

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M.Eng.

PAR
Jonathan ROY

ÉTUDE D'IMPACT DE L'OPTIMISATION DES RÈGLES DE GESTION EN
CONDITION DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE SYSTÈME HYDRIQUE DE
LA RIVIÈRE MANICOUAGAN

MONTRÉAL, LE 16 SEPTEMBRE 2011



Jonathan Roy, 2011



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. François Brissette, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Annie Poulin, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Robert Leconte, membre du jury
Département de génie civil université de Sherbrooke

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

14 SEPTEMBRE 2011

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Si mes rêves et la persévérance ont fait de moi ce que je suis, certaines personnes m'ont permis d'être où je suis aujourd'hui.

François Brissette a d'abord été un professeur pour moi. Son enseignement a été mon premier contact avec l'hydrologie et le déclencheur de ce qui allait devenir une passion. François est ensuite devenu mon directeur de mémoire. Il m'a donné une chance et sa confiance en m'intégrant à ses travaux. C'est durant ces travaux que j'ai eu la chance de rencontrer Robert Leconte (UdeS) qui s'avère être le complément parfait de François. François, Robert, je ne vous remercierai jamais suffisamment pour vos enseignements, vos judicieux conseils et votre support. J'ai eu la chance de côtoyer l'extraordinaire équipe que vous faites. Avec vous deux, tout semble possible, même descendre une montagne en 20 secondes.

Ma passion pour mon métier serait incomplète sans Benoît Renault (ÉTS) et Marie Minville (IREQ). Par leur spontanéité, leur bonne humeur et leurs connaissances, ils ont su me transmettre leur passion. Grâce à eux, j'ai entrevu de nouvelles possibilités. Leurs encouragements m'ont fait franchir un pas supplémentaire en me lançant dans les études supérieures.

Surtout ne pas oublier la grande famille du DRAME. Vous avec qui j'ai passé tout ce temps, avez été des compagnons et des amis exemplaires. Je vous souhaite tous d'attraper la passion qui me contamine, une carrière à la hauteur de vos aspirations et une heureuse vie.

Tout ce travail n'aurait pas de sens et n'aurait été possible sans l'indéfectible support de ma femme, Johanne Richard. Tu m'as supportée puis suivie dans ma folie de retour aux études. Tu as partagé mes difficultés et réussites. Tu as trop fait pour que je puisse tout noter ici... simplement, merci pour d'en avoir fait autant!

Grâce à vous tous je ne travaille plus, je « vocationne ».

ÉTUDE D'IMPACT DE L'OPTIMISATION DES RÈGLES DE GESTION EN CONDITION DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE SYSTÈME HYDRIQUE DE LA RIVIÈRE MANICOUAGAN

Jonathan ROY

RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est d'estimer le potentiel de l'optimisation des règles de gestion en condition de changements climatiques sur le système hydrique de la rivière Manicouagan. La méthode adoptée est une comparaison de la modélisation du cycle hydrologique et du système hydrique sous les conditions climatiques actuelles et futures. La méthode des deltas a été utilisée pour générer trois horizons climatiques (2025, 2055 et 2085) à partir de la période de référence 1971-2000. Les valeurs « delta » utilisées sont issues de la combinaison de six MCG (modèle de climat global) et quatre scénarios d'émission de gaz à effet de serre pour un total de vingt projections climatiques. La modélisation hydrologique du bassin versant est assurée par le modèle hydrologique global HSAMI, alors que la modélisation du système hydrique est assurée par un modèle numérique couplé à l'optimisateur de règle de gestion des réservoirs PPS2.

La modélisation des vingt projections sous les trois horizons futurs permet en premier lieu de déterminer l'impact des changements climatiques sur le mode de gestion du système hydrique. Ce dernier est fortement conditionné par les fortes crues printanières issues de la fonte de l'important couvert nival. Le réchauffement climatique engendrera un devancement significatif de cette crue ainsi qu'une forte incertitude entourant son amplitude. Sans une optimisation des règles de gestion, une désynchronisation de la vidange des réservoirs et de l'arrivée de la crue printanière provoquera une augmentation des probabilités de déversements non productifs. L'optimisation des règles réduit considérablement ces déversements ainsi que l'incertitude s'y rattachant. Cette opération d'optimisation ne permet pas de générer de hausse supplémentaire de la production d'énergie (hausse moyenne inférieure à 0,5 %). L'incertitude liée à cette production d'énergie augmente considérablement à l'image de celle liée aux apports naturels.

Mots clés : gestion des réservoirs, changements climatiques, optimisation, hydrologie

ÉTUDE D'IMPACT DE L'OPTIMISATION DES RÈGLES DE GESTION EN CONDITION DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE SYSTÈME HYDRIQUE DE LA RIVIÈRE MANICOUAGAN

Jonathan ROY

ABSTRACT

The main goal of this study is to estimate the potential gains due to optimisation of dam management rules under climate change conditions in the Manicouagan river basin. The method used is a comparison between current and future hydrological cycle model simulations and water resource systems. A delta-change approach was used to generate three climate horizons (2025, 2055 and 2085) based upon a reference period (1971-2000). The delta values were computed following a combination of six GCMs (Global Circulation Model) and four greenhouse gas emission scenarios, for a total of twenty climate scenarios. The water system was simulated using the global hydrological model HSAMI, while the hydraulics simulations were performed with a numerical model coupled to the PPS2 dam management rule optimizer.

The model simulations of the twenty scenarios under the three future climate horizons show the impact of climate change on the way the water resource system is managed. The dam management method is strongly conditioned by the large spring flood volumes generated by the melt of the important snowpack on the basin. Climate change will produce a significant acceleration in spring melt timing as well as a strong increase in the uncertainty of its amplitude. Without an optimization of the dam management rules, a desynchronization between the emptying of the reservoirs and the arrival of the spring flood waters will provoke an increase in the probability of unproductive spills. The optimization of the rules considerably reduces these spills as well as the uncertainties associated with them. This optimization procedure does not allow for a further increase in generated energy production (average increase less than 0.5%). The uncertainty associated to this energy production increases considerably with respect to the natural inflows uncertainties.

Keywords: reservoirs management, climate changes, optimisation, hydrology

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 LES OUTILS	5
1.1 Modèles de circulation du climat global	5
1.2 Projections climatiques	5
1.3 Modèle hydrologique HSAMI	7
1.4 Optimisateur de règle de gestion PPS2	10
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE	13
2.1 Les changements climatiques	13
2.2 Impacts des changements climatiques au Québec	14
2.3 Problématique et contexte	15
2.4 Objectifs du mémoire	16
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	17
3.1 Traitement des données météorologiques	17
3.2 Les projections climatiques	18
3.3 Le calage du modèle hydrologique	18
3.4 La modélisation	19
3.4.1 La modélisation hydrologique	19
3.4.2 La simulation du système hydrique	20
CHAPITRE 4 BASSIN VERSANT ET SYSTÈME HYDRIQUE DE LA RIVIÈRE MANICOUAGAN	21
4.1 Description du bassin versant	21
4.2 Les installations hydroélectriques	22
CHAPITRE 5 LES DONNÉES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES	25
5.1 Données hydrologiques	25
5.2 Données météorologiques	26
5.2.1 Les données météorologiques aux stations	26
5.2.2 Les données météorologiques PQDH	27
5.2.3 Les données météorologiques IREQ	27
5.2.4 Les données météorologiques NLWIS	28
5.3 Méthodologie	28
5.3.1 Les données hydrométriques	28
5.3.2 Les données météorologiques	28
5.4 Résultats et discussion	29
5.4.1 Les données hydrométriques	29
5.4.2 Les données météorologiques	30
5.5 Recommandations	34
5.5.1 Les données hydrométriques	34

5.5.2	Les données météorologiques	35
CHAPITRE 6 LE CALAGE DE HSAMI		
6.1	La problématique du calage en modélisation.....	37
6.2	Méthodologie	38
6.2.1	Le calage en parallèle.....	38
6.2.2	Réduction du nombre de paramètres.....	41
6.3	Résultats du calage sur le passé récent	43
6.4	Discussion.....	45
CHAPITRE 7 LES PROJECTIONS CLIMATIQUES		
7.1	Méthodologie	47
7.2	Les modèles et projections climatiques	48
7.3	Résultats.....	50
7.4	Impact sur les projections météorologiques.....	50
7.5	Impact sur les projections d'apports naturels.....	54
7.6	Discussion.....	56
CHAPITRE 8 MODÉLISATION DE LA PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE		
8.1	Méthodologie	61
8.2	La modélisation du système hydrique.....	62
8.3	L'optimisation des règles de gestion.....	62
8.4	Le modèle de gestion hydrique.....	62
8.5	Le bilan hydrique et le routage	63
8.6	La production électrique	64
CHAPITRE 9 RÉSULTATS.....		
9.1	Les niveaux des réservoirs.....	67
9.2	Les déversements non productifs.....	69
9.3	La production d'énergie et le soutirage	70
9.4	Le parc de production Manicouagan.....	70
9.5	Les centrales à réservoirs	72
9.6	Les centrales au fil de l'eau	74
CHAPITRE 10 DISCUSSION		
10.1	L'impact des changements climatiques sur la production.....	77
10.2	L'optimisation de la production	79
CONCLUSION.....		
85		
ANNEXE I	INFORMATION D'AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA SUR LES DONNÉES NLWIS	89
ANNEXE II	RÉSULTATS DES OPÉRATIONS DE CALAGE ET DE VALIDATION CROISÉE.....	91

ANNEXE III	DONNÉES HISTORIQUES DES APPORTS NATURELS AU SOUS-BASSIN PETIT LAC MANICOUAGAN	95
ANNEXE IV	INCERTITUDE LIÉE À L'ÉQUIFINALITÉ EN CALAGE DU MODÈLE HYDROLOGIQUE HSAMI.....	97
ANNEXE V	DIAGRAMMES DE DISPERSION DES VALEURS DELTA AUX HORIZONS 2025, 2055 et 2085	101
ANNEXE VI	CYCLE ANNUELLE DE TEMPÉRATURE MOYENNE.....	105
ANNEXE VII	ANALYSE DES PROJECTIONS FUTURES DE PRÉCIPITATIONS.....	109
ANNEXE VIII	HYDROGRAMMES DES PROJECTIONS D'APPORTS NATURELS.....	113
ANNEXE IX	PROBABILITÉ D'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES PARAMÈTRES D'ÉVALUATION DES APPORTS NATURELS.....	117
ANNEXE X	PROBABILITÉ D'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA PRODUCTION D'HYDROÉLECTRICITÉ.....	121
ANNEXE XI	RÉPARTITION DE LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE ANNUELLE	125
ANNEXE XII	RÉPARTITION DES DÉVERSEMENTS	133
ANNEXE XIII	RENDEMENT DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE	139
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	141

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Description des 23 paramètres d'HSAMI9
Tableau 4.1	Caractéristiques des sous-bassins de la rivière Manicouagan.....21
Tableau 5.1	Coefficients de Nash-Sutcliffe31
Tableau 5.2	Résultats de calage et validation de HSAMI33
Tableau 6.1	Coefficient de corrélation entre les divers paramètres d'HSAMI41
Tableau 6.2	Probabilités d'hypothèse de corrélation due au hasard42
Tableau 6.3	Coefficient de Nash-Sutcliffe pour les trois sous bassins.....43
Tableau 7.1	Combinaisons des modèles-scénarios de GES49
Tableau 7.2	Variation de la moyenne annuelle des précipitations53

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Classification des scénarios d'émission de gaz à effet de serre	6
Figure 1.2	Quatre grandes familles des scénarios SRES.....	6
Figure 1.3	Schéma du modèle conceptuel HSAMI.....	8
Figure 2.1	Variation de la température et du niveau de la mer	13
Figure 2.2	Évolution des principaux gaz à effets de serre.....	14
Figure 4.1	Schéma du système hydrique de la rivière Manicouagan.....	22
Figure 5.1	Comparaison des températures maximums de la source NLWIS vs la station météorologique #7042590 Gagnon A	32
Figure 5.2	Comparaison des précipitations de la source NLWIS vs la station #7042590 Gagnon A.....	32
Figure 5.3	Répartition des stations météorologiques sur le territoire canadien	35
Figure 6.1	Distribution des 23 paramètres de HSAMI lors de 500 calages	37
Figure 6.2	Distribution des paramètres HSAMI sur le modèle à 31 paramètres.....	40
Figure 6.3	Distribution des paramètres HSAMI sur le modèle à 25 paramètres.....	43
Figure 6.4	Enveloppes d'incertitude liées à la sélection du jeu de paramètres.....	44
Figure 7.1	Distribution des 20 combinaisons de delta	49
Figure 7.2	Diagramme de dispersion des variations de précipitation en fonction de la température moyenne des différents modèles-scénarios (horizon 2055)	51
Figure 7.3	Cycle annuel de la température moyenne	52
Figure 7.4	Scénarios d'apports naturels annuels moyens de l'horizon 2085.	54
Figure 7.5	Probabilité de devancement de la crue printanière en jours	55
Figure 7.6	Évolution des portions neige et pluie des précipitations.....	58

XVIII

Figure 8.1	Schéma de l'organisation du réseau hydrographique dans le modèle de gestion hydrique.....	63
Figure 9.1	Niveaux des réservoirs Toulnostouc et Manic-5	68
Figure 9.2	Probabilité de variation des déversements (hm ³)	69
Figure 9.3	Probabilité de variation de la génération d'électricité du parc de production Manicouagan	71
Figure 9.4	Probabilité de variation de la génération d'électricité des centrales à réservoir	72
Figure 9.5	Probabilité de variation saisonnière de la génération d'électricité à la centrale Toulnostouc.....	73
Figure 9.6	Probabilité de variation de la génération d'électricité des centrales aux fil de l'eau.....	74
Figure 10.1.	Soutirage moyen (20 projections) aux réservoirs Manic-5 et Toulnostouc	78

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BCCR	Bjerknes Centre for Climate Research
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental sur l'évolution du climat
GISS	Goddard Institute for Space Studies
HSAMI	Hydrological Systeme AMI
INM	Institute of Numerical Mathematics
IREQ	Institut de recherche en électricité du Québec
MCG	Modèle climatique global
MIROC	Model for Interdisciplinary Research On Climate
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NLWIS	National Land and Water Information Service
PD	Programme dynamique
PDS	Programme dynamique stochastique
SCE-UA	Shuffled Complex Evolution University of Arizona
SOPFEU	Société de protection contre les incendies de forêts
SRES	Special Report on Emissions Scenarios

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉ DE TEMP

h Heure

Puissance

MW Mégawatt

MWh Mégawatt heure

UNITÉS DE BASE

mm Millimètre

Aire

km² Kilomètre carré

Volume

hm³ Hectomètre cube

Débit

M³/s Mètre cube seconde

UNITÉ CALORIFIQUE

°C Degré Celsius

INTRODUCTION

Un consensus est en majeure partie établi dans la communauté scientifique sur le fait que les changements climatiques sont réels et d'origine anthropique (GIEC 2007). Si l'ampleur que prendront ces changements demeure incertaine, il est clair que des adaptations seront nécessaires à la préservation de notre mode de vie. Les efforts des chercheurs s'orientent désormais de plus en plus vers l'adaptation aux changements climatiques.

