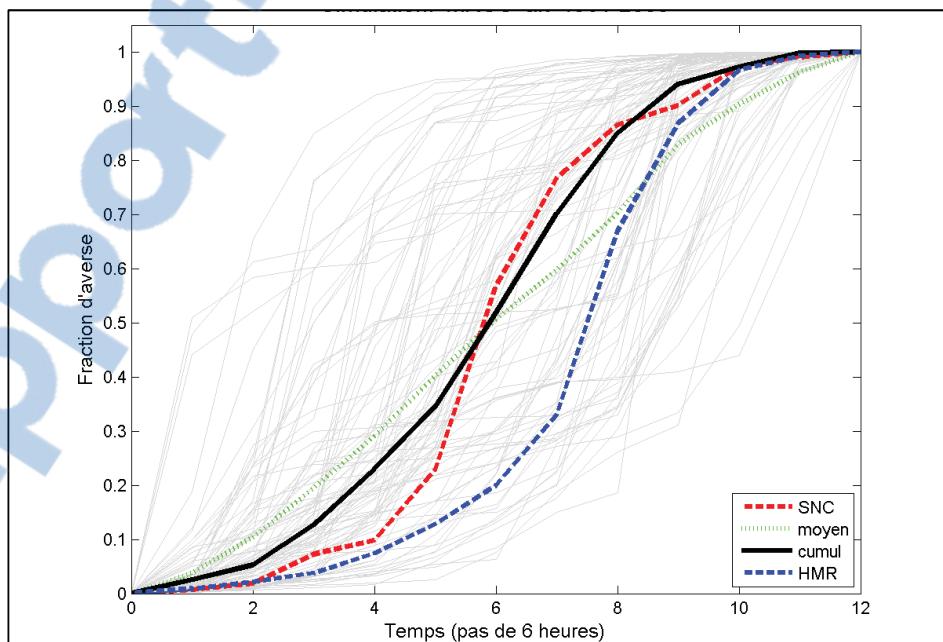
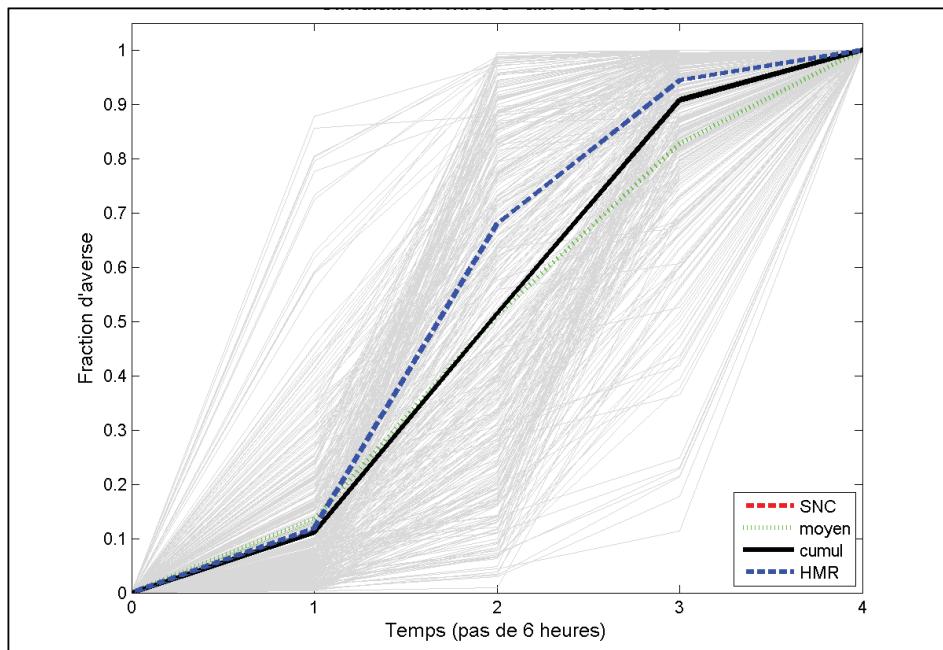
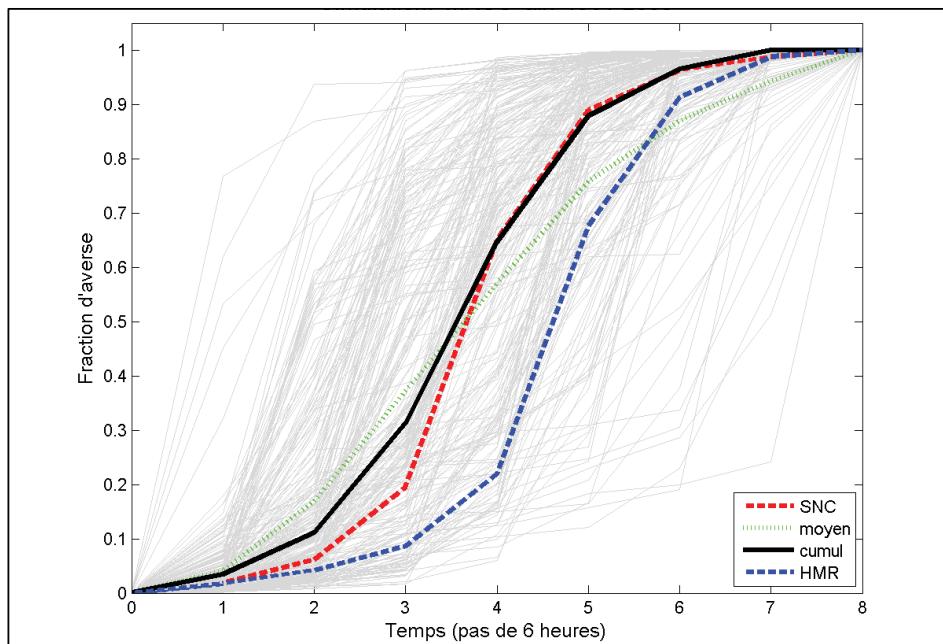


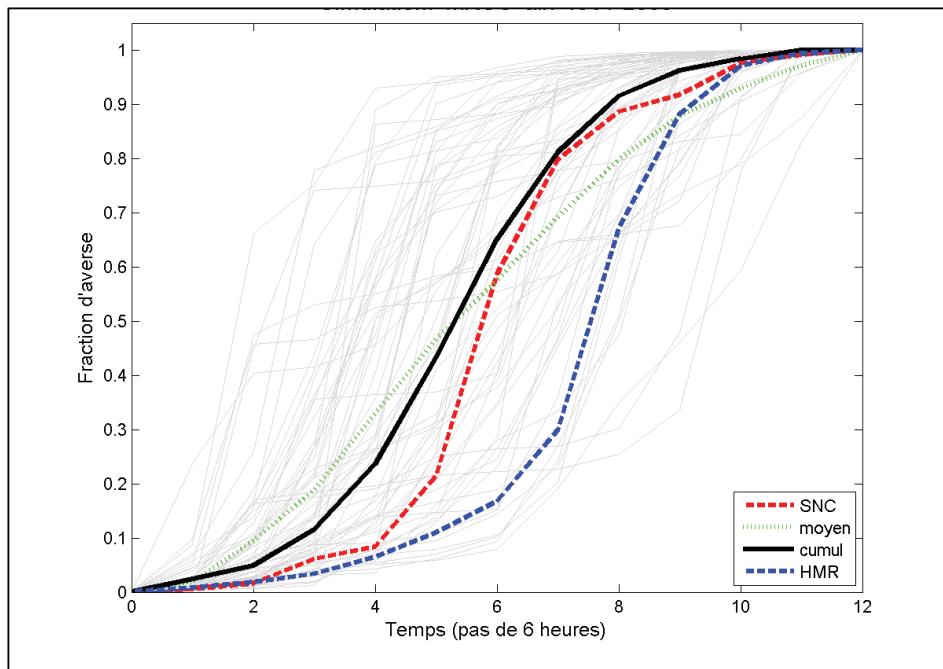
Figure-A I-3 Hyéogrammes unitaires cumulatifs des averses de 72h,
simulation 'aft'.



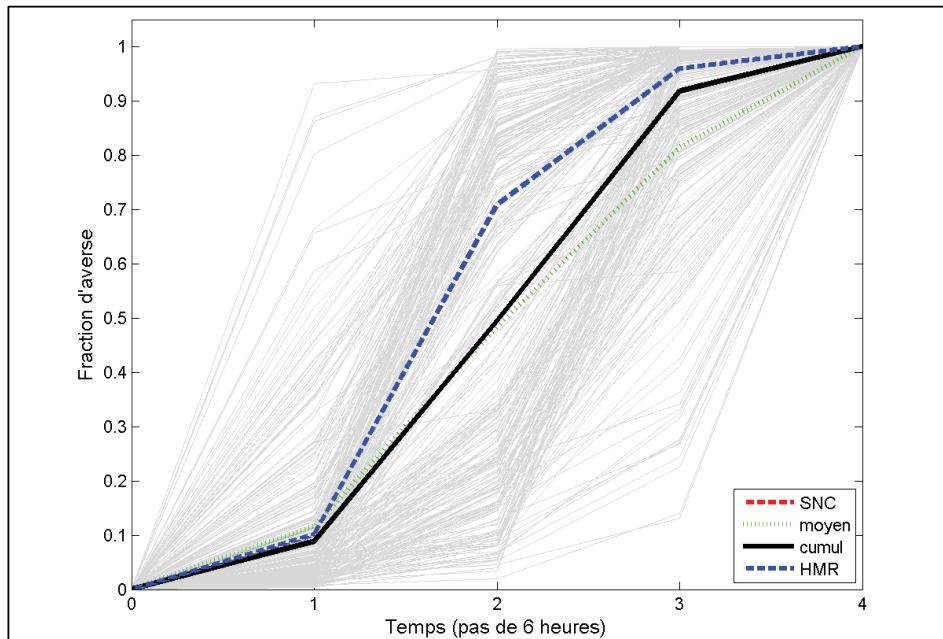
**Figure-A I-4 Hyéogrammes unitaires cumulatifs des averses de 24h,
simulation 'afx', horizon 1961-2000.**



**Figure-A I-5 Hyéogrammes unitaires cumulatifs des averses de 48h,
simulation 'afx', horizon 1961-2000.**



**Figure-A I-6 Hyéogrammes unitaires cumulatifs des averses de 72h,
simulation 'afx', horizon 1961-2000.**



**Figure-A I-7 Hyéogrammes unitaires cumulatifs des averses de 24h,
simulation 'afx', horizon 2011-2040.**

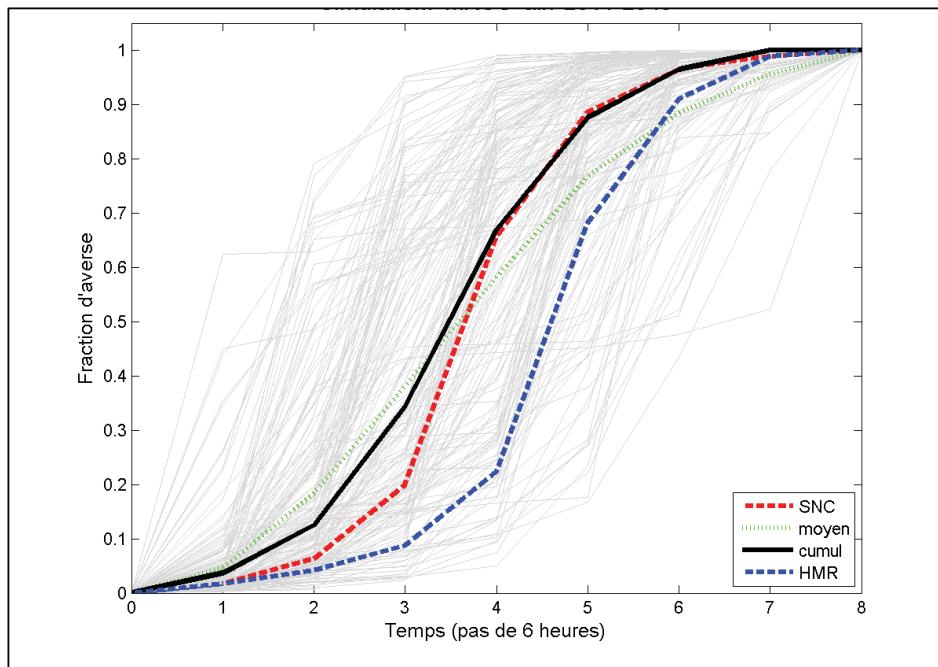


Figure-A I-8 Hyéogrammes unitaires cumulatifs des averses de 48h,
simulation 'afx', horizon 2011-2040.

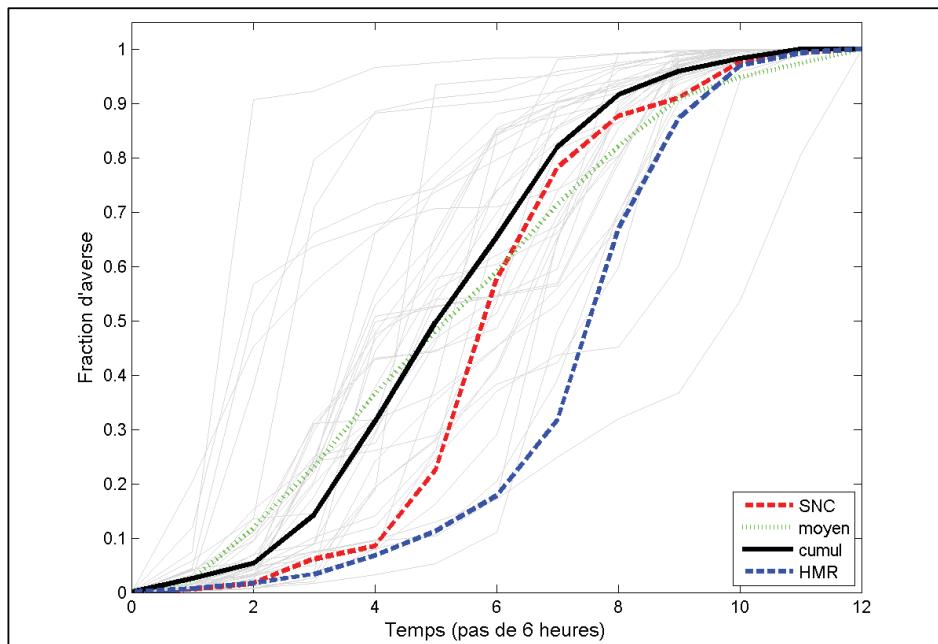


Figure-A I-9 Hyéogrammes unitaires cumulatifs des averses de 72h,
simulation 'afx', horizon 2011-2040.

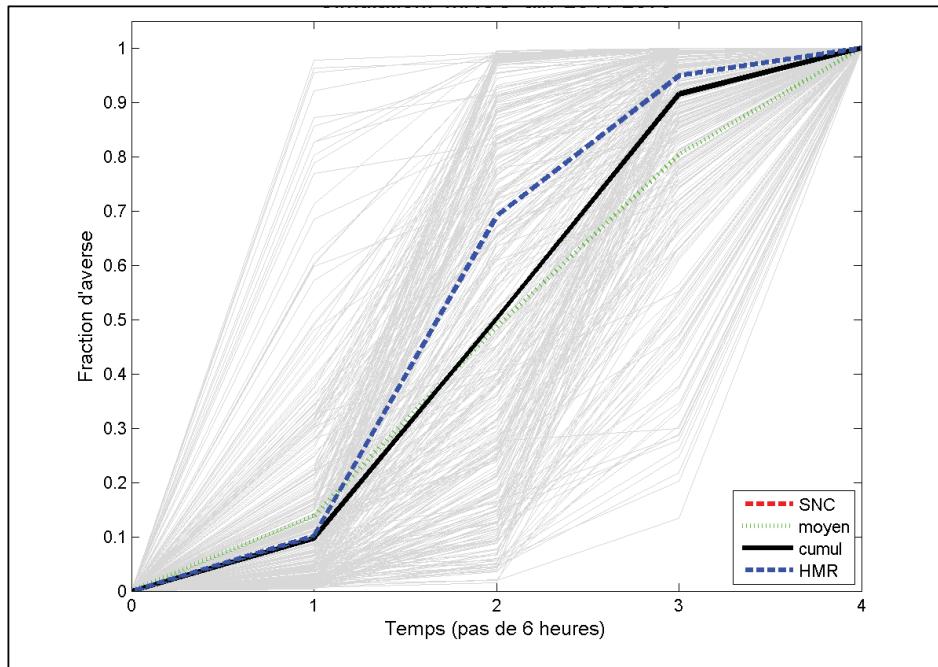


Figure-A I-10 Hyétogrammes unitaires cumulatifs des averses de 24h,
simulation 'afx', horizon 2041-2070.

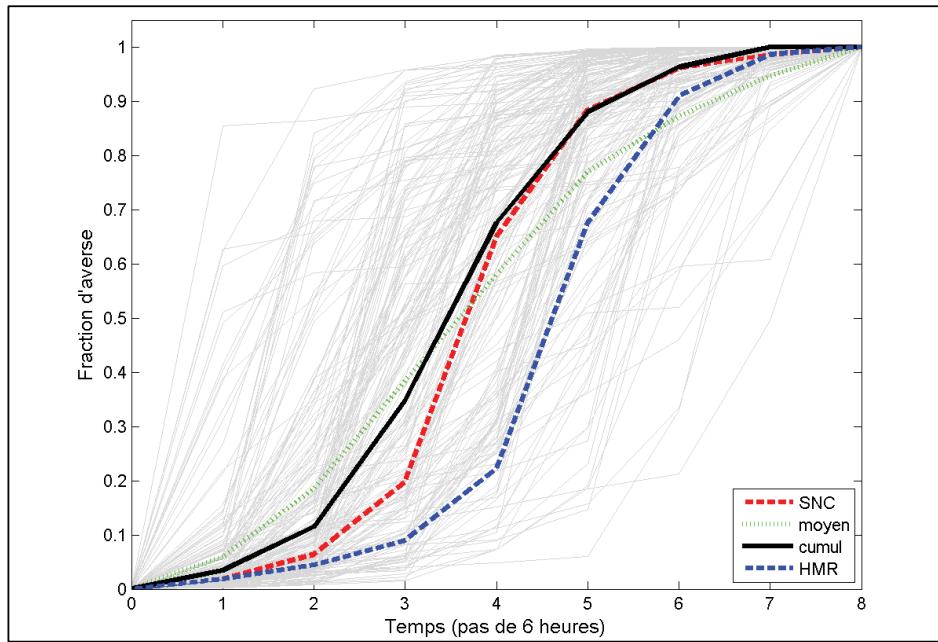
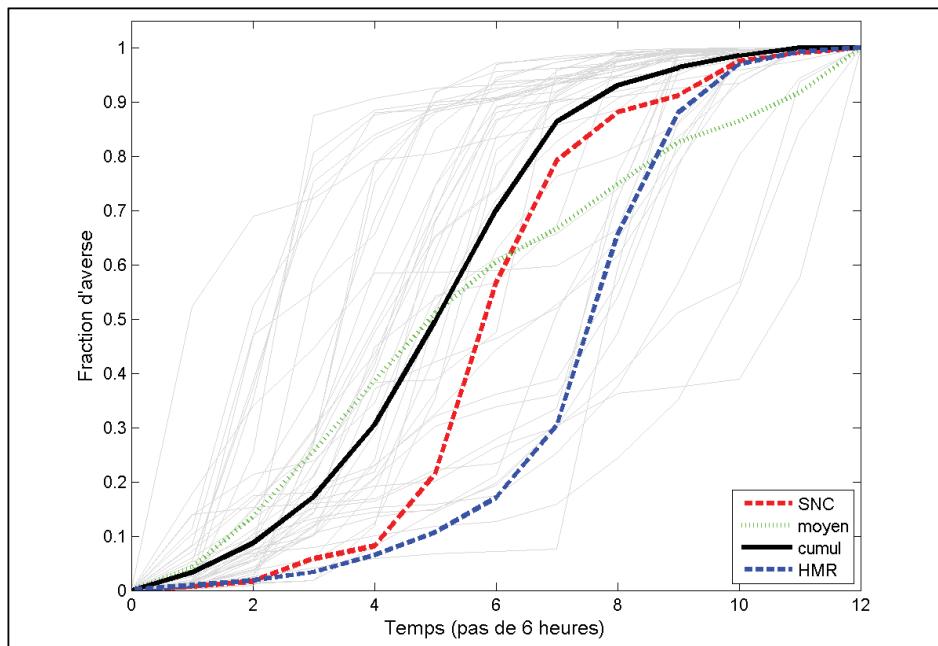
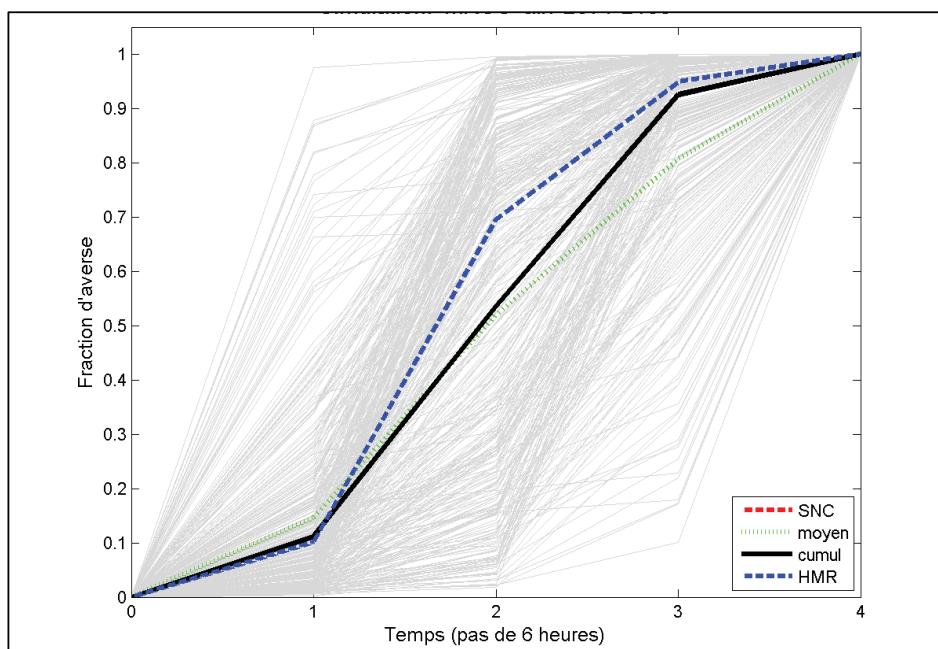


Figure-A I-11 Hyétogrammes unitaires cumulatifs des averses de 48h,
simulation 'afx', horizon 2041-2070.



**Figure-A I-12 Hyétogrammes unitaires cumulatifs des averses de 72h,
simulation 'afx', horizon 2041-2070.**



**Figure-A I-13 Hyétogrammes unitaires cumulatifs des averses de 24h,
simulation 'afx', horizon 2071-2100.**

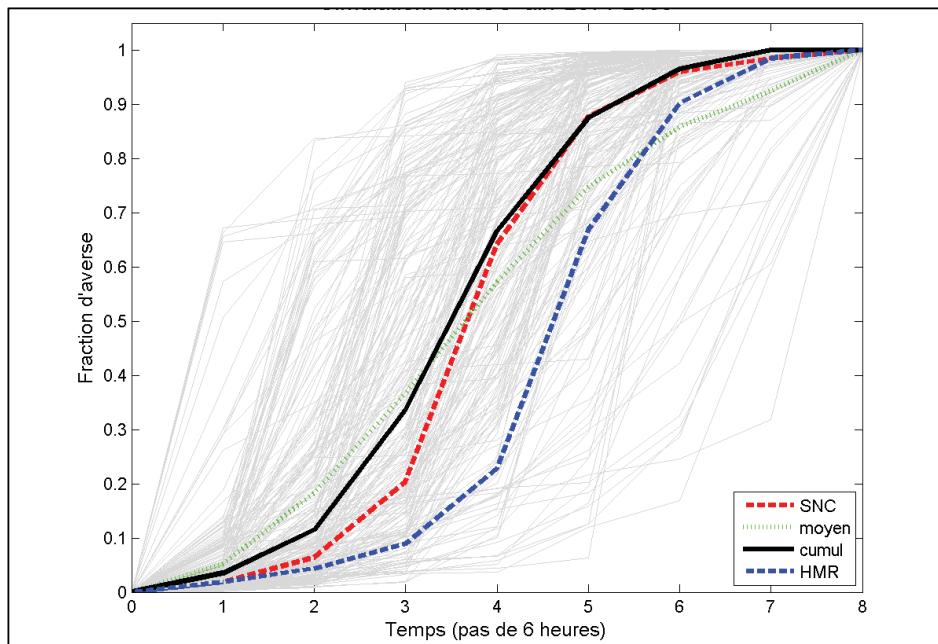


Figure-A I-14 Hyéogrammes unitaires cumulatifs des averses de 48h,
simulation 'afx', horizon 2071-2100.