Les études montrent clairement que la distribution de l'eau de surface et les régimes hydrologiques seront perturbés par les changements climatiques. Le Québec, avec un million de lacs et ses 130 000 cours d'eau couvrant douze pour cent de la superficie de la province, sera considérablement concerné par ces changements. En 2011, le Québec est le premier producteur d'hydroélectricité au monde. Hydro-Québec, société d'état exploitant le parc de production électrique, gère en 2011, une puissance installée de 34 499 MW liés à l'hydroélectricité, soit 92% de la puissance installée totale du parc. Cette dépendance aux ressources hydriques entraînera une réflexion sur la stratégie d'exploitation des ouvrages de production hydroélectrique face aux changements climatiques.

Plusieurs publications ont porté sur les impacts des changements climatiques appliqués aux ressources hydriques. Plus récemment, Minville *et al.* (2008) proposaient une étude sur l'adaptation des règles de gestion par optimisation. Cette approche permet, sans investissement matériel supplémentaire, d'optimiser le rendement des installations par une utilisation adaptée des règles de gestion aux nouvelles conditions hydrologiques. Le présent travail poursuit sur cette voie avec une étude de cas sur l'estimation du potentiel de l'optimisation des règles de gestion en condition de changements climatiques sur la production hydroélectrique du bassin versant de la rivière Manicouagan au Québec. Le bassin versant Manicouagan, avec sa superficie de 45 900 km², génère par ses installations hydroélectriques près de 18 % de la production électrique québécoise. Second bassin versant en importance du parc de production d'Hydro-Québec, le rendement futur du système

hydrique de la rivière Manicouagan pourrait devenir un enjeu considérable face aux changements climatiques.

Ce rapport se divise en neuf chapitres. Vu l'étendue des sujets abordés durant ce travail, afin de simplifier la lecture de ce mémoire, les chapitres abordant les opérations majeures sont rédigés sous forme de volumes comportant une méthodologie, résultats, discussion et recommandations, au besoin.

Le premier chapitre introduit les différents outils nécessaires à l'accomplissement de ce travail. Il y est discuté des modèles climatiques, hydrologiques, des projections climatiques et de l'optimisateur de règles de gestion.

Le second chapitre expose la problématique de recherche par une introduction aux changements climatiques et leurs impacts sur le climat du Québec. Une fois mis en contexte, l'objectif ainsi que les hypothèses y sont posés.

Le troisième chapitre est dédié à la méthodologie générale de cette étude de cas. Les étapes menant à l'objectif final de ce travail y sont exposées et brièvement décrites.

Le quatrième chapitre introduit le bassin versant et le réseau hydrographique de la rivière Manicouagan. Les caractéristiques physiques du réseau hydrographique ainsi que la composition du système hydrique y sont discutées.

Le cinquième chapitre présente en premier lieu les données hydrométéorologiques disponibles. Suit la méthodologie adoptée pour l'analyse de ces données. Les résultats y sont ensuite discutés puis, finalement, des recommandations sont proposées pour des études ultérieures.

Le sixième chapitre concerne le calage du modèle hydrologique. En premier point, la problématique liée à l'utilisation d'un modèle global calé sur le présent pour étude en

condition de climat modifié est discutée. Suite à ceci, une méthodologie est proposée pour contourner cette problématique. Finalement, les résultats de cette méthode y sont exposés puis discutés.

Le septième chapitre présente la méthode utilisée lors de la création des scénarios climatiques. Les résultats sont par la suite discutés pour mettre en évidence les modifications apportées au régime hydrologique causées par les changements climatiques.

Le chapitre huit complète le traitement des données et des simulations. Il expose la méthode de simulation du système hydrique et d'optimisation des règles de gestion qui permettent d'estimer l'impact des changements climatiques sur la productivité et le rendement.

Finalement, les chapitres des résultats (chapitre 9) et discussion (chapitre 10) présentent une synthèse des simulations du système hydrique, en conditions actuelles et futures sous changement climatique avec ou sans adaptation des règles de gestion. Les résultats étudiés sont ceux de l'étude de la production d'électricité, des niveaux des réservoirs ainsi que ceux des déversements non productifs. La discussion met en lumière les tendances issues de l'interprétation des résultats

CHAPITRE 1

LES OUTILS

Le présent chapitre présente les différents outils utilisés qui ont été nécessaires à l'avancement de cette étude.

1.1 Modèles de circulation du climat global

Les modèles de circulation du climat global (MCG) sont des modèles numériques, basés sur l'équation de Navier-Stokes, développés pour simuler les interactions thermodynamiques entre la lithosphère, l'atmosphère et l'hydrosphère de notre planète. Ces modèles sont largement utilisés en prévisions météorologiques, dans le cadre d'études sur le climat et pour l'extrapolation du climat en changements climatiques. Par la modification des intrants du modèle, une projection différente de l'évolution du climat présent est générée. De cette façon, par des perturbations représentatives des potentielles augmentations de gaz à effet de serre, il est possible d'observer l'impact de ceux-ci sur le climat dans le futur. Dans le cadre de cette étude, les six MCG suivants ont été retenus : le BCCR de la Norvège, le CSIRO de l'Australie, l'INM de la Russie, le MIROC du Japon, le GISS et le NCAR des États-Unis.

1.2 Projections climatiques

Une projection climatique est une représentation du climat potentiel résultant d'un état démographique, économique et environnemental précis de la terre. Cet état détermine la quantité de gaz à effet de serre rejeté sur l'ensemble de la Terre sous forme de scénario d'émission de gaz à effet de serre. Ces scénarios sont insérés dans les MCG pour générer un climat modifié aussi nommé projections climatiques.

Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre utilisés proviennent du Special Report on Emission Scenarios (SRES 2000). Ce document est une normalisation des scénarios

employés dans le cadre des études sur les changements climatiques qui facilitent une intercomparaison de ces études sur une même base.

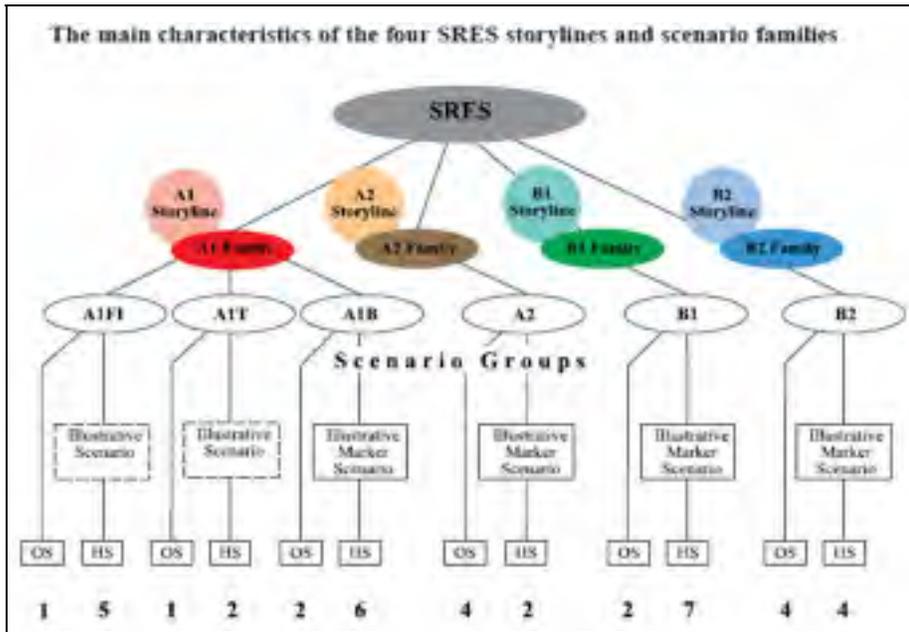


Figure 1.1 Classification des scénarios d'émission de gaz à effet de serre
Tirée de GIEC (2007)

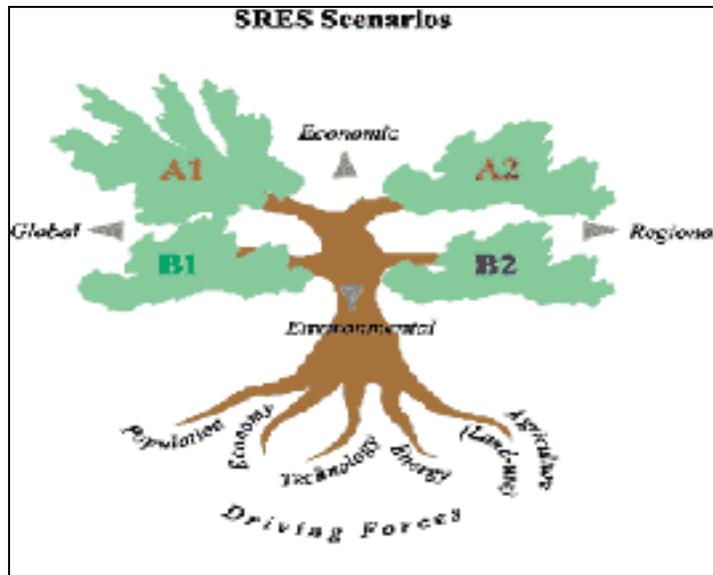


Figure 1.2 Quatre grandes familles des scénarios SRES
Tirée de GIEC (2007)

Le SRES comporte 40 scénarios (voir la Figure 1.1) qui représentent chacun un état potentiel de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre. Plus précisément, ces scénarios d'émission varient selon les cinq facteurs prédominants qui régissent la croissance mondiale : la démographie, l'économie, l'énergie, les technologies et l'agriculture. Les scénarios sont regroupés sous quatre grandes familles : A1, A2, B1 et B2 (voir la Figure 1.2). Ces quatre familles se caractérisent par leur emphase sur un développement économique durable ou non, appliqué à une échelle régionale ou mondiale. De ces quatre grandes familles, trois scénarios sont utilisés dans le cadre de cette étude : A2, B1 et A1B. A1B, sous catégorie de A1, représente une économie globale fortement à la hausse et profitant pour ses besoins énergétiques des nouvelles technologies autant que des ressources fossiles (plus ou moins durable).

1.3 Modèle hydrologique HSAMI

HSAMI est un modèle hydrologique développé au milieu des années 80 chez Hydro-Québec. Ce modèle a pour fonction la simulation et la prévision à court terme des apports naturels et des débits à l'exutoire des réservoirs (Fortin 2000). Au Québec, les données du type de sol, de condition du sol, de végétation et météorologique de qualité et continues sur de longues périodes se font rares dès que l'on s'éloigne des grands centres urbains. Cette couverture limitée rend les modèles distribués difficilement utilisables. HSAMI, un modèle global, ne requiert que peu de données. Seules les observations ou prévisions météorologiques de la température minimum/maximum, des précipitations pluie/neige ainsi que la superficie du bassin versant sont nécessaires.

Ce modèle possède un inconvénient majeur. Les bases empiriques d'HSAMI qui rendent le modèle fonctionnel avec peu de données, en font un modèle fortement paramétré. Cette forte paramétrisation expose l'utilisateur d'HSAMI à la problématique de l'équifinalité lors du calage de celui-ci. La Figure 1.3 présente le schéma d'HSAMI.

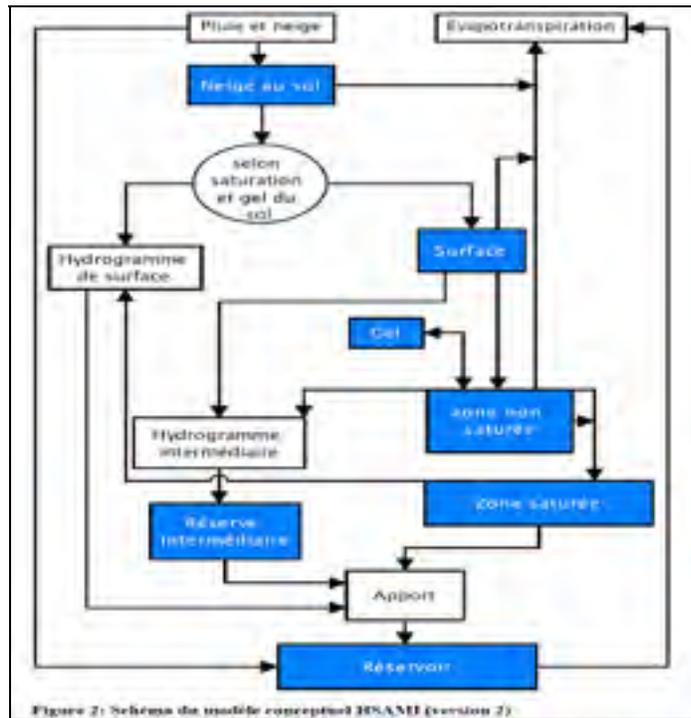


Figure 1.3 Schéma du modèle conceptuel HSAMI
Tiré de Fortin (2000)

Ce modèle conceptuel à temps discret est construit autour de trois réservoirs en cascade. Ces trois réservoirs représentent les trois milieux d'emmagasinement et du mouvement de l'eau : la surface du sol, la zone saturée et la zone non saturée du sol. Pour chaque pas de temps, l'eau est dirigée d'un réservoir à l'autre suivant les équations empiriques d'infiltration et d'évapotranspiration pour simuler le mouvement vertical du cycle hydrologique. Les écoulements horizontaux (ruissellement et autre écoulement vers l'exutoire) sont laminés par l'utilisation d'hydrogrammes unitaire de surface et intermédiaire.

Le calage de ce modèle requiert la manipulation des 23 paramètres (voir Tableau 1.1) qui interviennent dans les cinq principaux processus hydrologiques, soit : l'évapotranspiration, la fonte de la neige, le ruissellement de surface, l'écoulement vertical puis finalement, l'écoulement horizontal.

Tableau 1.1 Description des 23 paramètres d'HSAMI

Paramètres liés à l'évapotranspiration	
efficacite_evapo_ete	facteur multipliant l'ETP permettant d'estimer l'ETR en été
efficacite_evapo_hiver	facteur multipliant <i>efficacite_evapo_ete</i> *ETP permettant d'estimer l'ETR en hiver
Paramètres liés à la fonte de neige	
taux_fonte_jour (cm/ Δ C/jour)	taux de fonte du couvert nival, en cm/jour, pour chaque degré Celcius d'écart entre la température maximale et le seuil <i>temp_fonte_jour</i>
taux_fonte_nuit (cm/ Δ C/jour)	taux de fonte du couvert nival, en cm/jour, pour chaque degré Celcius d'écart entre la température minimale et le seuil <i>temp_fonte_nuit</i>
temp_fonte_jour (C)	seuil de température maximale à partir duquel le couvert de neige peut fondre
temp_fonte_nuit (C)	seuil de température minimale à partir duquel la fonte du couvert de neige est accélérée
temp_ref_pluie (C)	température de référence par rapport à laquelle on calcule la chaleur apportée par la pluie au couvert nival
effet_redoux_sur_aire_enneigee	paramètre empirique utilisé pour relier les variables d'état <i>neige_au_sol_totale</i> et <i>fonte_totale</i> à la proportion du bassin couvert par de la neige
Paramètres liés à l'estimation du ruissellement de surface	
effet_gel	paramètre empirique utilisé pour relier l'écart entre les variables d'état <i>gel</i> et <i>degel</i> à la proportion de l'eau de fonte qui ruisselle en surface
effet_sol (cm)	quantité de pluie sur 24h nécessaire pour que 50% de cette eau ruisselle en surface lorsque le sol est complètement sec (i.e. la réserve <i>sol</i> est égale à zéro)
seuil_min (cm)	quantité de pluie sur 24h nécessaire pour que 50% de cette eau ruisselle en surface lorsque le sol est saturé (i.e. la réserve <i>sol</i> est égale à <i>sol_max</i>)
Paramètres liés à l'écoulement vertical de l'eau dans le sol	
sol_min (cm)	quantité d'eau dans la zone non-saturée qui ne peut s'écouler par gravité
sol_max (cm)	quantité maximale d'eau que peut contenir la zone non-saturée du sol
nappe_max (cm)	quantité maximale d'eau que peut contenir l'aquifère avant de générer un ruissellement de surface
portion_ruissellement_surface	proportion de l'eau en surface qui ruisselle via l'hydrogramme intermédiaire au lieu de cheminer à travers la colonne de sol
portion_ruissellement_sol_max	proportion de l'eau qui ruisselle via l'hydrogramme intermédiaire lorsque la réserve non-saturée déborde (le reste est acheminé vers la nappe)
taux_vidange_sol_min (24h-1)	taux de vidange de la zone non-saturée vers la nappe
taux_vidange_nappe (24h-1)	taux de vidange de la nappe, cette vidange constituant le débit de base
Paramètres liés à l'écoulement horizontal de l'eau vers l'exutoire	
taux_vidange_inter (24h-1)	taux de vidange de la réserve intermédiaire, cette vidange constituant l'apport intermédiaire
mode_hydrogramme_surface (jour)	pointe de l'hydrogramme unitaire de surface
forme_hydrogramme_surface	paramètre de forme de l'hydrogramme de surface (selon une fonction de distribution gamma)
mode_hydrogramme_inter (jour)	pointe de l'hydrogramme intermédiaire
forme_hydrogramme_inter	paramètre de forme de l'hydrogramme de surface (selon une fonction de distribution gamma)

Les paramètres 1 à 19, d'origine empirique, possèdent tout de même une certaine base physique liée à la nature du sol, aux caractéristiques de fonte de la neige et/ou aux propriétés climatiques locales. Ces paramètres tendent à créer un lien physique entre le modèle calé, la géomorphologie et la climatologie locale du sous bassin. Les paramètres 20 à 23 représentent le mode et la forme de la distribution Gamma nécessaire pour recréer les hydrogrammes de surface et intermédiaire nécessaires au laminage des écoulements horizontaux. Ces quatre derniers paramètres sont principalement fonction de la superficie des sous bassins. Cette dernière caractéristique fait des paramètres 20 à 23 les principaux paramètres distinguant les sous bassins qui par leur proximité pourraient être considérés homogènes, par géomorphologie et climatologie.