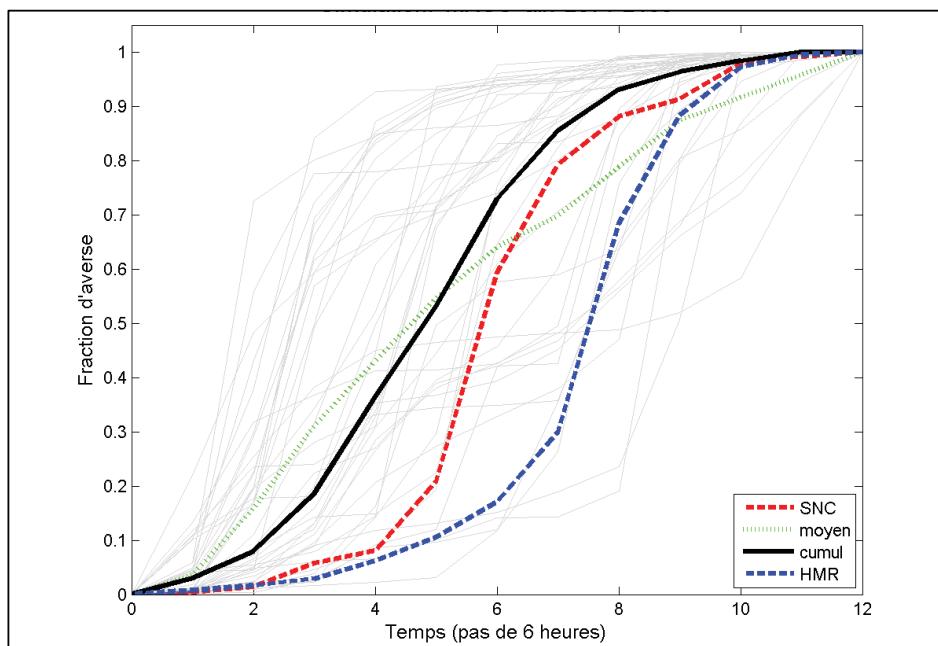


Figure-A I-15 Hyéogrammes unitaires cumulatifs des averses de 72h,
simulation 'afx', horizon 2071-2100.

ANNEXE II

COORDONNÉES DES TUILES UTILISÉES DU MRCC

Ce tableau dresse la liste des coordonnées des points de grille du MRCC. Les indices ‘nj’ et ‘ni’ font référence au nombre de points dans les directions ‘j’ et ‘i’, respectivement, tel que le système d’axes défini dans le modèle. Les 57 tuiles représentatives du bassin versant de la rivière Manicouagan sont identifiées en caractère gras.

Tableau-A II- 1 Coordonnées des points de grille du MRCC

nj	ni	no tuile	longitude	latitude
1	1	1	283,78436	51,06232
2	1	2	284,17188	51,36233
3	1	3	284,56594	51,66123
4	1	4	284,96667	51,95895
5	1	5	285,37420	52,25546
6	1	6	285,78867	52,55068
7	1	7	286,21021	52,84456
8	1	8	286,63894	53,13703
9	1	9	287,07502	53,42805
10	1	10	287,51858	53,71754
11	1	11	287,96975	54,00544
12	1	12	288,42869	54,29168
13	1	13	288,89552	54,57620
14	1	14	289,37040	54,85893
15	1	15	289,85346	55,13979
16	1	16	290,34485	55,41871
17	1	17	290,84472	55,69561
18	1	18	291,35319	55,97043
19	1	19	291,87042	56,24307
1	2	20	284,25939	50,81974
2	2	21	284,64823	51,11728
3	2	22	285,04354	51,41367
4	2	23	285,44545	51,70888
5	2	24	285,85409	52,00283
6	2	25	286,26958	52,29548
7	2	26	286,69205	52,58676

nj	ni	no tuile	longitude	latitude
8	2	27	287,12163	52,87661
9	2	28	287,55846	53,16498
10	2	29	288,00266	53,45180
11	2	30	288,45437	53,73701
12	2	31	288,91373	54,02053
13	2	32	289,38087	54,30231
14	2	33	289,85592	54,58227
15	2	34	290,33902	54,86034
16	2	35	290,83032	55,13645
17	2	36	291,32993	55,41053
18	2	37	291,83800	55,68250
19	2	38	292,35467	55,95228
1	3	39	284,72807	50,57507
2	3	40	285,11810	50,87014
3	3	41	285,51454	51,16405
4	3	42	285,91751	51,45674
5	3	43	286,32712	51,74816
6	3	44	286,74350	52,03824
7	3	45	287,16678	52,32693
8	3	46	287,59707	52,61418
9	3	47	288,03452	52,89991
10	3	48	288,47923	53,18407
11	3	49	288,93135	53,46660
12	3	50	289,39099	53,74742
13	3	51	289,85830	54,02648
14	3	52	290,33339	54,30369
15	3	53	290,81640	54,57900
16	3	54	291,30745	54,85233
17	3	55	291,80668	55,12361
18	3	56	292,31422	55,39275
19	3	57	292,83018	55,65969
1	4	58	285,19046	50,32838
2	4	59	285,58157	50,62099
3	4	60	285,97902	50,91242
4	4	61	286,38292	51,20260
5	4	62	286,79338	51,49149
6	4	63	287,21053	51,77902
7	4	64	287,63449	52,06514
8	4	65	288,06537	52,34979
9	4	66	288,50330	52,63291

nj	ni	no tuile	longitude	latitude
10	4	67	288,94840	52,91443
11	4	68	289,40079	53,19429
12	4	69	289,86059	53,47243
13	4	70	290,32794	53,74878
14	4	71	290,80294	54,02328
15	4	72	291,28572	54,29584
16	4	73	291,77642	54,56641
17	4	74	292,27514	54,83490
18	4	75	292,78201	55,10125
19	4	76	293,29714	55,36538
1	5	77	285,64663	50,07972
2	5	78	286,03871	50,36989
3	5	79	286,43705	50,65884
4	5	80	286,84176	50,94653
5	5	81	287,25296	51,23290
6	5	82	287,67076	51,51789
7	5	83	288,09527	51,80145
8	5	84	288,52662	52,08352
9	5	85	288,96492	52,36403
10	5	86	289,41028	52,64293
11	5	87	289,86282	52,92015
12	5	88	290,32266	53,19562
13	5	89	290,78992	53,46929
14	5	90	291,26471	53,74108
15	5	91	291,74714	54,01093
16	5	92	292,23735	54,27876
17	5	93	292,73544	54,54450
18	5	94	293,24152	54,80808
19	5	95	293,75572	55,06942
1	6	96	286,09665	49,82917
2	6	97	286,48958	50,11689
3	6	98	286,88870	50,40338
4	6	99	287,29411	50,68859
5	6	100	287,70593	50,97245
6	6	101	288,12427	51,25492
7	6	102	288,54923	51,53593
8	6	103	288,98093	51,81543
9	6	104	289,41947	52,09335
10	6	105	289,86497	52,36964
11	6	106	290,31755	52,64424

nj	ni	no tuile	longitude	latitude
12	6	107	290,77731	52,91707
13	6	108	291,24436	53,18807
14	6	109	291,71882	53,45718
15	6	110	292,20080	53,72433
16	6	111	292,69040	53,98945
17	6	112	293,18774	54,25246
18	6	113	293,69293	54,51330
19	6	114	294,20607	54,77188
1	7	115	286,54059	49,57676
2	7	116	286,93426	49,86206
3	7	117	287,33405	50,14610
4	7	118	287,74006	50,42883
5	7	119	288,15239	50,71020
6	7	120	288,57115	50,99016
7	7	121	288,99644	51,26864
8	7	122	289,42838	51,54558
9	7	123	289,86706	51,82094
10	7	124	290,31260	52,09464
11	7	125	290,76510	52,36662
12	7	126	291,22466	52,63683
13	7	127	291,69140	52,90519
14	7	128	292,16542	53,17164
15	7	129	292,64683	53,43611
16	7	130	293,13572	53,69854
17	7	131	293,63220	53,95885
18	7	132	294,13638	54,21697
19	7	133	294,64836	54,47283
1	8	134	286,97851	49,32257
2	8	135	287,37283	49,60544
3	8	136	287,77319	49,88704
4	8	137	288,17968	50,16732
5	8	138	288,59242	50,44621
6	8	139	289,01150	50,72367
7	8	140	289,43702	50,99963
8	8	141	289,86909	51,27404
9	8	142	290,30780	51,54684
10	8	143	290,75327	51,81797
11	8	144	291,20558	52,08737
12	8	145	291,66484	52,35497
13	8	146	292,13116	52,62071

nj	ni	no tuile	longitude	latitude
14	8	147	292,60464	52,88452
15	8	148	293,08536	53,14635
16	8	149	293,57344	53,40611
17	8	150	294,06897	53,66374
18	8	151	294,57204	53,91917
19	8	152	295,08276	54,17233
1	9	153	287,41050	49,06664
2	9	154	287,80536	49,34711
3	9	155	288,20618	49,62628
4	9	156	288,61307	49,90411
5	9	157	289,02611	50,18054
6	9	158	289,44540	50,45551
7	9	159	289,87105	50,72897
8	9	160	290,30315	51,00087
9	9	161	290,74179	51,27113
10	9	162	291,18708	51,53971
11	9	163	291,63911	51,80653
12	9	164	292,09797	52,07155
13	9	165	292,56377	52,33469
14	9	166	293,03660	52,59590
15	9	167	293,51655	52,85509
16	9	168	294,00371	53,11222
17	9	169	294,49819	53,36720
18	9	170	295,00006	53,61997
19	9	171	295,50942	53,87045
1	10	172	287,83661	48,80904
2	10	173	288,23192	49,08712
3	10	174	288,63311	49,36387
4	10	175	289,04029	49,63927
5	10	176	289,45354	49,91325
6	10	177	289,87296	50,18575
7	10	178	290,29864	50,45673
8	10	179	290,73066	50,72612
9	10	180	291,16914	50,99386
10	10	181	291,61415	51,25991
11	10	182	292,06580	51,52418
12	10	183	292,52417	51,78664
13	10	184	292,98935	52,04720
14	10	185	293,46143	52,30582
15	10	186	293,94052	52,56241

nj	ni	no tuile	longitude	latitude
16	10	187	294,42668	52,81692
17	10	188	294,92001	53,06927
18	10	189	295,42060	53,31941
19	10	190	295,92852	53,56725
1	11	191	288,25693	48,54982
2	11	192	288,65259	48,82551
3	11	193	289,05407	49,09987
4	11	194	289,46144	49,37284
5	11	195	289,87481	49,64439
6	11	196	290,29425	49,91444
7	11	197	290,71986	50,18294
8	11	198	291,15173	50,44985
9	11	199	291,58995	50,71510
10	11	200	292,03460	50,97863
11	11	201	292,48577	51,24038
12	11	202	292,94355	51,50029
13	11	203	293,40802	51,75830
14	11	204	293,87928	52,01435
15	11	205	294,35740	52,26836
16	11	206	294,84247	52,52028
17	11	207	295,33458	52,77004
18	11	208	295,83379	53,01757
19	11	209	296,34019	53,26279
1	12	210	288,67152	48,28904
2	12	211	289,06745	48,56235
3	12	212	289,46912	48,83432
4	12	213	289,87661	49,10489
5	12	214	290,29000	49,37401
6	12	215	290,70938	49,64163
7	12	216	291,13484	49,90769
8	12	217	291,56646	50,17213
9	12	218	292,00432	50,43489
10	12	219	292,44852	50,69593
11	12	220	292,89912	50,95517
12	12	221	293,35623	51,21256
13	12	222	293,81991	51,46804
14	12	223	294,29025	51,72154
15	12	224	294,76734	51,97301
16	12	225	295,25124	52,22236
17	12	226	295,74203	52,46955

nj	ni	no tuile	longitude	latitude
18	12	227	296,23980	52,71450
19	12	228	296,74460	52,95714
1	13	229	289,08047	48,02674
2	13	230	289,47658	48,29769
3	13	231	289,87835	48,56729
4	13	232	290,28586	48,83547
5	13	233	290,69920	49,10219
6	13	234	291,11843	49,36738
7	13	235	291,54365	49,63101
8	13	236	291,97493	49,89300
9	13	237	292,41236	50,15330
10	13	238	292,85602	50,41186
11	13	239	293,30598	50,66862
12	13	240	293,76233	50,92351
13	13	241	294,22514	51,17648
14	13	242	294,69449	51,42747
15	13	243	295,17046	51,67640
16	13	244	295,65311	51,92322
17	13	245	296,14252	52,16786
18	13	246	296,63876	52,41026
19	13	247	297,14190	52,65034
1	14	248	289,48384	47,76297
2	14	249	289,88005	48,03159
3	14	250	290,28185	48,29882
4	14	251	290,68930	48,56463
5	14	252	291,10249	48,82896
6	14	253	291,52150	49,09175
7	14	254	291,94640	49,35296
8	14	255	292,37727	49,61252
9	14	256	292,81418	49,87038
10	14	257	293,25722	50,12649
11	14	258	293,70646	50,38078
12	14	259	294,16197	50,63320
13	14	260	294,62383	50,88368
14	14	261	295,09212	51,13217
15	14	262	295,56689	51,37860
16	14	263	296,04822	51,62291
17	14	264	296,53617	51,86503
18	14	265	297,03083	52,10490
19	14	266	297,53223	52,34246

nj	ni	no tuile	longitude	latitude
1	15	267	289,88170	47,49780
2	15	268	290,27794	47,76408
3	15	269	290,67968	48,02897
4	15	270	291,08700	48,29242
5	15	271	291,49997	48,55438
6	15	272	291,91867	48,81479
7	15	273	292,34317	49,07359
8	15	274	292,77355	49,33075
9	15	275	293,20988	49,58619
10	15	276	293,65222	49,83986
11	15	277	294,10066	50,09171
12	15	278	294,55527	50,34167
13	15	279	295,01611	50,58969
14	15	280	295,48325	50,83571
15	15	281	295,95676	51,07966
16	15	282	296,43670	51,32148
17	15	283	296,92314	51,56111
18	15	284	297,41613	51,79849
19	15	285	297,91575	52,03354
1	16	286	290,27414	47,23126
2	16	287	290,67033	47,49523
3	16	288	291,07194	47,75779
4	16	289	291,47905	48,01890
5	16	290	291,89172	48,27850
6	16	291	292,31004	48,53654
7	16	292	292,73407	48,79297
8	16	293	293,16388	49,04773
9	16	294	293,59955	49,30077
10	16	295	294,04113	49,55203
11	16	296	294,48870	49,80145
12	16	297	294,94233	50,04899
13	16	298	295,40208	50,29457
14	16	299	295,86801	50,53814
15	16	300	296,34019	50,77964
16	16	301	296,81868	51,01900
17	16	302	297,30354	51,25617
18	16	303	297,79483	51,49107
19	16	304	298,29259	51,72365
1	17	305	290,66123	46,96341
2	17	306	291,05729	47,22508

nj	ni	no tuile	longitude	latitude
3	17	307	291,45870	47,48533
4	17	308	291,86552	47,74411
5	17	309	292,27784	48,00138
6	17	310	292,69570	48,25707
7	17	311	293,11919	48,51113
8	17	312	293,54837	48,76352
9	17	313	293,98330	49,01418
10	17	314	294,42405	49,26305
11	17	315	294,87068	49,51007
12	17	316	295,32327	49,75520
13	17	317	295,78186	49,99836
14	17	318	296,24653	50,23951
15	17	319	296,71732	50,47858
16	17	320	297,19430	50,71551
17	17	321	297,67752	50,95023
18	17	322	298,16704	51,18270
19	17	323	298,66290	51,41284
1	18	324	291,04303	46,69430
2	18	325	291,43890	46,95368
3	18	326	291,84004	47,21164
4	18	327	292,24651	47,46811
5	18	328	292,65839	47,72305
6	18	329	293,07574	47,97641
7	18	330	293,49862	48,22813
8	18	331	293,92709	48,47817
9	18	332	294,36123	48,72646
10	18	333	294,80108	48,97296
11	18	334	295,24672	49,21761
12	18	335	295,69820	49,46035
13	18	336	296,15558	49,70112
14	18	337	296,61891	49,93987
15	18	338	297,08826	50,17653
16	18	339	297,56367	50,41105
17	18	340	298,04520	50,64337
18	18	341	298,53290	50,87342
19	18	342	299,02681	51,10115

ANNEXE III

HYDROGRAMMES COMPARATIFS

Suite au calibrage du modèle HSAMI sur le bassin versant Manic5, les hydrogrammes de toutes les périodes ont été générés. Sur la figure III-1, on peut constater un certain biais selon les différentes sources de données, en climat récent (les courbes noire, bleue et verte). Les figures suivantes (III-2 à III-7) présentent l'ensemble des hydrogrammes sur toute la période, en trait gris et l'hydrogramme moyen est tracé avec la même légende que celle utilisée sur la figure III-1.

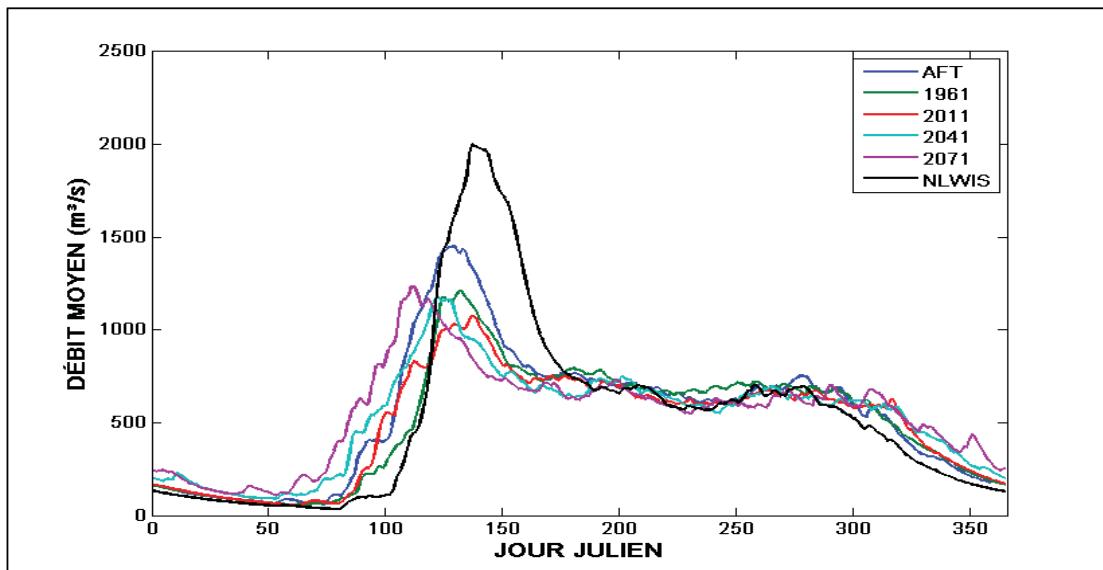


Figure III-1 Hydrogrammes moyens selon toutes les sources de données météorologiques sous un climat récent (NLWIS, MRCC simulation ‘aft’ et MRCC simulation ‘afx’, horizon 1961-2000) et sous un climat projeté (MRCC simulation ‘afx’, horizons 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100).

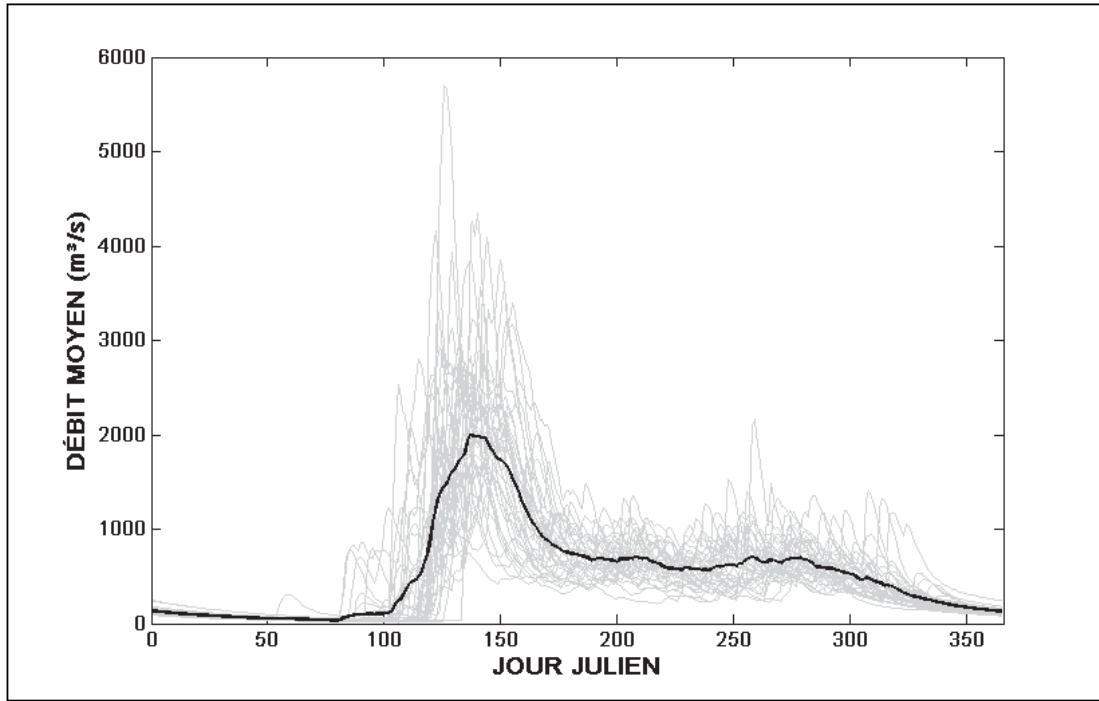


Figure III-2 Hyétogrammes de toute la période, selon NLWIS. L'hydrogramme moyen est le même que celui présenté sur la figure III-1.

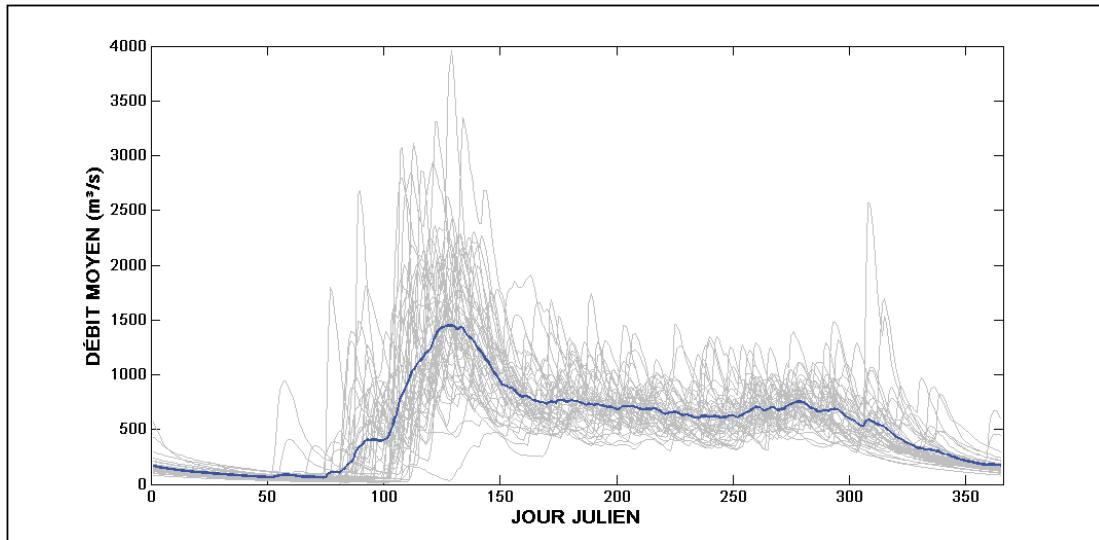


Figure III-3 Hyétogrammes de toute la période, selon MRCC simulation ‘aft’. L'hydrogramme moyen est le même que celui présenté sur la figure III-1.