1.4 Optimisateur de règle de gestion PPS2

L'optimisation des règles de gestion des réservoirs est un enjeu important à la sécurité et à la rentabilité des installations hydroélectriques modernes (Labadie 2004). La programmation dynamique (PD), outil de prédilection dans ce domaine (Z. X. Fang. *et al.* 1989), a été définie par Bellman (1957) comme étant une technique algorithmique qui permet de résoudre des fonctions non linéaires. La programmation dynamique stochastique (PDS) ajoute à la PD l'élément probabiliste de l'incertitude lié au futur (Turgeon 2005).

La PD consiste à résoudre de manière récursive l'équation 1.1 pour obtenir un soutirage optimum:

$$f_t(S_{1,t}, \dots, S_{M,t}) = \frac{R}{Q} \left\{ \max_U \left[\sum_{i=1}^M h_i(S_{i,t}) \cdot U_{i,t} + f_{t+1}(S_{1,t+1}, \dots, S_{M,t+1}) \right] \right\} \quad (1.1)$$

Où M représente le nombre de réservoirs et $S_{i,t}$ le volume d'eau présent au réservoir i de la période t . Q et R sont les variables représentant les apports naturels et les soutirages en hm^3 . $U_{i,t}$ est le débit à turbiner à la centrale i pour la période t qui représentant la consigne d'exploitation optimum de génération électrique. $h_i(S_{i,t})$ est la génération moyenne en

mégawatt heure produite par hm^3 tenant compte du volume présent au réservoir à une période donnée (Turgeon 2007).

Cette équation consiste en une sommation des solutions issues de sous-problèmes optimisés localement. Dans ce cas le sous-problème est de déterminer à un pas de temps précis, le soutirage procurant un rendement (soutirage /production) optimal et menant à un état du réservoir optimal au pas de temps suivant. Les pas de temps précédents deviennent autant de sous-problèmes à résoudre puis à ajouter à la sommation. L'incertitude entourant les apports naturels à venir ajoute une dimension probabiliste à ce problème qu'une méthode déterministe ne peut résoudre. L'analyse des historiques permet de déterminer, pour chacun des pas de temps, la distribution la plus représentative des apports naturels (lois Normale, Gamma, Log-normale à un ou deux paramètres). Ces distributions permettent d'identifier l'apport naturel le plus probable de survenir au pas de temps suivant et d'identifier l'objectif cible optimum, soit un soutirage maximisant la production d'énergie et le niveau des réservoirs.

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

Ce chapitre présente le phénomène des changements climatiques puis le place dans un contexte d'application au territoire québécois. La problématique liée à la gestion des ressources hydriques au Québec sous un climat modifié y est discutée.

2.1 Les changements climatiques

La Terre connaît depuis toujours des changements climatiques. Si le consensus sur l'existence réelle d'un réchauffement climatique est récent, l'acceptation de l'origine anthropique de ce dernier l'est encore plus.

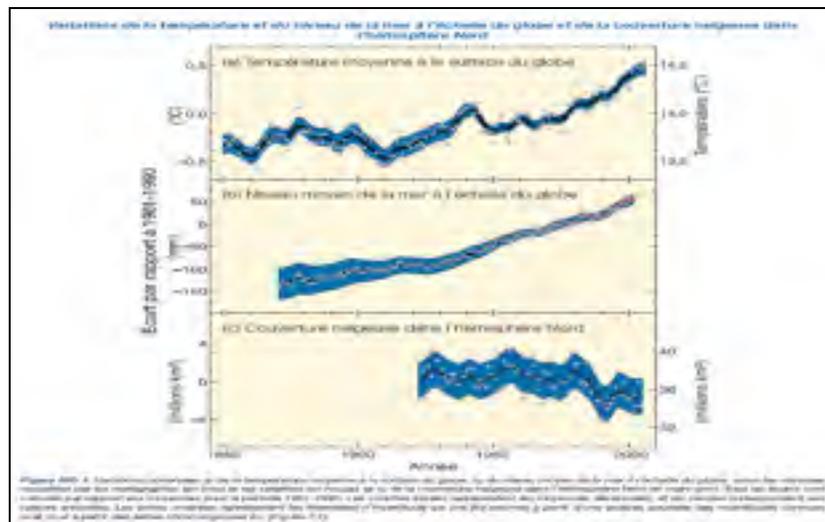


Figure 2.1 Variation de la température, du niveau de la mer à l'échelle du globe et du couvert nival de l'hémisphère nord
Tirée du GIEC (2007)

Les études démontrent que des hausses sensibles de la température globale de la terre ont été observées. De 1995 à 2006, onze années figurent parmi les plus chaudes depuis 1850 (début des mesures globales de la surface de la terre) (GIEC 2007). La Figure 2.1 démontre cette

progression toujours plus rapide des hausses des températures moyennes du globe ainsi que de ses indicateurs tels que la hausse du niveau de la mer due à la dilatation thermique et de la réduction du couvert de neige dans l'hémisphère nord. Cette progression est fortement corrélée à l'augmentation toujours plus soutenue des émissions de GES depuis l'amorce de l'ère industrielle (voir Figure 2.2). Les scientifiques du GIEC ont établi avec un niveau de certitude supérieur à 90 % que les changements climatiques en cours sont bien d'origine anthropique.

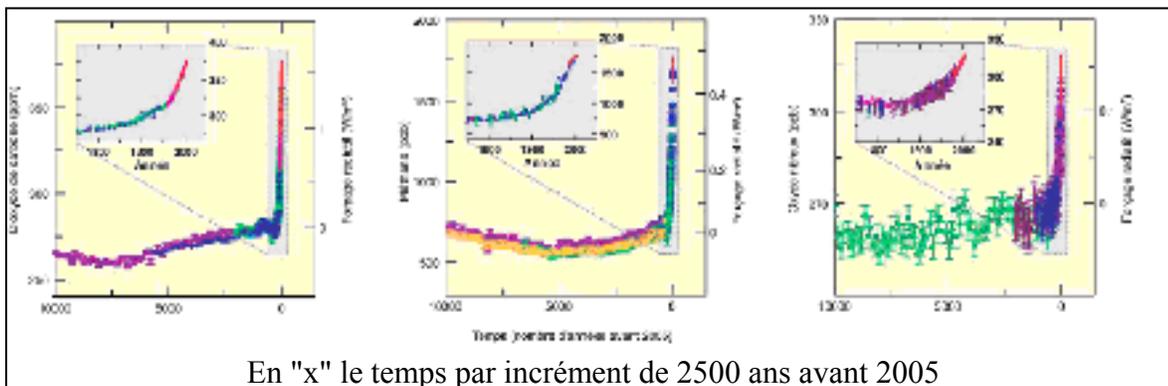


Figure 2.2 Évolution des principaux gaz à effets de serre
Tirée du GIEC (2007)

Globalement, les changements climatiques auront pour principaux impacts une augmentation des températures, plus marquée dans les régions polaires et durant les saisons froides, d'accentuer les tendances présentement observées et d'augmenter, en fréquence et en intensité, les événements extrêmes. Ce qui représente un réchauffement marqué des zones polaires, arctiques et subarctiques, des moussons et sécheresses plus intenses ainsi que des événements extrêmes plus fréquents et violents.

2.2 Impacts des changements climatiques au Québec

Le Québec, par sa situation géographique profite d'un climat continental humide dans la portion sud du 50^e parallèle, subarctique dans sa portion nord et arctique au-delà du 58^e parallèle. Cette position soumet le Québec à des hivers rigoureux, des précipitations

moyennes variant de 400 mm à 900 mm dont une forte portion sous forme de neige, des températures moyennes de 5 °C à 20 °C en été et de -10 °C à -25 °C en hiver. Les principaux changements climatiques auxquels le Québec doit faire face sont le réchauffement de la température principalement en hiver et durant les nuits d'été. Des hausses considérables des précipitations sont attendues sur la portion centre-nord du Québec alors que sur le sud, ces hausses sont plus mitigées et incertaines. Ces changements auront un impact considérable sur l'hydraulicité des bassins versants québécois qui sont fortement conditionnés par la période de gel hivernal. Les apports naturels en hiver, habituellement faibles dus au gel, devront être revus à la hausse par l'arrivée de pluie et redoux plus fréquents dus à la hausse de température. Les crues printanières, événements prédominants de l'hydrologie québécoise, seront plus précoces et potentiellement plus faibles dû au stock de neige réduit suite aux hivers plus doux. La période estivale connaîtra des étiages plus sévères dans le sud de la province dû à l'évapotranspiration accrue par les hausses de température. Par contre, le centre et le nord de la province pourront maintenir la condition actuelle en période d'étiage et dans certains cas bénéficier d'une hausse de débit significative.

2.3 Problématique et contexte

Les changements climatiques, tel que déjà mentionné, viendront perturber les régimes hydrauliques actuels. Des changements aux régimes hydrologiques représentent un défi au mode de production d'hydro-électricité (Lemmen *et al.* 2008). Actuellement les règles de gestion sont déterminées par l'analyse de la variabilité des apports historiques sous l'hypothèse d'une stationnarité de ceux-ci. Depuis quelques décennies les impacts des changements climatiques sur l'hydrologie québécoise sont observables (Whitfield et Cannon 2000). L'hypothèse de stationnarité du climat et des régimes hydrologiques doit donc être remise en question. Jusqu'à récemment au Canada et aux États-Unis, les études portaient sur l'impact d'un climat modifié sur la performance future potentielle des systèmes hydriques selon le mode de gestion actuel. Minville *et al.* (2008) ont plus récemment proposé l'adaptation des règles de gestion en considérant l'incertitude des scénarios d'émission de GES et des modèles climatiques. Ces études ont démontré qu'une adaptation des règles de

gestion est nécessaire au maintien de la performance des systèmes hydriques. Minville et *al.* (2009, 2010) démontrent que selon les scénarios, une adaptation des règles pouvait non seulement maintenir, mais augmenter ce potentiel de performance.

2.4 Objectifs du mémoire

L'objectif de ce travail est en premier lieu de déterminer l'impact des changements climatiques sur l'hydraulicité puis sur la production hydroélectrique du bassin versant Manicouagan. Une fois ces impacts quantifiés, l'objectif principal est l'étude du potentiel adaptatif du système hydrique de la rivière Manicouagan par l'optimisation des règles de gestions des réservoirs. L'analyse de ces résultats permet de mettre en lumière les gains ou pertes potentiels en production pour les différents horizons futurs. Ces résultats seront aussi un premier indicateur d'un potentiel besoin d'adaptation des infrastructures dans un cas où l'adaptation des règles de gestion n'arrive pas à pallier aux impacts avec un intervalle de confiance suffisant.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

L'approche préconisée pour ce travail est une étude de cas sur le système hydrique de la rivière Manicouagan. L'objectif est la simulation des conditions actuelles d'hydraulicité (période de contrôle 1971-2000) puis celles futures (horizons 2025, 2055 et 2085) perturbées par les changements climatiques. De ces scénarios d'hydraulicité, les scénarios de production d'hydro-électricité sont générés et permettent l'analyse finale. La comparaison entre les résultats de la période de contrôle et ceux des horizons futurs sans optimisation des règles de gestion permet d'estimer les variations de l'hydraulicité et de la production hydro-électrique dues aux changements climatiques. Une comparaison de la période de contrôle et des horizons futurs avec règles de gestion optimisées permet d'estimer les variations combinées dues aux changements climatiques et à l'adaptation. Finalement, une comparaison des résultats horizons futurs en mode optimisé et non optimisé permet d'isoler la variation due uniquement à l'optimisation des règles de gestion.

Ce chapitre présente la méthodologie et les lignes directrices adoptées pour chacune des étapes menant à l'analyse finale des résultats de la production hydro-électrique. Pour plus de détails sur les procédures concernant chacun des points abordés, des références aux chapitres et sections correspondants sont disponibles à la fin de chacun des points détaillés.

3.1 Traitement des données météorologiques

Initialement, les données météorologiques observées sont issues des réseaux de stations météorologiques d'Environnement Canada, de la SOPFEU, des aéroports et autres organismes tels que les groupes de recherche universitaires. De ces données brutes sont issues quatre séries interpolées sous différentes méthodes. Pour déterminer la série offrant la meilleure représentativité spatiale des observations, une première analyse est effectuée par calage et validation du modèle hydrologique HSAMI. Le critère de performance retenu est le coefficient de Nash-Sutcliffe. La série obtenant des coefficients de Nash-Sutcliffe supérieurs

tant en calage, en validation qu'en terme d'écart entre ceux-ci est considérée de qualité supérieure. Pour s'assurer de la robustesse des données identifiées comme étant de qualité supérieure sur les bassins versants de la rivière Manicouagan, l'exercice est repris sur le bassin versant de la rivière Châteauguay.

Pour plus de détails sur les bases de données, la procédure d'analyse ainsi que les résultats, voir le chapitre 5.