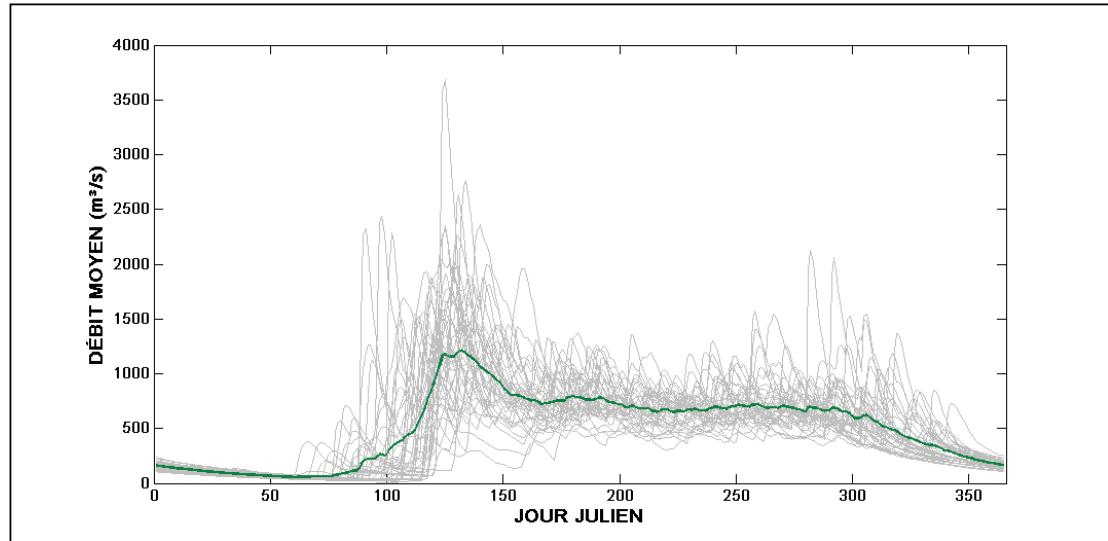


Figure III-4 Hyéogrammes de toute la période, selon MRCC simulation ‘afx’, horizon 1961-2000. L’hydrogramme moyen est le même que celui présenté sur la figure III-1.

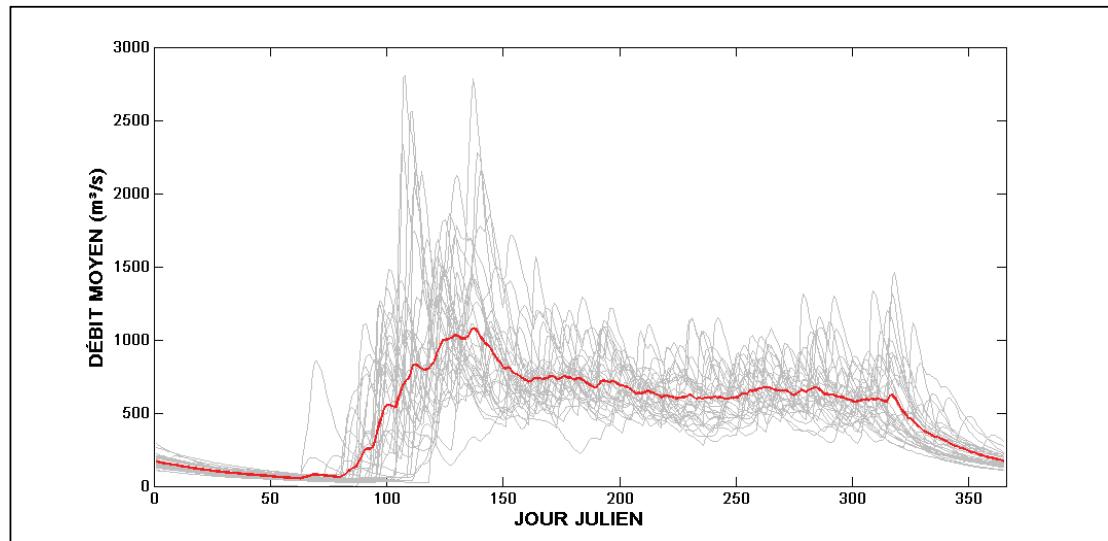


Figure III-5 Hyéogrammes de toute la période, selon MRCC simulation ‘afx’, horizon 2011-2040. L’hydrogramme moyen est le même que celui présenté sur la figure III-1.

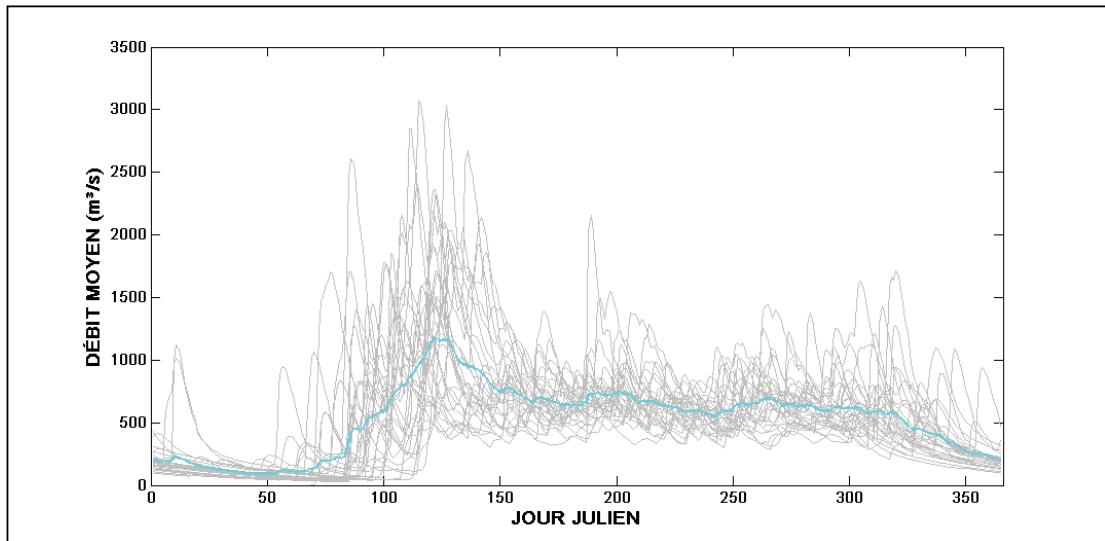


Figure III-6 Hyéogrammes de toute la période, selon MRCC simulation ‘afx’, horizon 2041-2070. L’hydrogramme moyen est le même que celui présenté sur la figure III-1.

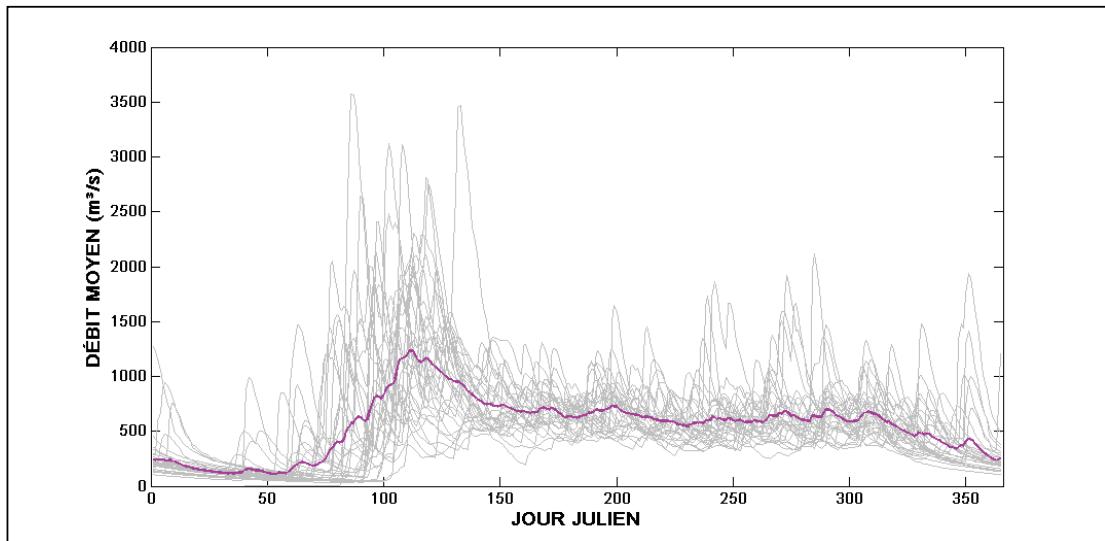


Figure III-7 Hyéogrammes de toute la période, selon MRCC simulation ‘afx’, horizon 2071-2100. L’hydrogramme moyen est le même que celui présenté sur la figure III-1.

ANNEXE IV
COURBES DE DENSITÉ DE PROBABILITÉ

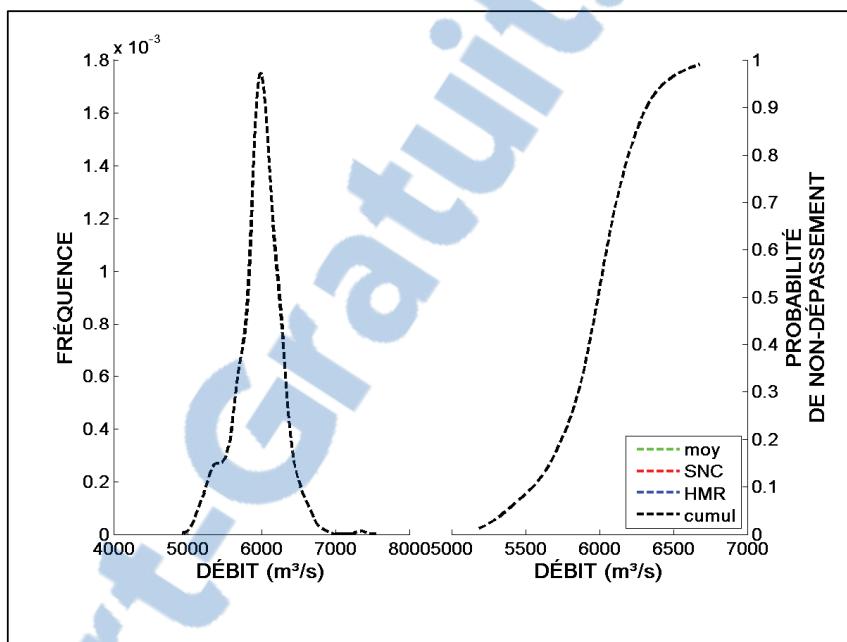


Figure-A IV- 1 Simulation ‘aft’, horizon 1961, PMP 24 heures.

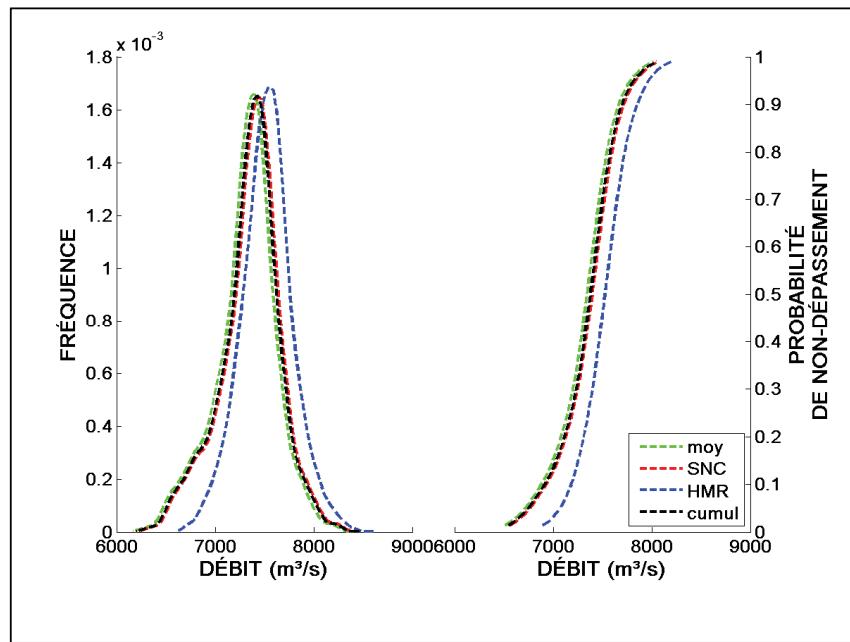


Figure-A IV- 2 Simulation ‘aft’, horizon 1961, PMP 48 heures.