3.2 Les projections climatiques

Pour créer un scénario d'apports futurs, des projections climatiques futures sont nécessaires. La série de données météorologiques sélectionnée selon la méthode décrite à la section 3.1 est utilisée comme base à la création des scénarios météorologiques futurs sous divers climats modifiés. La méthode des deltas (Diaz-Nieto et Wilby 2005; Hay *et al.* 2000) est utilisée pour convertir ces historiques météorologiques en scénarios futurs. Les valeurs delta utilisées par cette méthode sont issues de six MCG soumis à trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Au total, vingt combinaisons modèles-scénarios sont disponibles. Pour démontrer l'évolution temporelle de ces scénarios climatiques, les horizons 2025, 2055 et 2085 ont été retenus. Une fois cette méthode appliquée, les vingt séries de météorologie modifiées forment les projections météorologiques futures à introduire dans un modèle hydrologique. Cette dernière opération génère les scénarios d'apports futurs nécessaires à la poursuite de l'étude. Pour plus de détails sur les scénarios, la procédure ainsi que les résultats, voir le chapitre 7

3.3 Le calage du modèle hydrologique

Un modèle calé sur le climat présent est-il apte à simuler les apports en climat modifié? Le calage du modèle hydrologique HSAMI en est un exemple intéressant. Un calage automatique comme il est souvent utilisé de nos jours permet de bons résultats en climat présent. Peut-on poser l'hypothèse que l'on peut transposer un modèle empirique calé sur des conditions présentes à une étude en climat modifié? Dans le but d'éliminer une part de ces

incertitudes dues au calage d'un modèle empirique, la méthode de calage en parallèle est expérimentée pour tenter de donner au modèle une base plus près de la physique et plus robuste en conditions de changements climatiques.

Le calage en parallèle consiste en un calage de tous les sous bassins en simultané avec objectif d'obtenir un seul jeu de paramètres qui offre un rendement satisfaisant à chacun des sous bassins. Ceci a pour effet d'uniformiser les réactions aux divers sous bassins, tels que la fonte de la neige, le gel/dégel du sol, etc. En principe, le modèle hydrologique calé ainsi devrait être plus robuste, dans le présent et le futur.

Pour plus de détails sur la procédure d'analyse ainsi que les résultats voir le chapitre 6.

3.4 La modélisation

Deux types de modélisation sont nécessaires à cette étude. La modélisation hydrologique à l'aide de HSAMI et la modélisation du système hydrique par bilan de masse.

3.4.1 La modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique se fait ici par l'intermédiaire du modèle HSAMI. Cette opération permet de traiter les données météorologiques et d'estimer les apports naturels correspondant à l'exutoire du bassin versant. Par ce procédé, les soixante projections climatiques (vingt scénarios et trois horizons) obtenues selon la méthode décrite à la section 3.2 sont converties en scénarios d'apports futurs pour chacun des sous bassins de la rivière Manicouagan.

Pour plus de détails sur le modèle hydrologique ainsi que sur les résultats, voir la section 1.3 et le chapitre 6.

3.4.2 La simulation du système hydrique

Les apports sont soumis en premier lieu à un optimisateur de règles de gestions (PPS2) qui a pour objectif l'optimisation de la production hydroélectrique. Cet optimisateur analyse puis génère, à partir des données historiques d'apports naturels, des règles dictant les débits à soutirer (turbiner et déverser) à chacun des réservoirs, en fonction du niveau de ceux-ci.

Une fois les règles optimisées, le simulateur de système hydrique, fonctionnant sur une base de bilan hydrique, utilise ces règles pour exécuter le routage des volumes d'eau s'écoulant d'un sous-bassin à l'autre, à chaque pas de temps. Le volume d'eau s'écoulant à chaque centrale pour ce même pas de temps est ainsi calculé et combiné à la puissance des groupes turbine-alternateur en place pour évaluer la production hydroélectrique. Finalement, les niveaux des réservoirs sont réajustés en considérant les apports naturels, les soutirages des sous bassins en amont et le soutirage propre à ce réservoir. Ce simulateur couplé à l'optimisateur de règles de gestion permet d'obtenir, sur un pas de temps prédéterminé, la génération électrique, les niveaux des réservoirs ainsi que les déversements productifs et non productifs à chacune des centrales hydroélectriques.

Dans un premier temps, une simulation des historiques avec une optimisation des règles de gestion est effectuée. Cette dernière doit servir de période de référence. Ensuite, tous les scénarios d'apports futurs sont simulés à leur tour en conservant les règles de gestion optimisées sur la période de référence. Ces résultats, comparés à ceux de la période de référence, permettent de quantifier les variations dues aux changements climatiques.

Une seconde simulation des scénarios est exécutée, cette fois-ci en optimisant les règles de gestion sur les scénarios futurs. Ces derniers résultats, confrontés aux précédents, permettent de déterminer les variations dues à l'optimisation des règles de gestion.

CHAPITRE 4

BASSIN VERSANT ET SYSTÈME HYDRIQUE DE LA RIVIÈRE MANICOUAGAN

Le présent chapitre a pour tâche de présenter le bassin versant de la rivière Manicouagan. En premier lieu, la localisation suivie d'une description des principales caractéristiques naturelles de chacun des sous bassins permettra de mieux comprendre la dynamique de cette rivière. À ceci suivra une description du système hydrique et de ses composantes.

4.1 Description du bassin versant

S'intégrant à la région de la Côte-Nord au Québec, le bassin versant de la rivière Manicouagan s'étend au nord de Baie-Comeau où se situe son exutoire. D'une superficie totale de 45636 km², ce bassin en territoire forestier est divisé en six (6) sous bassins (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Caractéristiques des sous-bassins de la rivière Manicouagan

Sous bassins	Superficie (Km ²)	Réservoir (Km ²)	Puissance installée (MW)
Manic-5	24 610	1 973	2 592
Manic-3	4 245	N/A	1 244
Manic-2	4 100	N/A	1 041
Manic-1	7.5	N/A	184
Petit Lac Manicouagan	4 565	228	50
Toulnustouc	8 109	235	526
Total	45 636.5	2436	5 637

Manic-5 constitue le sous-bassin principal du réseau en superficie et en capacité de production avec 54 % de la superficie totale du bassin versant. Ce bassin versant est soumis à un climat subarctique continental, avec des hivers froids et secs favorisant de fortes accumulations de neige. Le régime hydrologique de la rivière Manicouagan est dominé par de fortes crues printanières, résultats directs de l'important couvert nival typique de cette

région. La région, localisée dans le Bouclier canadien, possède un relief accidenté parsemé de collines et petites montagnes, favorisant la formation des lacs qui criblent le secteur. Le dénivelé de près de 360 mètres, entre l'île René-Levasseur et l'exutoire dans l'axe nord-sud, favorise quant à lui la formation des nombreuses rivières, dont celles formant le réseau de la rivière Manicouagan.

4.2 Les installations hydroélectriques

Le système hydrique Manicouagan est fortement régularisé par les diverses centrales hydroélectriques, barrages et réservoirs formant deux voies de cheminement partiellement indépendantes tel que démontré par le schéma de la Figure 4.1.

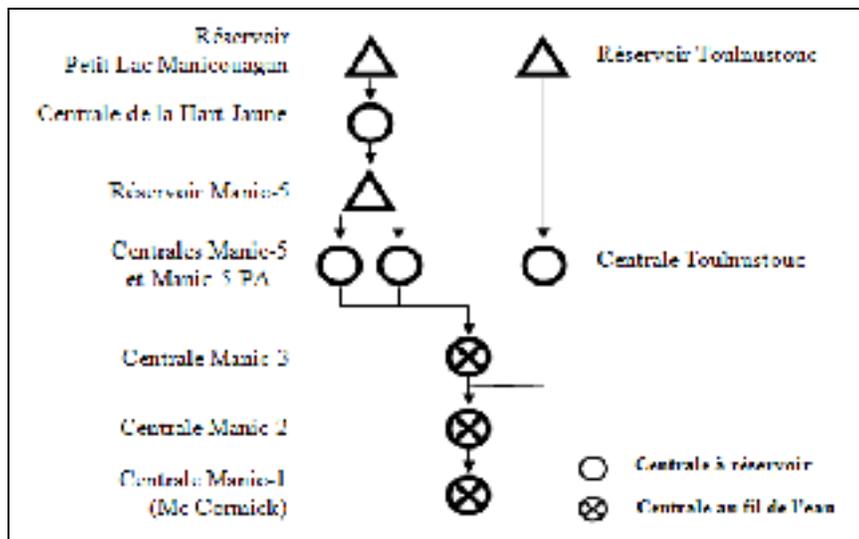


Figure 4.1 Schéma du système hydrique de la rivière Manicouagan

La voie de cheminement principale débute par le sous-bassin Petit Lac Manicouagan constitué du réservoir du même nom et de la centrale Hart-Jaune. Suite à ce premier turbinage, l'eau est acheminée en direction du réservoir Manic-5. Ce réservoir est couplé à deux centrales, Manic-5 et Manic-5-PA qui constituent le cœur de ce système hydrique avec une puissance de production combinée de 2 592 MW soit 46 % de la capacité de l'ensemble du bassin versant. Suite à ce réservoir, l'eau chemine par la rivière Manicouagan vers les

centrales au fil de l'eau de Manic-3, Manic-2 puis Manic-1 située à l'exutoire du bassin versant.

La seconde voie est constituée du réservoir et de la centrale du sous-bassin Toulnostouc. De celle-ci, l'eau chemine par la rivière Toulnostouc jusqu'à rejoindre les flots de la rivière Manicouagan en amont de la central Manic-2, puis finalement vers Manic-1.

CHAPITRE 5

LES DONNÉES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES

Ce chapitre a pour objectif de présenter et définir en premier lieu les différentes sources de données disponibles lors de cette étude. Suivra ensuite la méthodologie adoptée pour l'analyse des différentes sources de données météorologiques. Finalement le résultat de cette analyse qui a pour objectif de déterminer la source à adopter pour la poursuite de l'étude, sera présenté. Ultiment, des recommandations sont émises concernant la source sélectionnée.

Du point de vue météorologique, seuls les paramètres des températures minimum, maximum ainsi que les précipitations cumulées à un pas de temps de 24 h sont nécessaires dans cette étude. Pour les besoins de HSAMI, les précipitations cumulées sont divisées en pluie et en équivalence d'eau pour la neige. Les précipitations soumises à une température moyenne de plus de deux degrés Celsius ont été considérées sous forme de pluie, alors que sous la barre de moins deux degrés Celsius elles sont sous forme de neige. Pour celles se situant à l'intérieur de l'intervalle de moins deux et deux degrés Celsius, les précipitations ont été distribuées proportionnellement en fonction de la température moyenne vs le point centre de zéro Celsius.

5.1 Données hydrologiques

Dans le cadre de cette étude, seules les données hydrologiques d'apports naturels sont disponibles sur l'ensemble de ce bassin versant. Les apports naturels sont en premier lieu estimés aux réservoirs Manic-5, Toulnostouc puis Petit Lac Manicouagan. Ces apports sont déduits des variations des volumes d'eau présents aux réservoirs, qui eux sont estimées à partir de relation de type polynomial en fonction des niveaux de ces réservoirs. Ceci fait, les apports naturels de Manic-3, 2 puis finalement 1 sont déduits par bilan hydrique.

Les mesures de niveau aux réservoirs étant plus ou moins biaisées par différents facteurs tels que le vent, les vagues et les manœuvres des groupes turbines-alternateurs, ces apports calculés sont dits « bruités ». Ces apports bruités sont filtrés et traités par les hydrométéorologues d'Hydro-Québec.

5.2 Données météorologiques

Les données météorologiques sont les intrants principaux de l'étude hydrologique. La précision et la cohérence de ces valeurs sont indispensables à l'obtention de résultats adéquats. La longueur de la série de données historiques continue est, quant à elle, le critère permettant d'atteindre une précision adéquate à l'opération de calage d'HSAMI. Par sa nature sensible aux divers changements, interférences et méthodes de mesure des stations météorologiques, il est possible qu'une source de relevé météorologique soit erronée en partie ou en totalité. À ceci, s'ajoutent les diverses méthodes de calcul pour approximer une météorologie moyenne à chacun des sous-bassins nécessaire à un modèle hydrologique global tel que HSAMI. Pour le bassin versant Manicouagan, plusieurs sources de données sont disponibles et malgré qu'elles soient pour un même secteur, ces sources ont des valeurs plus ou moins divergentes qui conduiront à des résultats différents.

Dans le cadre de cette étude, quatre sources de données utilisant quatre méthodes de calcul différentes ont été retenues, soit : STATION, PQDH, IREQ et finalement NLWIS. Tous les résultats qui seront présentés sont ceux de météorologie moyennée pour chacun des sous-bassins du réseau hydrographique Manicouagan.

5.2.1 Les données météorologiques aux stations

La série de données météorologique nommée STATION est basée sur l'extraction des données de 51 stations météorologiques d'Environnement Canada. L'objectif d'une si grande sélection est d'obtenir une série de données ne présentant aucune discontinuité chronologique pour les températures et précipitations couvrant la plus longue période possible. La sélection

des stations s'est faite par l'inclusion de toutes les stations à l'intérieur d'un rayon de 200 kilomètres du bassin versant sous étude. Pour obtenir une météorologie moyennée, la méthode des polygones de Thiessen a été employée. Cette méthode a été retenue pour sa simplicité d'utilisation. Les polygones de Thiessen ont été revus de façon journalière afin de tenir compte de la disponibilité des données à chaque station. Il en résulte une série chronologique continue des météorologies moyennes pour chacun des sous bassins de la rivière Manicouagan couvrant la période de 1943 à 2008.

5.2.2 Les données météorologiques PQDH

Les données nommées PQDH sont les variables météorologiques compilées et utilisées par le groupe production d'Hydro-Québec. Ce sont ces données qui, utilisées lors du calage du modèle HSAMI, ont produit les jeux de paramètres qui sont toujours en utilisation chez Hydro-Québec pour la prévision des apports naturels. Ces données sont le résultat de diverses manipulations des données d'une sélection de 14 stations météorologiques d'Environnement Canada, d'Hydro-Québec et de la SOPFEU. De 1950 à 1960, une interpolation a été utilisée pour évaluer la météorologie moyenne à chacun des sous bassins. De 1960 à 2003, les polygones de Thiessen ont été appliqués. Puis, finalement, de 2003 à 2009, un krigeage linéaire a permis de distribuer les données météorologiques pour obtenir une couverture complète et régulière de la zone avant d'être moyennée. Le résultat est une série de données couvrant la période de 1950 à 2009 sans discontinuité chronologique, mais avec une discontinuité méthodologique de traitement.

5.2.3 Les données météorologiques IREQ

Les données de la série IREQ proviennent d'un krigeage exécuté par les chercheurs de l'institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ). Les données d'origine utilisées pour ce traitement sont les observations météorologiques aux stations environnantes des sous bassins sous étude. Cette série couvre la période de 1960 à 2005.

5.2.4 Les données météorologiques NLWIS

Les données météorologiques NLWIS proviennent du Service National d'Information sur les Terres et les Eaux (voir l'annexe I). Ces données sont moyennées pour chaque sous-bassin à partir d'une grille interpolée selon la méthode ANUSPLINE V4.3 (Hutchinson *et al.* 2009). Cette interpolation a été produite à partir des observations aux stations météorologiques recensées par Environnement Canada.

5.3 Méthodologie

Cette section expose l'approche préconisée pour acquérir un niveau de confiance acceptable envers les données et sélectionner la source offrant un rendement optimum.

5.3.1 Les données hydrométriques

Un seul jeu d'apports naturels est disponible dans le cadre de cette étude. Les données obtenues sont celles générées par Hydro-Québec dans un cadre opérationnel. Aucune correction, modification et validation n'a pu être exécutée sur ces données. Certaines conclusions ont tout de même été tirées de ce jeu de données (voir les recommandations de la section 5.5.1).

5.3.2 Les données météorologiques

L'approche privilégiée est le calage et la validation automatique du modèle hydrologique HSAMI avec chacune de ces sources de données. Le coefficient de Nash-Sutcliffe est le critère d'évaluation retenu pour la comparaison des apports simulés (calage et validation) aux apports observés. Les périodes de calage (1974-1988) et de validation (1989-2003) ont été choisies arbitrairement. Pour s'assurer de la robustesse des résultats, une validation croisée a été effectuée dans chacun des cas. La validation croisée consiste à recalibrer et revalider le modèle en invertissant les périodes (calage sur 1989 à 2003 et validation sur 1974 à 1988).

Les coefficients de Nash-Sutcliffe ont été évalués sur leurs valeurs intrinsèques ainsi que sur l'écart du coefficient entre le calage et la validation. La source de données présentant les meilleures aptitudes (coefficient de Nash-Sutcliffe supérieur et écarts calage/validation minimaux) est sélectionnée.

Pour contre-vérifier la sélection, la procédure est reprise sur un nouveau bassin versant. La rivière Châteauguay, dû à ses débordements fréquents, est bien documentée et instrumentée (Simard 2008). Cette connaissance accrue de la rivière Châteauguay en fait un choix bien adapté à la vérification des données sélectionnées.

Dans le cas des sources de données interpolées, une comparaison entre les données observées aux stations météorologiques et celles aux points de grilles correspondants permet de confirmer la concordance de la sélection avec les observations pour le secteur sous études. L'idée étant ici de s'assurer que les données de toutes les stations ont été intégrées lors de l'opération d'interpolation.

La source présentant les meilleurs résultats à ces vérifications est sélectionnée pour poursuivre l'étude.

5.4 Résultats et discussion

Cette section expose une synthèse des résultats et réflexions ayant mené à la sélection de la source de données à utiliser. Tous les résultats bruts des essais de calages et validations peuvent être consultés à l'annexe II.

5.4.1 Les données hydrométriques

Les apports originellement disponibles pour cette étude couvrent Manic-5, 3, 2, Toulnostouc, et Petit Lac Manicouagan. Une réserve a été émise par le personnel d'Hydro-Québec concernant les données de certains sous-bassins. Des travaux sur le traitement des mesures de

niveau ayant pour objectif d'améliorer la précision sont en cours. Le traitement des données concernant Petit Lac Manicouagan n'étant pas complété et la méthode de filtrage de la portion exécutée n'étant pas constante (voir l'annexe III), ces valeurs concernant les apports naturels sont inutilisables sur ce sous bassin. En ce qui concerne les données de Manic-3 et 2, leurs évaluations par bilan hydrique déduit à même les estimations faites au réservoir amont ajoutent une incertitude considérable. De ce fait, elles sont considérées de qualité inférieure, mais acceptable. En ce qui a trait à Manic-1, la petite superficie de ce bassin versant versus les forts débits qui y transitent, combinés à la méthode du bilan hydrique, crée une incertitude excessive pour l'estimation des apports naturels. Pour ces raisons, les sous bassins Manic-1 et Petit Lac Manicouagan ont été exclus de l'étude.

Une seconde mise en garde est à considérer. Les données d'apports naturels analysées par HSAMI sont le résultat d'un traitement en parti manuel, basé sur l'expérience du prévisionniste ainsi que sur la performance d'HSAMI à modéliser les divers sous-bassins. La méthode de filtrage évolue dans le temps via les changements de prévisionniste attribué au bassin versant ainsi qu'aux modifications et recalage d'HSAMI. De plus, les résultats ont subi l'influence des améliorations du réseau de stations météorologiques. Pour tenter d'harmoniser le tout, diverses campagnes de traitement des historiques ont été effectuées à l'aide d'algorithmes purement statistiques. Ces traitements statistiques ne considéraient que les apports naturels omettant la relation directe entre la météorologie et les apports.

5.4.2 Les données météorologiques

Le Tableau 5.1 expose une synthèse des résultats de calage et validation croisée exercés sur les différents jeux de données météorologiques.

Tableau 5.1 Coefficients de Nash-Sutcliffe pour les exercices de calage/validation et validation croisée d'HSAMI

Jeu de données météorologique			STATION	PQDH	IREQ	NLWIS
Manic 2	1975-1989	calage	0,72	0,82	0,80	0,80
	1990-2004	validation	0,71	0,73	0,74	0,69
	1990-2004	calage	0,76	0,80	0,79	0,81
	1975-1989	validation	0,63	0,76	0,75	0,76
Manic 3	1975-1989	calage	0,71	0,73	0,77	0,75
	1990-2004	validation	0,59	0,79	0,75	0,61
	1990-2004	calage	0,77	0,83	0,81	0,81
	1975-1989	validation	0,56	0,68	0,72	0,67
Toulous.	1975-1989	calage	0,83	0,87	0,89	0,89
	1990-2004	validation	0,65	0,79	0,82	0,78
	1990-2004	calage	0,82	0,80	0,85	0,86
	1975-1989	validation	0,73	0,85	0,86	0,84
Manic 5	1975-1989	calage	0,86	0,86	0,90	0,90
	1990-2004	validation	0,60	0,84	0,80	0,84
	1990-2004	calage	0,78	0,89	0,85	0,89
	1975-1989	validation	0,71	0,78	0,86	0,88

Les données STATION sont écartées dès le départ de l'analyse pour leurs piètres performances générales lors du calage/validation (voir l'annexe II) en comparaison aux trois autres jeux de données (particulièrement sur Manic-3 et Petit Lac Manicouagan).

Le jeu de données PQDH a démontré une performance variable en validation croisée. L'écart du coefficient de Nash-Sutcliffe entre calage et validation atteint jusqu'à 15 %, les pires cas s'observent sur Manic-5 et Manic-3. Manic-5 étant par sa superficie et puissance de production le sous-bassin le plus important du réseau, il est impératif que celui-ci obtienne une réponse supérieure à la moyenne. De plus, l'inconstance méthodologique du traitement des données ajoute une incertitude difficilement quantifiable (voir la section 5.2.2). La fiabilité et l'homogénéité méthodologique du jeu PQDH étant contestables, celui-ci a été rejeté de la poursuite des travaux.

Les jeux de données restants (IREQ et NLWIS) affichent tous deux de bonnes performances. D'un point de vue des écarts entre les coefficients obtenus en calage et en validation, les résultats attribués aux données IREQ sont légèrement supérieurs à ceux de NLWIS. Par contre, les coefficients de Nash-Sutcliffe démontrent que NLWIS présente un meilleur

rendement général. Le sous-bassin Manic-5 se démarque plus particulièrement avec un coefficient moyen de 0,89 contre 0,85, soit une amélioration moyenne de 4 % pour NLWIS comparativement à IREQ.

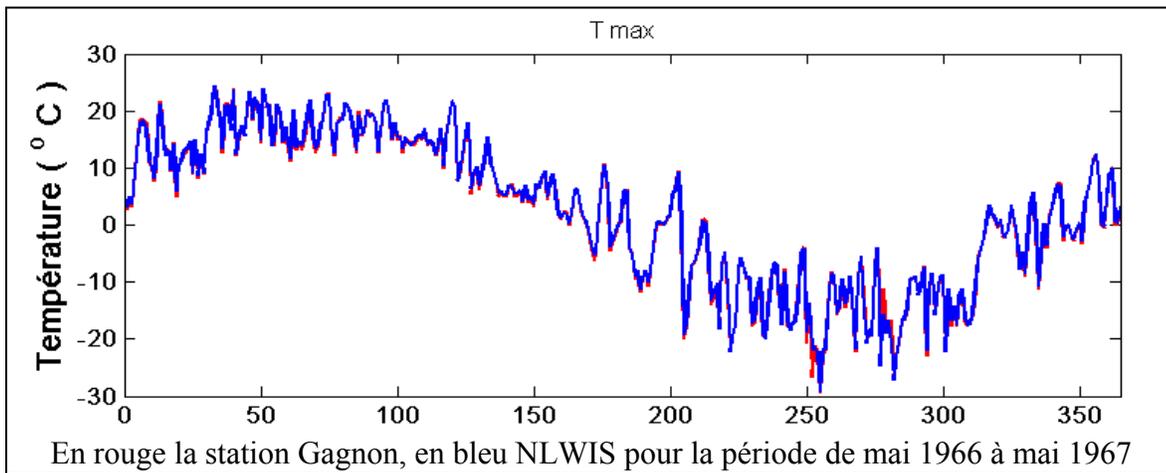


Figure 5.1 Comparaison des températures maximums de la source NLWIS vs la station météorologique #7042590 Gagnon A

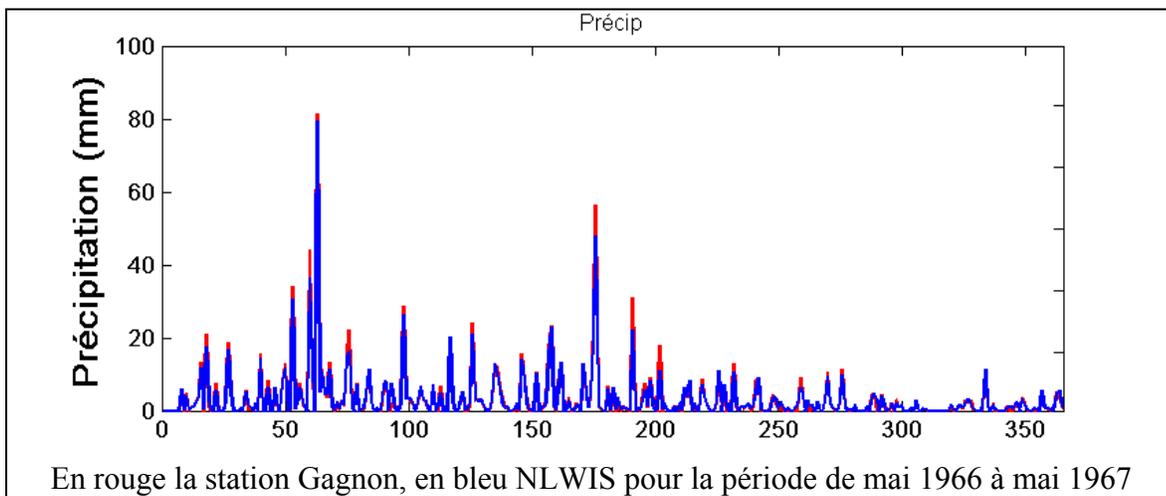


Figure 5.2 Comparaison des précipitations de la source NLWIS vs la station météorologique #7042590 Gagnon

Les figures 5.1 et 5.2 montrent les résultats de la comparaison entre un point de la grille interpolée des données NLWIS et les données observées à la station Gagnon correspondante. La disponibilité de la grille des données interpolées a permis une contre-vérification sur le

bassin versant de la rivière Châteauguay des données NLWIS. Un calage automatique du modèle HSAMI sur la période de 1988-2002 suivi d'une validation sur celle de 1973-1987 utilisant les données NLWIS a été exécuté. Le modèle et périodes de calage/validation correspondant ainsi à ceux utilisés lors des travaux de Simard *et al.* (2008). Ce calage/validation sur ce bassin versant a permis de comparer le jeu de données NLWIS à celui issu de la méthode des polygones de Thiessen utilisée dans l'étude de Simard *et al.* (2008).

Tableau 5.2 Résultats de calage et validation de HSAMI sous les données météorologiques NLWIS et du polygone de Thiessen au bassin versant de la rivière Châteauguay

Origine des données	Calage 1988-2002	Validation 1973-1987
NLWIS	0.77	0.67
Poly. Thiessen	0.79	0.48

Le Tableau 5.2 démontre que la météorologie NLWIS présente un rendement inférieur de 2 % du coefficient de Nash-Sutcliffe en calage. En validation, NLWIS offre une amélioration du coefficient de 19 % par rapport à la méthode de Thiessen. Les écarts calage/validation indiquent une robustesse accrue de la source NLWIS avec un écart de 10 % contre 31 % pour les données estimées par la méthode des polygones de Thiessen.

En résumé, les données NLWIS se démarquent par des résultats supérieurs lors des essais de calage et validation. La comparaison de ces données aux observations des stations météorologiques, combinée à un essai concluant sur le bassin versant de la rivière Châteauguay, permet de démontrer que la source NLWIS possède une bonne représentativité de la météorologie ainsi qu'une réponse hydrologique supérieure aux autres sources étudiées. Basé sur ces observations, le jeu NLWIS apporte un niveau de confiance suffisant autorisant sa sélection pour la poursuite des travaux.

5.5 Recommandations

Cette section contient les observations et réflexions découlant des diverses informations récoltées durant cette étude et des analyses des données hydrométriques et météorologiques.

5.5.1 Les données hydrométriques

Les recommandations suivantes résultent de discussions avec les spécialistes manipulant, dans le cadre de leurs fonctions chez Hydro-Québec, les données expérimentées dans ce travail.

Dû aux difficultés que représente la collecte de données hydrométriques et l'imprécision des mesures obtenues, les apports bruts sont fortement bruités. Le traitement apporté chez Hydro-Québec pour filtrer ces données brutes dépend fortement du jugement et de l'expérience des hydrométéorologues qui sont eux, fortement dépendants de la couverture des installations hydrométéorologiques installées dans le secteur sous observation. L'amélioration de cette couverture a favorisé une amélioration du filtrage des données dans le temps. Suite à des modifications du réseau, l'intégration d'un nouveau logiciel (HSAMI) et l'amélioration des technologies, des campagnes d'harmonisation des données d'apports ont été faites. Ces harmonisations ont été faites de façon automatisée sur une base statistique sans tenir compte des données météorologiques. Les apports utilisés sont donc dépendants des facteurs humain, technologique et technique tous hétérogènes dans le temps. Les données d'apports naturels sont l'étalon du calage d'HSAMI, ce modèle est ensuite utilisé pour la comparaison de performance entre les différentes sources de données météorologiques. Il convient de considérer qu'un biais difficilement quantifiable existe sur plusieurs aspects de ce travail directement dû aux données d'apports. Une approche comparative visant à quantifier les variations des résultats de simulation plutôt qu'une approche cherchant à quantifier avec précision les gains et pertes devrait être favorisée.

5.5.2 Les données météorologiques

Le choix des données issues de la série NLWIS, malgré les résultats positifs des différents essais convergeant en ce sens, doit être considéré avec une certaine réserve.

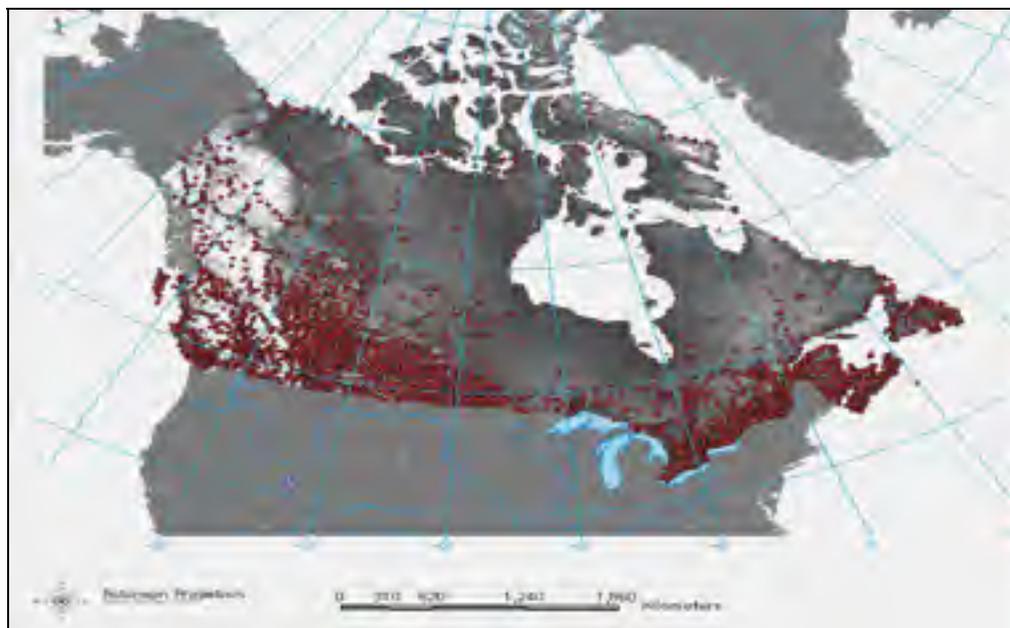


Figure 5.3 Répartition des stations météorologiques sur le territoire canadien
Tirée d’Agriculture et Agroalimentaire Canada (2010)

En premier lieu, le rendement d’une méthode d’interpolation est directement proportionnel à la densité du réseau de stations météorologiques en place. Or, cette densité n’est pas homogène temporellement et spatialement. Cette densité devient simplement déficiente dans les régions du nord à faible densité démographique tel que la Figure 5.3 le démontre. Les données interpolées du bassin versant de la rivière Manicouagan, par sa situation nordique, sont donc susceptibles de souffrir de cette faible densité.