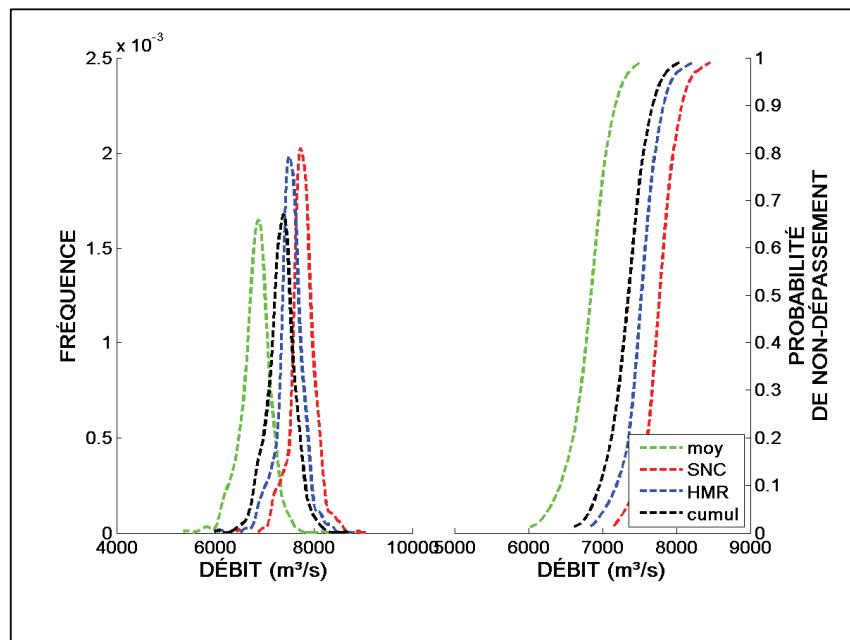


Figure-A IV- 3 Simulation ‘aft’, horizon 1961, PMP 72 heures.

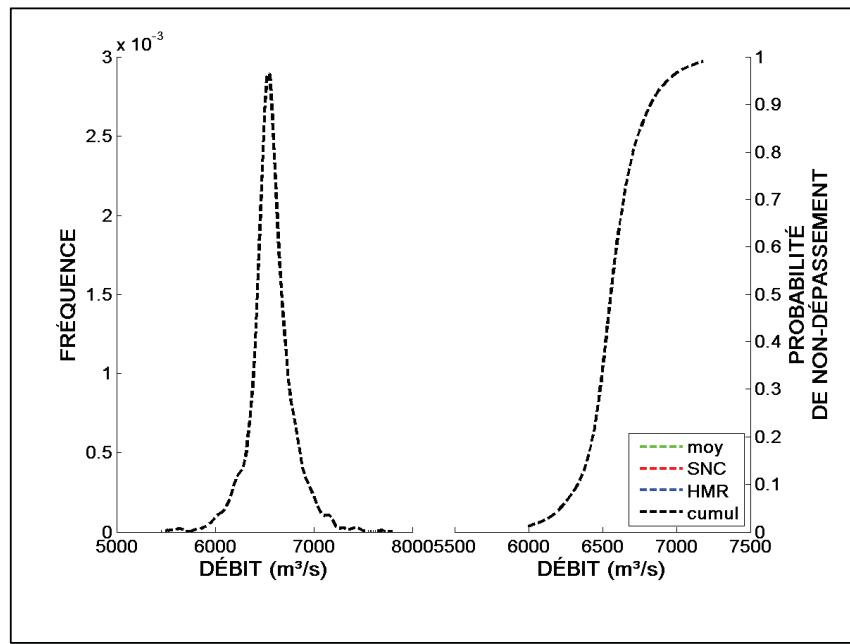


Figure-A IV- 4 Simulation ‘afx’, horizon 1961, PMP 24 heures.

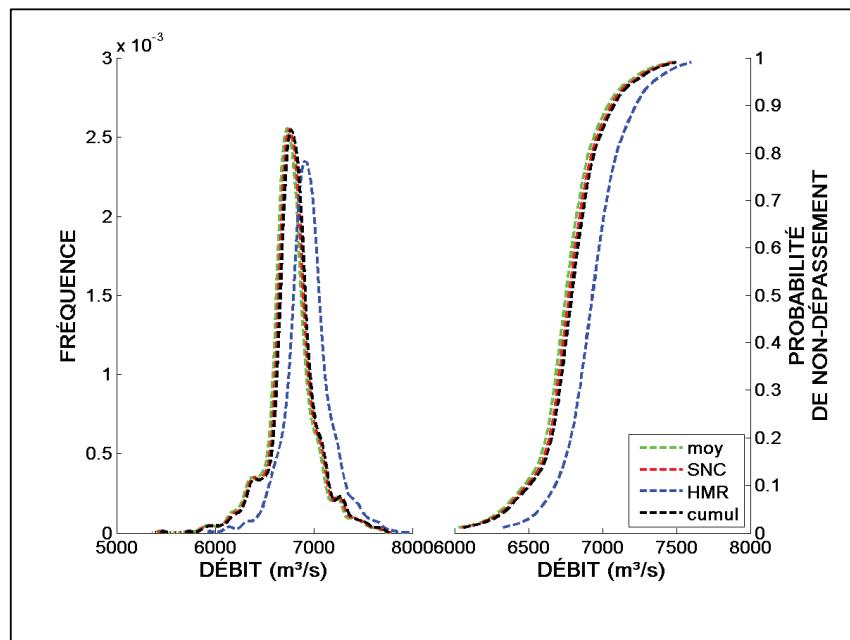


Figure-A IV- 5 Simulation ‘afx’, horizon 1961, PMP 48 heures.

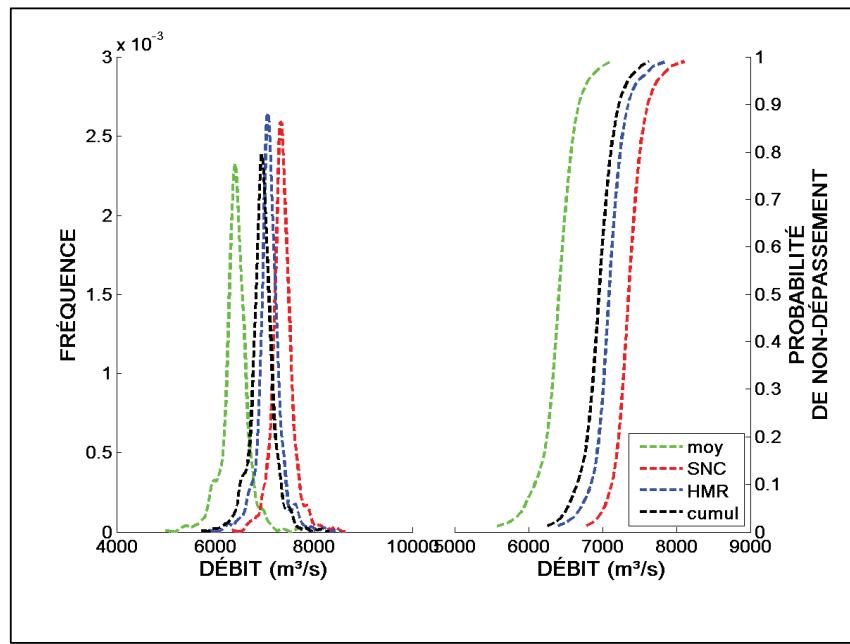


Figure-A IV- 6 Simulation ‘afx’, horizon 1961, PMP 72 heures.

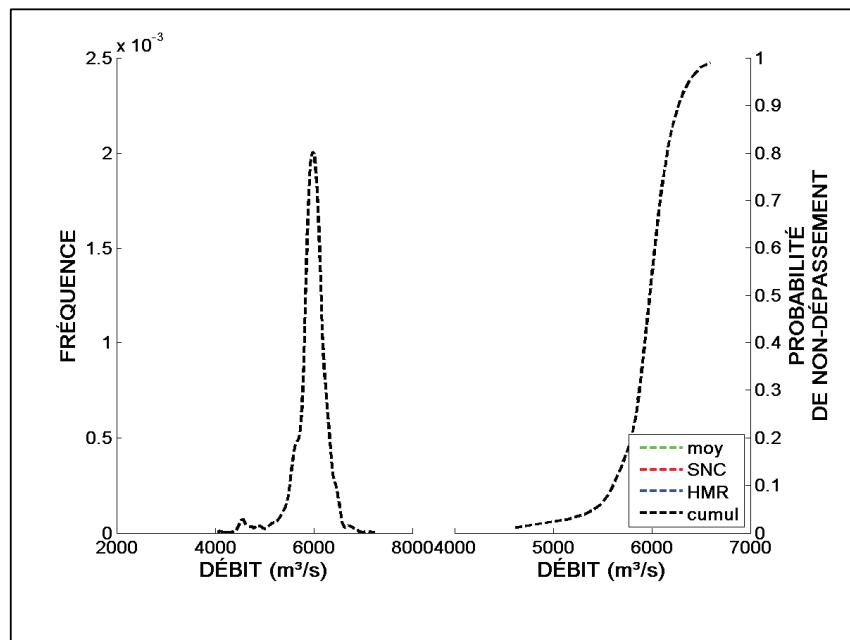


Figure-A IV- 7 Simulation ‘afx’, horizon 2011, PMP 24 heures.

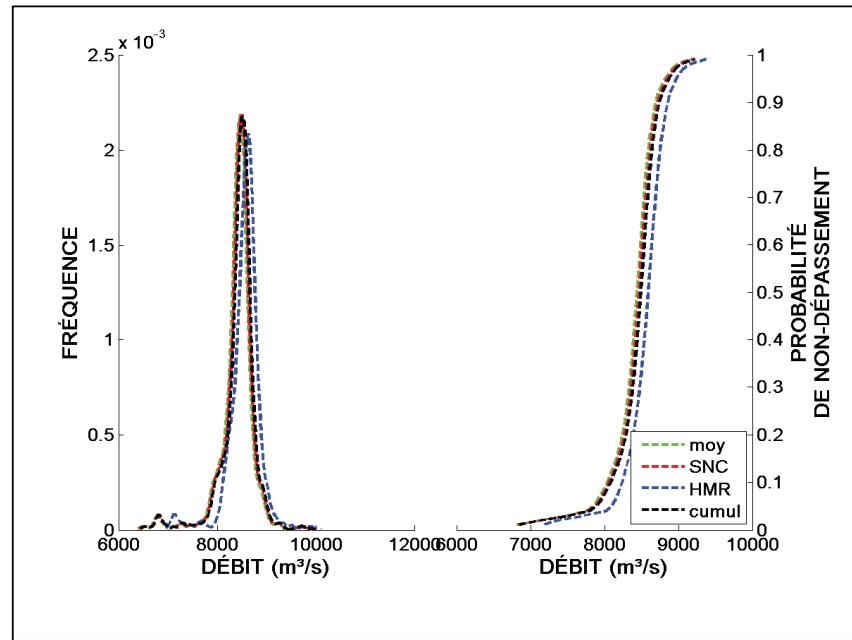


Figure-A IV- 8 Simulation ‘afx’, horizon 2011, PMP 48 heures.