Le second point concerne la qualité des données elles-mêmes. Les observations météorologiques d’Environnement Canada utilisées lors du krigeage de NLWIS, contiennent des anomalies. Certaines stations, par leur position, type d’équipements, déplacements

planifiés ou non, sont soupçonnées de fournir des données erronées. De plus, il est connu que les stations les plus isolées, telle que la portion nord de la rivière Manicouagan, sont les plus négligées et de ce fait, à risque de produire des données erronées ou simplement de tomber en panne, réduisant ainsi la densité du réseau de stations. Pour identifier, puis corriger ces anomalies et stations problématiques, une vaste campagne de reconstitution des données météorologiques est nécessaire. À la création des données NLWIS, lors de l'opération d'interpolation des observations, toutes les stations et séries d'observations ont été utilisées sans discernement. Il serait donc, dans le cadre d'une étude future, important de procéder à ce traitement de l'information afin d'exclure ou corriger les anomalies des stations problématiques puis de reprendre la procédure d'interpolation. Ceci permettrait de limiter l'incertitude liée à la précision des données météorologiques.

CHAPITRE 6

LE CALAGE DE HSAMI

Ce chapitre a pour objectif de présenter les efforts entrepris à l'identification de la problématique concernant le calage d'un modèle hydrologique en conditions de changements climatiques. Les fondements de la méthode adoptée et les premiers pas tentés pour pallier cette problématique y sont exposés. Finalement, les résultats obtenus y sont discutés.

6.1 La problématique du calage en modélisation

Le calage est une étape obligatoire et cruciale à toute tentative de modélisation. C'est à ce moment que le modèle est raffiné pour l'adapter aux caractéristiques physiques d'un bassin. Cette étape doit assurer une réponse adéquate du modèle. Le calage est d'autant plus important lors de l'utilisation d'un modèle fortement paramétré, tel que HSAMI, comptant 23 paramètres. En conditions climatiques actuelles, un calage automatique faisant appel à un optimisateur tel que le SCE-UA (Duan et *al.* 1994) permet d'obtenir une multitude de combinaisons de paramètres menant au problème d'équifinalité tel que décrit par Beven (2006).

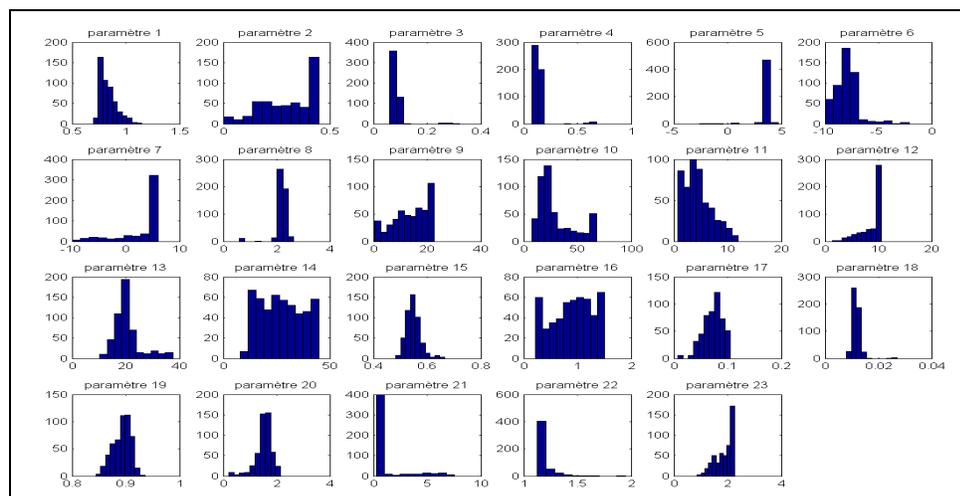


Figure 6.1 Distribution des 23 paramètres de HSAMI lors de 500 calages

La Figure 6.1 est un exemple d'équifinalité observé suite à 500 calages automatiques sur le sous-bassin Manic-5. En abscisse on peut y lire la valeur du paramètre alors que l'ordonnée dénombre l'occurrence où cette valeur a été attribuée suite aux 500 essais de calage. Chacun de ces 500 jeux de paramètres, malgré leurs grandes disparités, produit sans exception un Nash-Sutcliffe compris entre 0,85 et 0,89. L'analyse des jeux de paramètres issus de cet essai révèle un effort voué à l'ajustement optimal du coefficient de Nash-Sutcliffe au détriment des liens physiques qui lient ces paramètres au modèle. Avec ces 23 paramètres, HSAMI arrive lors du calage automatique, à recréer une performance similaire, avec une infinité de combinaison différente de 23 paramètres. Cette approche est actuellement l'approche la plus répandue dans le domaine de la modélisation, pour sa simplicité et sa rapidité d'exécution qui offre tout de même des résultats de qualité. Si cette approche fonctionne bien sous un climat stationnaire, rien ne garantit que cette performance sera conservée sous des conditions futures influencées par les changements climatiques.

En résumé, un modèle fortement paramétré et calé automatiquement n'offre aucune certitude dès que le climat se modifie et s'éloigne de celui sur lequel il est spécifiquement calé.

6.2 Méthodologie

L'objectif ici n'est pas d'éliminer définitivement la problématique entourant le calage des modèles hydrologiques. Le calage étant un passage obligatoire à la modélisation, une avenue a dû être explorée pour pallier ce problème et atteindre un seuil acceptable d'incertitude. Cette section présente cette approche, le calage en parallèle, ainsi que la réflexion motivant celle-ci. Pour clore cette section, un résumé des approches complémentaires utilisées pour raffiner le calage du modèle est présenté.

6.2.1 Le calage en parallèle

Tel que mentionné précédemment, l'approche jusqu'à aujourd'hui favorisée est un calage individuel et automatique des sous-bassins à l'aide d'un optimisateur. Adopter cette

procédure revient à poser l'hypothèse que les sous-bassins sont différents d'un point de vue physiographique et climatique. Or, ces sous-bassins sont concentrés en un même lieu aux propriétés géographiques et climatiques similaires. Pour ces raisons, malgré les différences physiographiques entre ces sous bassins et exception faite des superficies, l'hypothèse de l'homogénéité est plus réaliste.

Suivant cette idée, la procédure expérimentée propose que les paramètres couvrant les caractéristiques hydrologiques sans lien direct avec la superficie des sous bassins soient considérés communs à chacun des sous bassins. Ce qui signifie que les paramètres 1 à 19 contrôlant les interactions telles que : la fonte de la neige, le ruissellement, l'évapotranspiration et l'infiltration sont les mêmes pour tous les sous bassins. Le comportement de ces processus hydrologiques à chacun des sous bassins sera de ce fait homogène. Les paramètres 20 à 23, liés aux hydrogrammes de ruissellement de surface et intermédiaire sont pour leur part tributaires de la superficie des sous bassins. Cette dernière caractéristique est la seule propriété physique d'HSAMI permettant de dissocier les sous bassins. Pour conserver cette « personnalité » propre aux sous bassins et maintenir le lien unissant le modèle à sa physique le plus intact possible, ces derniers paramètres sont laissés variables d'un sous-bassin à l'autre. Le calage automatique est donc fait en imposant les règles suivantes à l'optimisateur : les 19 premiers paramètres sélectionnés devront satisfaire aux conditions de tous les sous-bassins. Ensuite un jeu de quatre paramètres correspondant aux paramètres 20 à 23 est sélectionné pour chacun des sous-bassins de façon indépendante. Le premier jeu de paramètre numéroté de 20 à 23, est attribué au sous-bassin Manic-3, un second jeu (24 à 27) au sous-bassin Manic-5 puis un troisième jeu (28 à 31) au sous-bassin Tournoustouc. Cette manipulation a pour but de créer une concordance physique entre les sous bassins, de conserver une certaine dissociation de par leur superficie tout en diminuant le nombre de paramètres à caler.

Dans ce cas-ci, la fonction objective du SCE-UA est le coefficient de Nash-Sutcliffe moyen des trois sous bassins pondérés en fonction de leurs superficie. De cette façon, l'importance accordée à chaque sous-bassin lors du calage est fonction de la contribution de celui-ci au

réseau hydrographique. Manic-3 étant le plus petit bassin (11 % de l'ensemble), cette pondération permet du même coup d'atténuer l'impact négatif sur le calage des données d'apports naturels de qualité inférieure de ce sous bassin.

Selon la méthodologie habituelle, caler trois sous bassins indépendamment l'un de l'autre revient dans ce cas-ci à un modèle de 69 paramètres (trois jeux de 23 paramètres). Un tel modèle est excessivement modulable et par ce fait, peu souhaitable pour l'extrapolation du futur en conditions de changements climatiques. Par la méthode proposée, le nombre de paramètres est réduit de 69 à 31, ce qui augmente sensiblement la confiance en celui-ci. Ce nouveau modèle à 31 paramètres est moins modulable puisque 19 des 31 paramètres doivent maintenant satisfaire à tous les sous bassins. Ce premier pas permet de croire en un modèle plus robuste dans le temps présent ainsi que dans le futur.

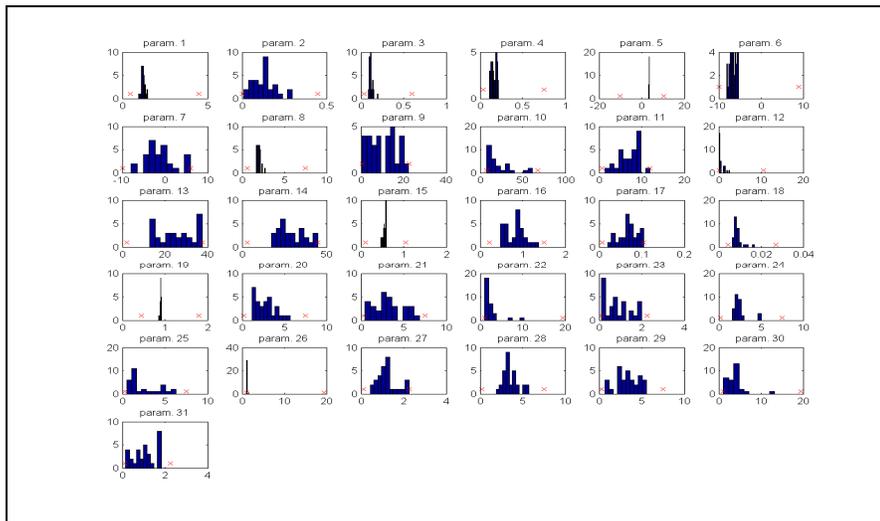


Figure 6.2 Distribution des paramètres HSAMI sur le modèle à 31 paramètres

La Figure 6.2 démontre que le modèle à 31 paramètres ne possède toujours pas les qualités requises pour une étude en changements climatiques. L'étalement considérable des valeurs pour plusieurs des paramètres démontre toujours une multitude de jeux de paramètres possibles, donc un problème d'équifinalité. L'absence d'organisation dans les distributions

indique qu'aucune tendance significative ne semble lier les différents jeux. Finalement, les opérations de calage sont limitées, dans le cas de plusieurs paramètres, par les bornes représentées par les marqueurs rouges sur la Figure 6.2. Ces bornes sont déterminées par les bases physiques derrière certains des processus (ex : taux de fonte par jour minimum et maximum plausible). Ces cas, où les paramètres sont restreints par les bornes, indiquent clairement la tendance du modèle à forcer vers des valeurs aberrantes pour optimiser uniquement le coefficient de Nash-Sutcliffe plutôt que de rechercher à bien représenter la physique.

6.2.2 Réduction du nombre de paramètres

Malgré l'amélioration significative apportée au modèle par cette méthode de calage, celui-ci demeure tout de même sur-paramétré. Le raffinement du modèle exposé dans cette section a pour but de concentrer le calage sur les paramètres importants et d'éviter que des paramètres superflus servent de levier pour contre-balancer des paramètres aberrants, réduisant ainsi le risque d'obtenir des jeux de paramètres irréalistes.

Suite à 30 calages suivant cette méthodologie, deux points sont apparus clairement. Le premier est que certains paramètres tendent à se fixer d'eux-mêmes. Quel que soit le jeu de paramètres, la valeur de certains d'entre eux présente une faible variabilité, tel que l'on peut l'observer pour les paramètres numéro 5 et 19 respectivement à la Figure 6.2.

Tableau 6.1 Coefficient de corrélation entre les divers paramètres HSAMI

	1	2	3	4	5	6	7	...	29	30	31
1	1.0	-0.3	0.1	0.4	-0.3	0.3	0.4	...	-0.2	0.5	-0.2
2	-0.3	1.0	-0.5	-0.5	0.3	-0.6	-0.3	...	-0.1	-0.2	0.4
3	0.1	-0.5	1.0	0.5	-0.3	0.6	0.2	...	0.1	0.3	-0.2
4	0.4	-0.5	0.5	1.0	-0.3	0.9	0.6	...	0.3	0.2	-0.3
5	-0.3	0.3	-0.3	-0.3	1.0	-0.4	-0.3	...	-0.1	-0.2	0.4
6	0.3	-0.6	0.6	0.9	-0.4	1.0	0.5	...	0.3	0.1	-0.3
7	0.4	-0.3	0.2	0.6	-0.3	0.5	1.0	...	0.2	0.2	-0.2
...
31	-0.2	0.4	-0.2	-0.3	0.4	-0.3	-0.2	...	-0.3	0.1	1.0

Tableau 6.2 Probabilités d'hypothèse de corrélation due au hasard

	1	2	3	4	5	6	7	...	29	30	31
1	1.0	0.1	0.4	0.0	0.1	0.1	0.0	...	0.4	0.0	0.3
2	0.1	1.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	...	0.6	0.4	0.0
3	0.4	0.0	1.0	0.0	0.1	0.0	0.2	...	0.5	0.1	0.2
4	0.0	0.0	0.0	1.0	0.1	0.0	0.0	...	0.1	0.3	0.1
5	0.1	0.1	0.1	0.1	1.0	0.0	0.1	...	0.7	0.4	0.0
6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	...	0.1	0.7	0.1
7	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0	1.0	...	0.4	0.2	0.3
...
31	0.3	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.3	...	0.1	0.4	1.0

Le second point est l'observation de fortes corrélations, clairement identifiables entre certains couples de paramètres. Le Tableau 6.1 démontre un exemple d'étude de corrélation entre les divers paramètres du modèle HSAMI, où « un » étant une corrélation parfaite et « zéro » une corrélation nulle. Dans ce cas-ci, les cases en jaune soulignent une forte corrélation entre les paramètres quatre et six. La Tableau 6.2, quant à lui, démontre l'hypothèse vérifiée que ces corrélations soient dues au hasard. « Un » étant cette fois une corrélation illégitime et « zéro » une corrélation des plus fiables. Reprenant l'exemple précédent, la case en jaune démontre cette fois-ci que la probabilité qu'une hypothèse de corrélation entre les paramètres quatre et six soit due au hasard est nulle. Considérant ces deux affirmations, soit une forte corrélation et une certitude que celle-ci soit légitime, il est possible d'affirmer qu'il existe un lien mathématique fort entre les deux paramètres rendant l'un d'eux superflu.

Ces deux particularités (les paramètres fixes et les corrélations fortes) ont servi de base pour affiner le calage du modèle. Dans le premier cas, les paramètres 5 et 19 ont été fixés à la valeur moyenne obtenue lors des 30 calages puis soustraits de la procédure de calage. Dans le second cas, une droite de régression linéaire permet d'exclure le paramètre six de la procédure de calage, sa valeur finale étant désormais tributaire du calage effectué sur son homologue (paramètre quatre). Ces modifications apportées, le modèle est maintenant réduit à 28 paramètres et le calage est relancé pour observer l'apparition potentielle de nouvelle(s) corrélation(s) ou nouvelle(s) tendance(s). Dans les cas positifs, la procédure précédemment décrite est reprise. Il est à noter que les paramètres 20 à 31 sont exclus de cette procédure.

6.3 Résultats du calage sur le passé récent

Par la procédure présentée à la section ci-dessus, le modèle a été raffiné pour atteindre sa configuration finale à 25 paramètres. Les résultats issus de 70 calages sont présentés à la Figure 6.3 sous forme de distribution pour chacun de ces 25 paramètres.

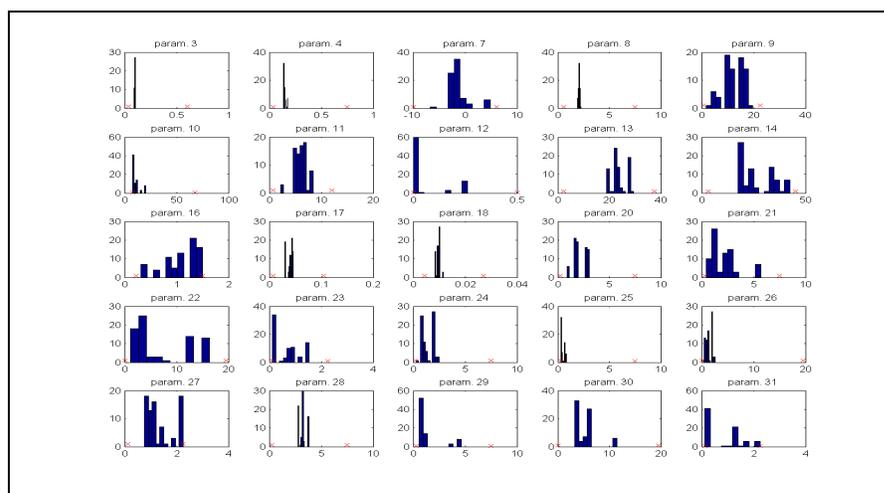


Figure 6.3 Distribution des paramètres HSAMI sur le modèle à 25 paramètres

Tableau 6.3 Coefficient de Nash-Sutcliffe pour les trois sous-bassins vs les différents types de calage mis à l'essai

	Calage individuel (69 paramètres)	Calage en parallèle (25 paramètres)
Manic-3	0.81	0.71
Manic-5	0.89	0.88
Toulnostouc	0.86	0.86

Comparativement au modèle à 31 paramètres, on observe une organisation s'apparentant à une distribution normale pour plusieurs paramètres, une réduction de l'étalement des valeurs et une sollicitation des bornes moins fréquente et même inexistante dans la plupart des cas. Le Tableau 6.3 compare les résultats obtenus lors du calage individuel selon la méthode automatique, tel que pratiquée jusqu'à aujourd'hui, à ceux de la méthode de calage en

parallèle proposée. Les résultats, sous forme de coefficient de Nash-Sutcliffe, couvrent les sous bassins retenus à la section 5.4.1. Sous le modèle proposé à 25 paramètres, l'écart principal s'observe dans le cas de Manic-3 avec une diminution du Nash-Sutcliffe de 10 % alors que Manic-5 n'accuse un recul que de 1 % et que Toulnostouc maintient le même Nash-Sutcliffe.

Afin de quantifier l'impact de l'équifinalité du modèle à 25 paramètres, l'enveloppe d'incertitude liée aux jeux de paramètres nés de cette méthode de calage est présentée à la Figure 6.4. Cette enveloppe est constituée des hydrogrammes annuels moyens (période de référence 1981-2000) résultants de 100 calages du modèle à 25 paramètres.

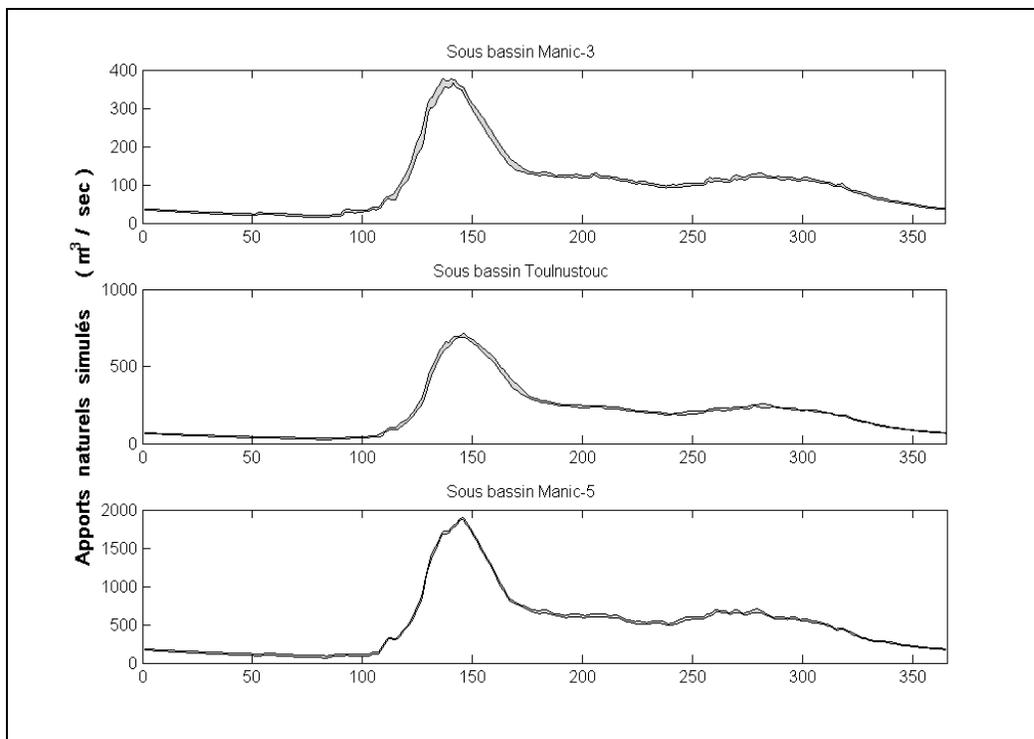


Figure 6.4 Enveloppes d'incertitude liées à la sélection du jeu de paramètres

L'épaisseur des enveloppes (en gris) est ici l'indicateur direct du niveau d'incertitude dû au choix du jeu de paramètres à utiliser. L'écart-type relatif moyen des enveloppes est de 0,027, 0,098 et 0,039 pour Manic-3, Manic-5 et Toulnostouc respectivement. Cette analyse fût aussi portée sur les horizons 2025, 2055 et 2085. Ces résultats, présentés par les graphiques de

l'annexe IV, démontrent une faible tendance à la hausse dans le temps des écarts-types relatifs portant la valeur de ceux-ci à 0,04, 0,11 et 0,05 pour Manic-3, Manic-5 et Touloustouc respectivement à l'horizon 2085.

6.4 Discussion

Malgré la méfiance à accorder à un calage orienté exclusivement sur le coefficient de Nash-Sutcliffe, toutes ces opérations seraient complètement inutiles sans une valeur acceptable de ce dernier. Les coefficients présentés au Tableau 6.3 démontrent le maintien des performances du modèle sous ce nouveau calage. Seul Manic-3 accuse une baisse considérable sans pour autant être critique. Il est justifiable d'observer une baisse des coefficients de Nash-Sutcliffe lors du passage d'un calage individuel à un calage plus restrictif tel que sur un modèle à 31 voir 25 paramètres. Le modèle, étant de type global et possédant moins de variables, ne peut s'adapter parfaitement aux observations. Le modèle est contraint à approximer un comportement moyen pour tous les sous bassins plutôt que de calquer l'hydrogramme tel qu'observé lorsque les paramètres sont plus nombreux. Il est aussi à considérer que les observations d'apports naturels concernant Manic-3 sont de qualité inférieure.

Le modèle obtenu permet de croire en un modèle plus près de sa physique et transposable en conditions de changements climatiques. Sans éliminer la problématique de l'équifinalité, cette approche réduit la gamme des jeux de paramètres admissible. Les jeux restants, par leur distribution normale et la diminution des étalements, démontrent un meilleur consensus sur les valeurs approximatives que devraient prendre plusieurs paramètres. Les bornes moins sollicitées quant à elles démontrent que le calage recherche moins les valeurs extrêmes et aberrantes. Ceci laisse sous-entendre que le calage ne contrebalance plus ou peu de paramètres excessivement manipulés à l'avantage unique du coefficient de Nash-Sutcliffe.

L'analyse des enveloppes d'incertitude (Figure 6.4 et annexe IV) permet de statuer sur l'importance de choisir le bon jeu de paramètres. Ces figures démontrent, par l'étroitesse des

enveloppes (en gris), l'impact modéré que le choix d'un jeu de paramètres aura sur les résultats de la simulation. Ces figures (annexe IV) permettent de vérifier la quasi-stationnarité de l'incertitude dans le temps sous un climat futur modifié. La mesure de l'écart-type relatif moyen propre à chacune des enveloppes a permis d'observer, pour l'horizon 2085, des hausses par rapport à la période de référence n'excédant pas un pourcent. Ces résultats démontrent qu'aucun biais excessif n'est induit par le choix du jeu de paramètres à utiliser. Ce biais demeure, dans le temps suffisamment stationnaire pour permettre une utilisation en conditions futures. Sur ces énoncés, il est décidé qu'une sélection aléatoire parmi les 100 jeux de paramètres déjà disponibles est envisageable.

CHAPITRE 7

LES PROJECTIONS CLIMATIQUES

Ce chapitre expose l'approche adoptée pour la création des projections d'apports naturels futurs en condition de changements climatiques. Les scénarios climatiques utilisés ainsi que la méthode de mise à l'échelle retenue y sont discutés. Pour conclure, une synthèse des résultats est présentée suivie de la discussion de ceux-ci.

7.1 Méthodologie

La création de scénarios d'apports naturels futurs en conditions de changements climatiques comporte principalement deux étapes. Premièrement, l'acquisition de données météorologiques représentatives des projections climatiques futures à expérimenter. Cette acquisition consiste en une modification des données d'observation historiques par une méthode de mise à l'échelle. Diverses méthodes de mise à l'échelle ont été développées à cet effet. Dans le cadre de cette étude, la méthode des deltas (Diaz-Nieto et Wilby, 2005; Hay *et al.* 2000) a été retenue. Cette méthode consiste à modifier les données météorologiques observées à l'aide d'un facteur de correction (delta). Ces valeurs « delta » représentent les écarts de précipitation et de température des horizons futurs à étudier par rapport à la période de contrôle. Les données utilisées pour ce calcul sont issues de simulations des MCG sous diverses conditions d'émission de GES (voir section 7.2). Ces « deltas » sont ensuite appliqués aux observations météorologiques (Tmin, Tmax et précipitation) de la période de référence suivant les équations (7.1) et (7.2) :

$$T_{fut,d-m-y}^i = T_{obs,d-m-y} + \Delta T_m^i \quad (7.1)$$

$$P_{fut,d-m-y}^i = P_{obs,d-m-y} \times RatioP_m^i \quad (7.2)$$

Où « i » représente un scénario et $T_{fut,d-m-y}^i$ est la température projetée en degré Celsius selon le scénario i au jour d du mois m de l'année y ; alors que $T_{obs,d-m-y}$ est la température

en degré Celsius durant le jour d du mois m de l'année y du passé proche observé lors de la période de référence; $\Delta T_{m,i}$ est la variation moyenne de température en degré Celsius pour le scénario i du mois m . De la même façon, $P_{m,d-m-y}^i$ est la précipitation projetée en mm selon le scénario i au jour d du mois m de l'année y ; alors que $P_{m,d-m-y}$ est la précipitation en mm durant le jour d du mois m de l'année y observée lors de la période de référence; $\text{Ratio}P_{m,h}^i$ est la variation moyenne de la précipitation en % pour le scénario i du mois m de l'horizon h (Poulin *et al.* 2011).

La création proprement dite des données d'apports naturels est obtenue par la modélisation des projections climatiques à l'aide d'un modèle hydrologique de type météo-apport, tel que HSAMI.

7.2 Les modèles et projections climatiques

Dans l'optique de quantifier l'incertitude liée aux modèles et scénarios climatiques, un maximum de modèle et de scénarios de GES doit être utilisé. À l'origine, 135 combinaisons modèles-scénarios étaient disponibles. De ces 135 combinaisons, seulement 29 étaient disponibles sous forme de delta de température minimum et maximum, les autres n'étant disponibles que pour les températures moyennes uniquement. L'utilisation d'HSAMI nécessite les données de température minimum et maximum, l'utilisation des deltas de température moyenne devient donc impossible. Suite à ce retranchement, six modèles globaux du climat ont pu être utilisés, combinés aux trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre disponible : A1B, A2 et B1 (GIEC 2000). Ces scénarios, quoique peu nombreux, couvrent tout de même bien la palette des possibilités avec un scénario optimiste (B1) et un scénario pessimiste (A1B). Certains de ces modèles comportaient pour une même combinaison modèle-scénario plusieurs membres. Afin d'éviter d'accorder trop de poids à ces modèles lors de l'analyse, la moyenne des valeurs delta issues des divers membres d'un même modèle-scénario a été utilisée. Finalement, vingt (20) combinaisons modèles-scénarios de GES sont disponibles pour l'étude (voir Tableau 7.1).

Tableau 7.1 Combinaisons des modèles-scénarios de GES sélectionnées pour l'étude.