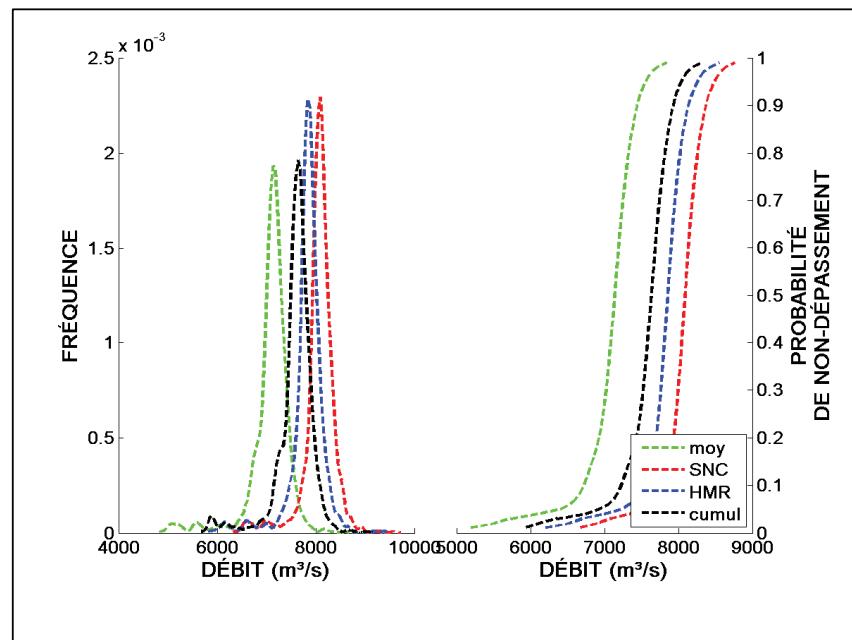


Figure-A IV- 9 Simulation ‘afx’, horizon 2011, PMP 72 heures.

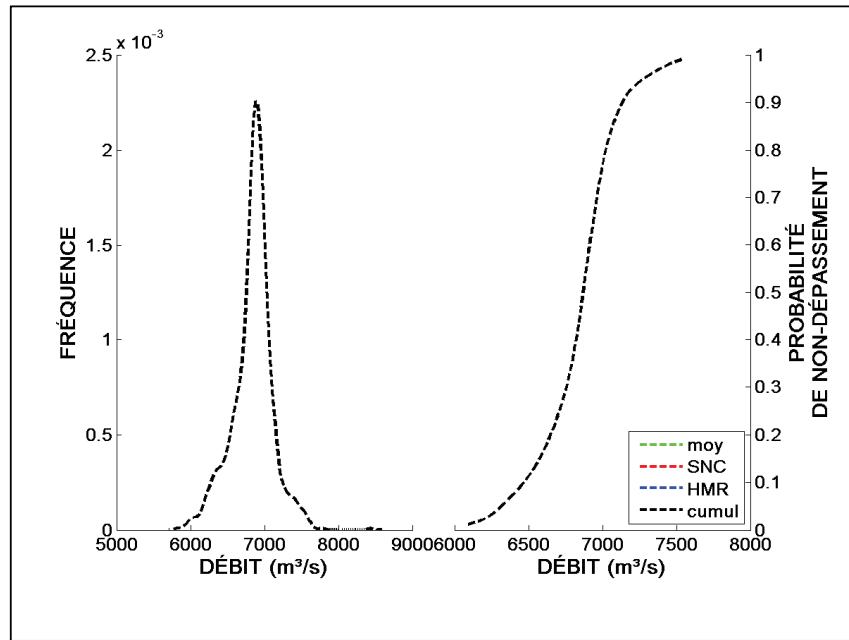


Figure-A IV- 10 Simulation ‘afx’, horizon 2041, PMP 24 heures.

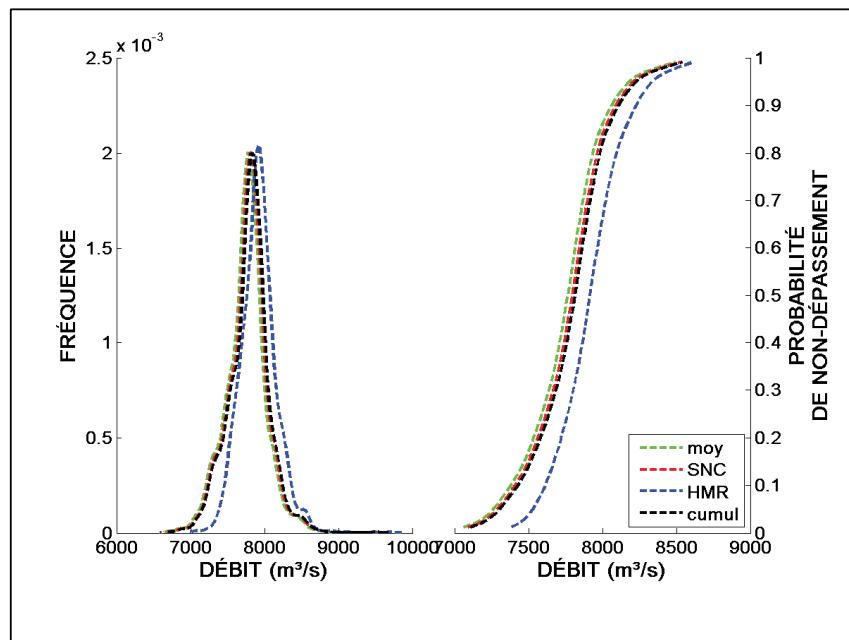


Figure-A IV- 11 Simulation ‘afx’, horizon 2041, PMP 48 heures.

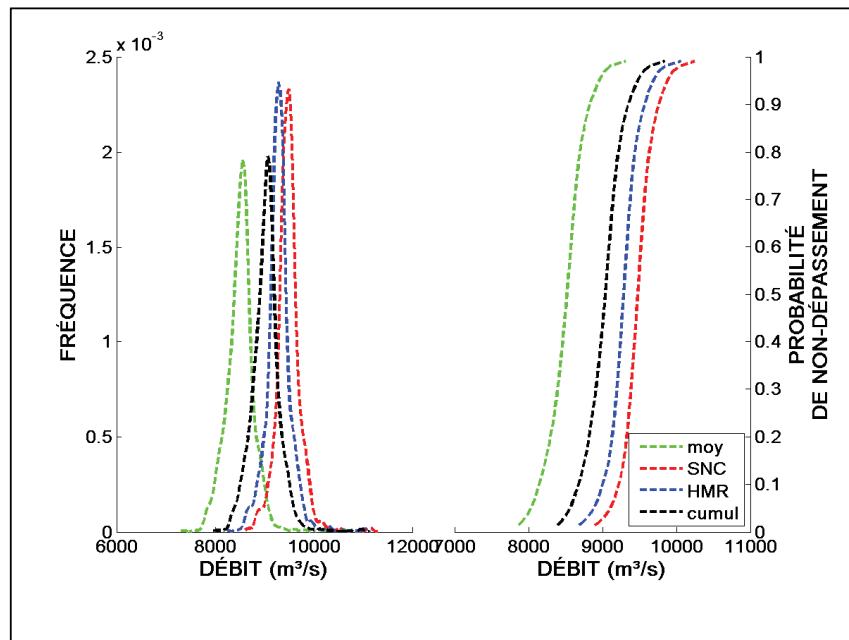


Figure-A IV- 12 Simulation ‘afx’, horizon 2041, PMP 72 heures.

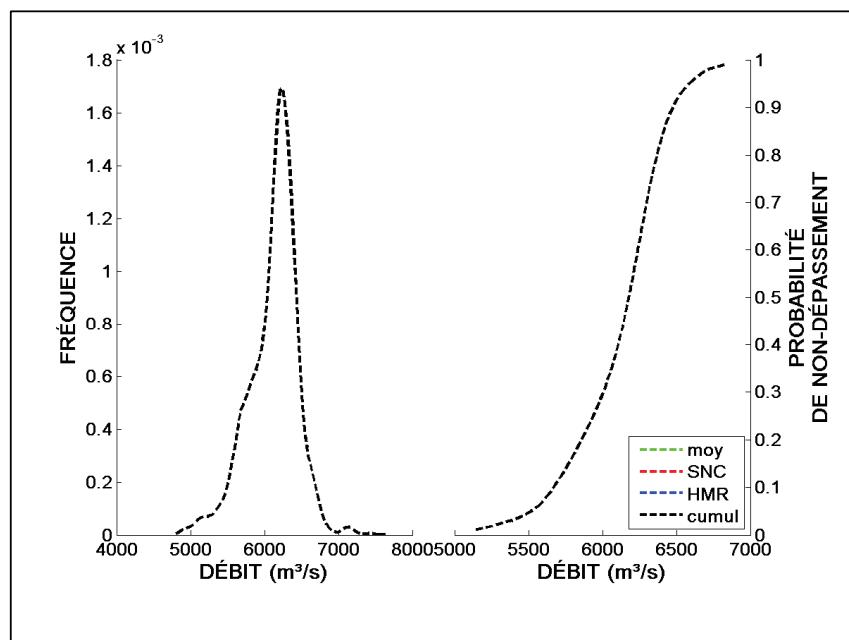


Figure-A IV- 13 Simulation ‘afx’, horizon 2071, PMP 24 heures.

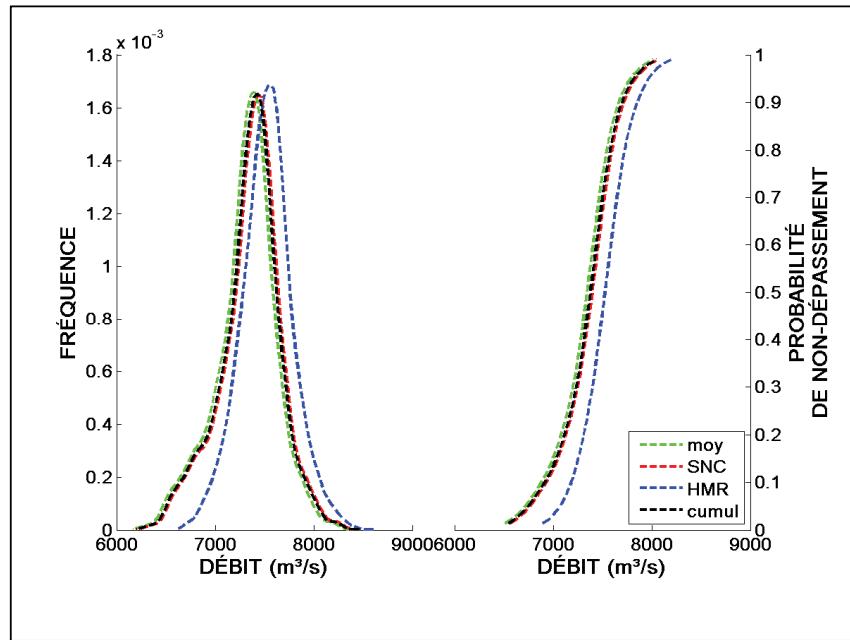


Figure-A IV- 14 Simulation ‘afx’, horizon 2071, PMP 48 heures.