Scénarios d'émission de gaz à effet de serre	bccr bcm2	csiro mk3 0	csiro mk3 5	giss aom	inmcm3	miroc3 2 hires	miroc3 2 medres	ncar ccs3
a1b	x	x		x	x	x	x	x
a2	x	x	x		x		x	
b1	x	x	x	x	x	x	x	x

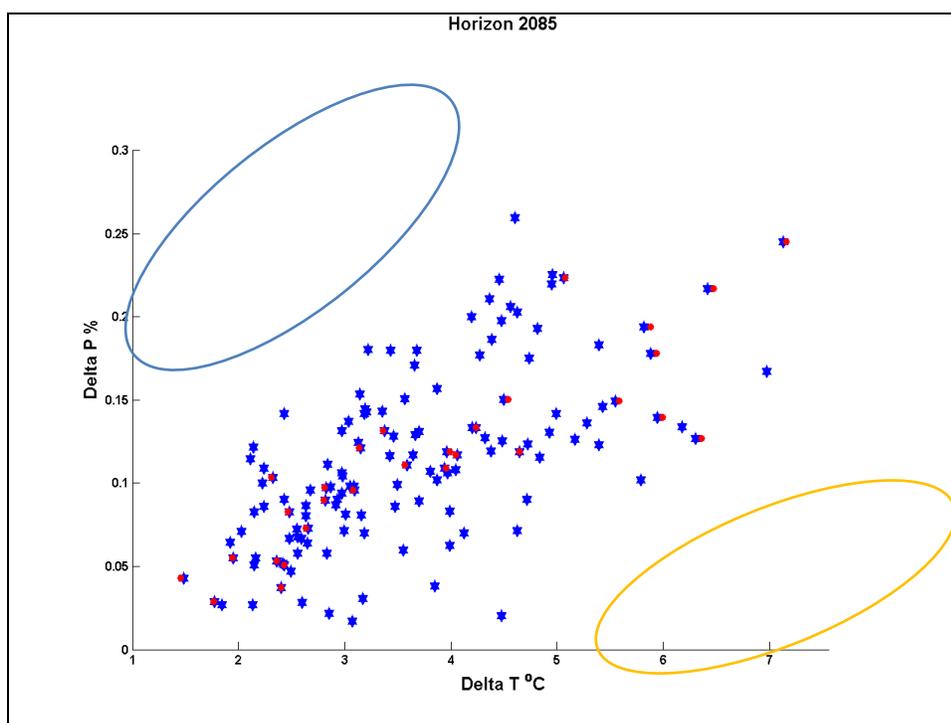


Figure 7.1 Distribution des 20 combinaisons de delta sélectionnées vs les 135 disponibles. Basé sur les deltas annuels de l'horizon 2085

La Figure 7.1 démontre, en rouge, la répartition des 20 combinaisons de deltas issues des modèles-scénarios sélectionnés comparativement aux 135 cas disponibles initialement (en bleu). On y remarque que les cas médians y sont bien représentés. Par contre, les zones encadrées en bleu et orangé soulignent des secteurs sous représentés mais d'intérêt non négligeables. La zone orangée englobe la région où les cas qui tendraient à minimiser le

ruissellement se situeraient. La zone en bleu détermine la région où les cas maximisant le ruissellement devraient se trouver. L'analyse de cette figure démontre qu'aucune des 135 projections disponibles ne représente de cas extrêmes et que les 20 projections retenues (marqueurs rouges) sont représentatives de l'échantillon d'origine.

7.3 Résultats

Cette section expose une synthèse des projections climatiques constituées par la méthode des deltas. Les résultats des apports naturels futurs générés à partir de ces projections sont présentés par la suite.

7.4 Impact sur les projections météorologiques

L'analyse de la Figure 7.2 présente les graphiques de dispersion des ratios de précipitation vs les deltas de la température moyenne à l'horizon 2055 alors que l'annexe V présente les horizons 2025 et 2085. Cette figure montre l'incertitude liée aux modèles et scénarios de GES combinés.

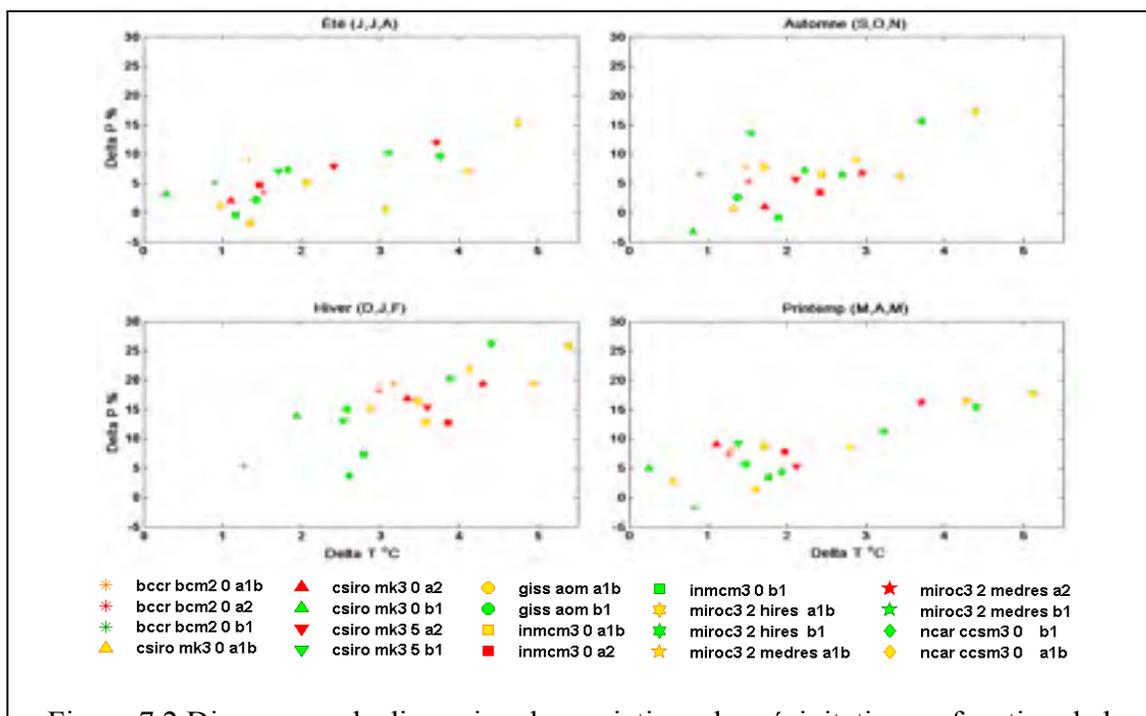


Figure 7.2 Diagramme de dispersion des variations de précipitation en fonction de la température moyenne des différents modèles-scénarios (horizon 2055)

La comparaison des graphiques de dispersion aux divers horizons permet d'observer une croissance de l'incertitude (augmentation de l'étalement) liée aux modèles et scénarios dans le temps. L'incertitude moyenne des scénarios augmente à près de 12% en précipitation et de trois degrés Celsius en température de 2025 à 2085.

De façon générale, les modèles pointent vers une augmentation de température et des précipitations plus marquées aux périodes d'automne et d'hiver. MIROC3 est le modèle qui, globalement, présente les plus fortes augmentations, ce qui en fait le plus chaud et humide du groupe. À l'opposé, BCCR et CSIRO sont les modèles aux tendances les plus froides et sèches. Fait intéressant, l'évolution des précipitations semble proportionnelle à celle des températures, ce qui s'observe par une disposition s'apparentant à une droite des marqueurs des modèles-scénarios sur les graphiques de dispersion.

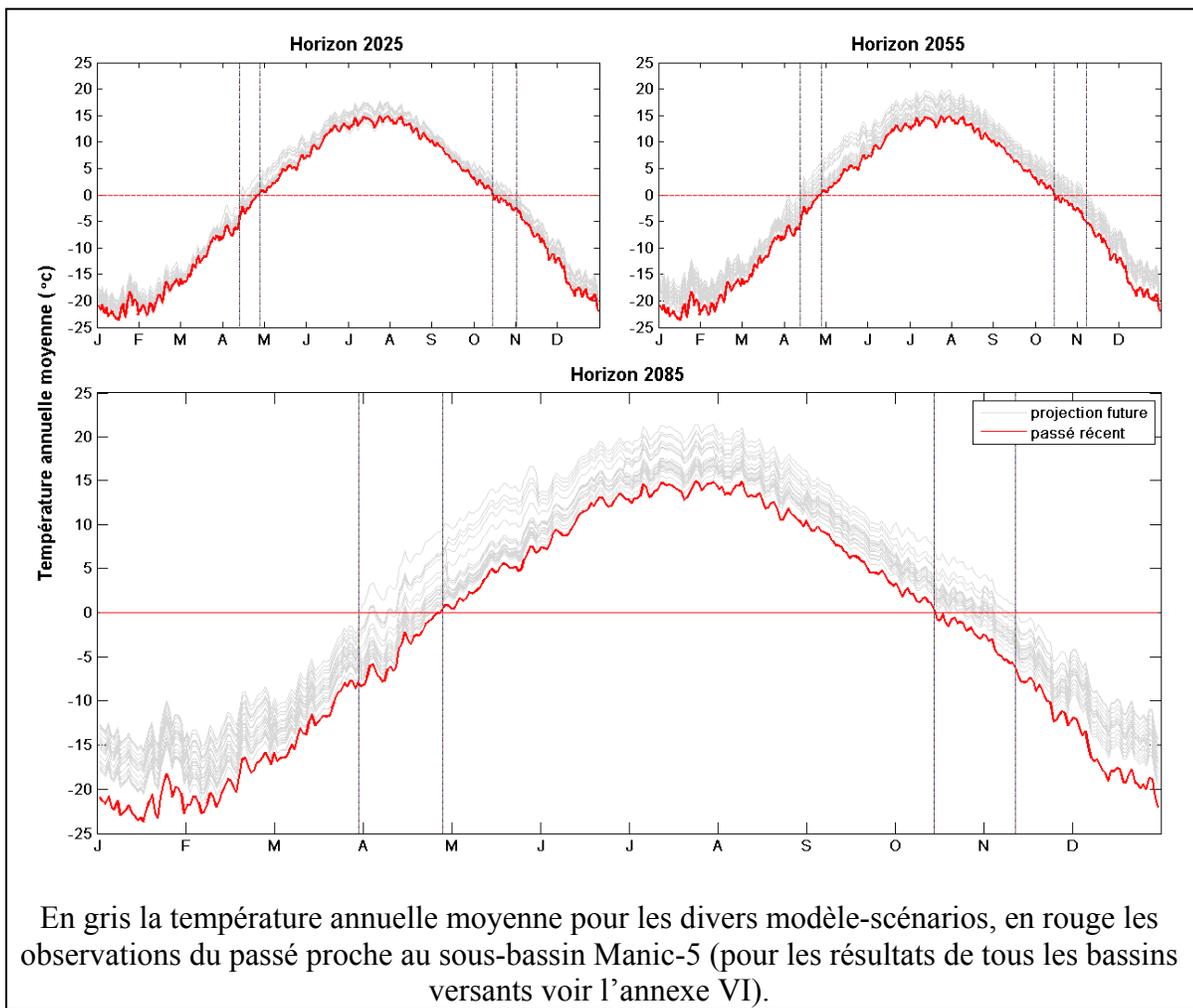


Figure 7.3 Cycle annuel de la température moyenne

La Figure 7.3 présente, en rouge, le cycle annuel de la température moyenne au sous-bassin Manic-5 pour la période de référence. En gris, les résultats des combinaisons modèles-scénarios démontrent à l'unanimité qu'un réchauffement est à venir. Celui-ci entrainera un devancement de la période de dégel pouvant atteindre 26 jours et un retard du passage sous le point de congélation possible de 27 jours (MIROC3, horizon 2085). Ces devancements sont de 28, 25 et 26 jours et les retards sont de 28, 20, 27 jours pour les sous-bassins de Manic-3, 2 et Toulustouc respectivement (MIROC3 2085).

Tableau 7.2 Variation (%) de la moyenne annuelle des précipitations

MANIC 5	HORIZON 2025			HORIZON 2055			HORIZON 2085		
P : précip. Pluie annuelle N : précip. Neige annuelle Ph : Pluie durant la période hivernale (D,J,F,M)	P	N	Ph	P	N	Ph	P	N	Ph
	%	%	mm (%)	%	%	mm (%)	%	%	mm (%)
bccr bcm2 0 a1b	5	-8	3 (60)	13	5	11 (220)	16	0	15 (300)
bccr bcm2 0 a2	9	-1	8 (160)	9	4	12 (240)	16	4	20 (400)
bccr bcm2 0 b1	7	-1	12 (240)	10	-2	12 (240)	7	2	11 (220)
csiro mk3 0 a1b	4	7	8 (160)	7	2	10 (200)	14	2	18 (360)
csiro mk3 0 a2	4	1	10 (200)	10	0	12 (240)	20	4	35 (700)
csiro mk3 0 b1	10	4	25 (500)	8	3	22 (440)	10	2	22 (440)
csiro mk3 5 a2	12	-1	19 (380)	18	-3	22 (440)	25	-5	28 (560)
csiro mk3 5 b1	13	-7	18 (360)	20	2	17 (340)	14	-4	19 (380)
giss aom a1b	7	0	12 (240)	16	-1	16 (320)	21	-1	20 (400)
giss aom b1	7	-5	11 (220)	12	-1	13 (260)	16	0	14 (280)
inmcm3 a1b	9	-2	11 (220)	12	-4	15 (300)	28	-2	26 (520)
inmcm3 a2	16	-7	16 (320)	18	-7	17 (340)	34	-12	42 (840)
inmcm3 b1	21	-6	31 (620)	16	-8	29 (580)	21	-6	27 (540)
miroc3 hires a1b	25	-6	24 (480)	37	-4	31 (620)	50	-2	62 (1240)
miroc3 hires b1	31	-1	43 (860)	37	-2	40 (800)	44	0	40 (800)
miroc3 medres a1b	23	0	27 (540)	28	-5	32 (640)	38	-4	47 (940)
miroc3 medres a2	22	-3	32 (640)	29	-3	31 (620)	37	-5	53 (1060)
miroc3 medres b1	24	-3	38 (760)	27	-2	34 (680)	29	-2	34 (680)
ncar ccs3 b1	14	-9	23 (460)	22	-9	23 (460)	18	-9	23 (460)
ncar ccs3 a1b	15	-4	21 (420)	22	-4	29 (580)	27	-8	31 (620)
PÉRIODE REF. 1970 - 2000									
Moyenne annuelle Observation (mm)	Pluie cumulée (mm)			Neige cumulée (mm)			Pluie cumulée Hiver (mm)		
	553			367			5		
Précipitation sous forme de pluie "P", de neige "N" et de pluie durant la saison hivernale "Ph" (décembre, janvier, février, mars). Toutes les valeurs de variation sont calculées par rapport à la période de référence 1970-2000 au sous-bassin Manic-5. En rouge, les variations négatives; en orange, les hauses inférieures à 5 %. Voir annexe VII pour les sous bassins Manic-3, 2 et Toulousteuc.									

Cette hausse globale de température influencera considérablement les précipitations. Le Tableau 7.2 résume l'évolution des précipitations sous forme de pluie, de neige et de pluie durant la période hivernale (déc., janv., fév., mars) au sous-bassin Manic-5. À l'exception de BCCR A1B sous l'horizon 2025, il est à prévoir des hausses de précipitations totales de plus en plus marquées dans le temps pouvant atteindre 53%.

Par contre, à court terme, seul CSIRO laisse présager une plus grande quantité de neige (augmentation potentielle de 1 % à 7%). BCCR le rejoint aux horizons 2055 et 2085, mais l'augmentation potentielle de neige n'excède pas dans ce cas les 5%. Pour toutes les autres combinaisons modèles-scénarios-horizons, les baisses de précipitations de neige pourraient atteindre 12%. Pour les autres sous bassins le portrait prévoit des baisses de neige pouvant atteindre 18%.

Les précipitations sous forme de pluie pour la période hivernale, seront à la hausse de 3mm à 133mm par rapport à la période de référence dépendant de la combinaison modèle-scénario.

7.5 Impact sur les projections d'apports naturels

Les impacts de cette modification climatique sur les apports naturels sont considérables.