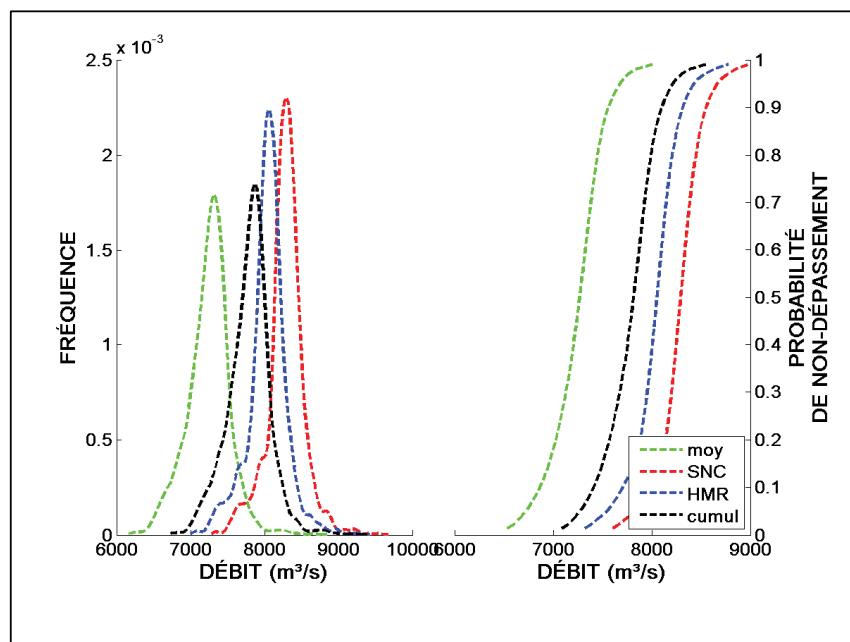


Figure-A IV- 15 Simulation ‘afx’, horizon 2071, PMP 72 heures.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbs, Deborah J. 1999. « Numerical modeling study to investigate the assumptions used in the calculation of probable maximum precipitation ». *Water Resources Research*, vol. 35, n° 3, p. 785-796.
- AMS. 1959. *Glossary of Meteorology*. Boston (Massachussets), 638 p.
- Atria Engineering Hydraulics inc., Ander Chow et Bryn Jones. 1994. *Probable Maximum Floods in Boreal Regions: Final Report*. CEA No 9111 G 839. Montréal (Québec): Canadian Electrical Association, 128 p.
- Bingeman, Allyson K. 2001. « Improving dam safety analysis by using physically-based techniques to derive estimates of atmospherically maximum precipitation ». Ph.D., Canada, University of Waterloo (Canada).
<http://proquest.umi.com/pqdweb?did=726150791&Fmt=7&clientId=46962&RQT=309&VName=PQD>.
- Bisson, J.L., et F. Roberge. 1983. *Prévision des apports naturels: Expérience d'Hydro-Québec*. Compte-rendu de l'Atelier sur la prévision du débit. Toronto.
- Bourque, A., et G. Simonet. 2008. « Québec ». In *Vivre avec les changements climatiques au Canada: édition 2007*, sous la dir. de Lemmen, D.S., F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush. En ligne. p. 171-226. Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario).
http://adaptation.nrcan.gc.ca/assess/2007/pdf/full-complet_f.pdf. Consulté le 4 mars 2010.
- Caya, D., et R. Laprise. 1999. « A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model: The Canadian RCM ». *Monthly Weather Review*, vol. 127, n° 3, p. 341-362.
- Caya, D., R. Laprise, M. Giguère, G. Bergeron, J.P. Blanchet, B.J. Stocks, G.J. Boer et N.A. McFarlane. 1995. « Description of the Canadian regional climate model ». *Water, air, and soil pollution*, vol. 82, n° 1-2, p. 477.
- CEIWR-HEC. 1984. *HMR52: Probable Maximum Storm*. CPD-46. US Army Corps of Engineers.
- Chen, Li-Chuan, et A. Allen Bradley. 2006. « Adequacy of using surface humidity to estimate atmospheric moisture availability for probable maximum precipitation ». *Water Resources Research*, vol. 42, n° 9.
- Collier, C. G., et P. J. Hardaker. 1996. « Estimating probable maximum precipitation using a storm model approach ». *Journal of Hydrology*, vol. 183, n° 3-4, p. 277-306.

- De Koninck, Rodolphe. 2002. *Le Grand atlas du Canada et du monde*. Éditions du Renouveau Pédagogique inc., 184 p.
- Debs, Iskandar. 1995. « Evaluation des méthodes utilisées pour l'estimation de la crue maximale probable en régions nordiques ». M.Sc.A., Canada, Ecole Polytechnique, Montréal (Canada).
<http://proquest.umi.com/pqdweb?did=740241901&Fmt=7&clientId=46962&RQT=309&VName=PQD>.
- Doray, M.-J. 2009. *Conversation privée*. Montréal (Québec): Hydro-Québec.
- El Adlouni, S., B. Bobée et T. B. M. J. Ouarda. 2008. « On the tails of extreme event distributions in hydrology ». *Journal of Hydrology*, vol. 355, n° 1-4, p. 16-33.
- Environnement Canada. 2008. « Modèles: Le modèle régional canadien du climat (MRCC) ». In *CCmaC : Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique*. En ligne. <http://www.cccma.ec.gc.ca/french/models/crcm.shtml>. Consulté le 8 octobre 2009.
- Environnement Canada. 2010. *La troisième génération du modèle couplé climatique global*. En ligne. <http://www.ec.gc.ca/ccmac-cccma>. Consulté le 7 avril 2010.
- Flato, G.M., et G.J. Boer. 2001. « Warning Asymmetry in Climate Change Simulations ». *Geophysical Research Letters*, vol. 28, p. 195-198.
- Fortin, V. 2000. *Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application*. Institut de recherche d'Hydro-Québec, 66 p.
- GIEC. 2000. *Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions: Résumé à l'intention des décideurs*. The Hague: Cambridge University Press, 27 p.
- GIEC. 2007. *Résumé à l'intention des décideurs. Changements climatiques 2007: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Cambridge Press University.
- Gouvernement du Québec. 2009a. *Loi sur la sécurité des barrages: L.R.Q., chapitre S-3.1.01*. En ligne. Québec (Québec): Éditeur officiel du Québec. Consulté le 9 novembre 2009.
- Gouvernement du Québec. 2009b. *Règlement sur la sécurité de barrages: c. S-3.1.04, r.1*. En ligne. Québec (Québec): Éditeur officiel du Québec. Consulté le 9 novembre 2009.

- Hansen, E. Marshall, L. C. Schreiner, John Frederick Miller, United States: Office of Hydrology. Hydrometeorological Branch et United States: Army Corps of Engineers. 1982. *Application of probable maximum precipitation estimates : United States east of the 105th meridian*. Coll. « Hydrometeorological Report ». Washington, D.C.: U.S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration : U.S. Dept. of the Army, Corps of Engineers.
- Hershfield, D.M. 1965. « Estimating the Probable Maximum Precipitation ». *Journal of Hydraulics Division*, vol. 87, n° HY5, p. 99-106.
- Horton, M. 1936. *Hydrologic Conditions as Affecting the Results of the Application of Methods of Frequency Analysis to Floods Records*. U.S.. Geological Survey, Water Supply, Rapport No 771. Washington, D.C.
- Huff, F.A. 1967. « Time distribution of rainfall in heavy storms ». *Water Resources Research*, vol. 3, n° 4, p. 1007-1019.
- Hutchinson, M. F., D. W. McKenney, K. Lawrence, J. H. Pedlar, R. F. Hopkinson, E. Milewska et P. Papadopol. 2009. « Development and testing of Canada-wide interpolated spatial models of daily minimum-maximum temperature and precipitation for 1961-2003 ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 48, n° Copyright 2010, The Institution of Engineering and Technology, p. 725-41.
- Jakob, Dörte, Robert Smalley, Jeanette Meighen, Karin Xuereb et Brian Taylor. 2009. *Climate change and probable maximum precipitation*. Coll. « Hydrology Report Series », HRS No 12. Melbourne: Bureau of Meteorology, 162 p.
- Kidder, Stanley Q., et Andrew S. Jones. 2007. « A Blended Satellite Total Precipitable Water Product for Operational Forecasting ». *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 24, n° 1, p. 74-81.
- Kwon, H.-T. , et G.-H. Lim. 2006. « The Amount of Precipitable Water estimated from the Zenith Delay of the GPS signals over the Korean Peninsula ». In (Tsukuba, Japon, 14-17 janvier 2003). En ligne. <http://dbx.cr.chiba-u.jp/Gps_Met/gpsmet/CD-1_Proceedings_PDF/>. Consulté le 28 mai 2009.
- Laprise, René. 2008. « Regional climate modelling ». *Journal of Computational Physics*, vol. 227, n° 7, p. 3641-3666.
- Mailhot, Alain, Sophie Duchesne, Daniel Caya et Guillaume Talbot. 2007a. « Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM) ». *Journal of Hydrology*, vol. 347, n° 1-2, p. 197-210.

- Mailhot, Alain, Gilles Rivard, Sophie Duchesne et Jean-Pierre Villeneuve. 2007b. *Impacts et adaptations liés aux changements climatiques (CC) en matière de drainage urbain au Québec*. R-874. Québec: Alain Mailhot, INRS-ETE, 132 p.
- Minty, L.J., J. Meighen et M.R. Kennedy. 1996. *Development of the generalised southeast Australia method for estimating probable maximum precipitation*. en ligne. HRS Report No 4. Bureau of Meteorology. Melbourne. Australia, 48 p. <www.bom.gov.au/hydro/has/hrs4.shtml>. Consulté le 11 décembre 2008.
- Minville, Marie. 2008. « Potentiel d'adaptation aux changements climatiques de la gestion d'un système hydrique exploité pour la production hydroélectrique: étude de la rivière Pérignon (Québec, Canada) ». Ph. D., Montréal, École de technologie supérieure, Montréal (Canada).
- Music, B., et D. Caya. 2007. « Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM) ». *Journal of Hydrometeorology*, vol. 8, n° 5, p. 969-988.
- Nakicenovic, Nebojsa, Joseph Alcamo, Gerald Davis, Bert de Vries, Joergen Fenhann, Stuart Gaffin, Kenneth Gregory, Arnulf Grubler, Tae Yong Jung, Tom Kram, Emilio Lebre La Rovere, Laurie Michaelis, Shunsuke Mori, Tsuneyuki Morita, William Pepper, Hugh M. Pitcher, Lynn Price, Keywan Riahi, Alexander Roehrl, Hans-Holger Rogner, Alexei Sankovski, Michael Schlesinger, Priyadarshi Shukla, Steven J. Smith, Robert Swart, Sascha van Rooijen, Nadejda Victor et Zhou Dadi. 2000. *Special Report on Emissions Scenarios : a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Coll. « Other Information: PBD: 3 Oct 2000 ». Medium: ED; Size: vp. p. <<http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/15009867-Kv00FB/native/>>.
- National Research Council. 1994. *Estimating bounds on extreme precipitation events : a brief assessment*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- National Weather Service. 1988. *Probable Maximum Precipitation Estimates: United States Between the Continental Divide and the 103rd Meridian*. Coll. « Hydrometeorological Report », HMR-55A. NOAA, 242 p.
- NOAA. 1978. *Probable Maximum Precipitation Estimates: United States East of the 105th Meridian*. Coll. « Hydrometeorological Report No51 ».
- NOAA. 1982. *Application of Probable Maximum Precipitation Estimates: United States East of the 105th Meridian*. Coll. « Hydrometeorological Report No52 ».
- OMM. 1994. *Guide des pratiques hydrologiques*, 5e édition. 796 p. <<ftp://ftp.wmo.int/Documents/MediaPublic/Publications>>.

- Organisation des Nations Unies. 1964. « Manual of Standards and Criteria for Planning Water Resource Project ». *Water Resource Series*, vol. 26.
- Organization World Meteorological. 1986. *Manual for estimation of probable maximum precipitation*. Coll. « Operational hydrology report, no. 1 ». Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization.
- Riette, S., et D. Caya. 2002. *Sensitivity of short simulations to the various parameters in the new CRCM spectral nudging*. Coll. « Atmospheric and Oceanic Modelling ». H. Ritchie.
- Rio Tinto Alcan. 2009. « Programme de bourses d'études supérieures Rio Tinto Alcan ». En ligne. Montréal (Québec):
- Scinocca, J. F., N. A. McFarlane, M. Lazare, J. Li et D. Plummer. 2008. « Technical Note: The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere ». *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 8, n° 23, p. 7055-7074.
- SNC-Lavalin. 2003. « Estimation des conditions hydrométéorologiques conduisant aux crues maximales probables (CMP) au Québec : PLUIES ».
- SNC-Lavalin. 2004. « Estimation des conditions hydrométéorologiques conduisant aux crues maximales probables (CMP) au Québec : RAPPORT FINAL ».
- Solot, Samuel B. 1939. « Computation of depth of precipitable water in a column of air ». *Monthly Weather Review*, vol. 67, n° 4, p. 100-103.
- Uppala, S. M., P. W. Kallberg, A. J. Simmons, U. Andrae, V. Da Costa Bechtold, M. Fiorino, J. K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G. A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R. P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M. A. Balmaseda, A. C. M. Beljaars, L. Van De Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Holm, B. J. Hoskins, L. Isaksen, P. A. E. M. Janssen, R. Jenne, A. P. McNally, J. F. Mahfouf, J. J. Morcrette, N. A. Rayner, R. W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K. E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo et J. Woollen. 2005. « The ERA-40 re-analysis ». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 131, n° Copyright 2006, IEE, p. 2961-3012.
- WMO. 1986. *Manual for estimation of probable maximum precipitation*, 2e éd. Coll. « Operational hydrology report, no. 1 ». Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization.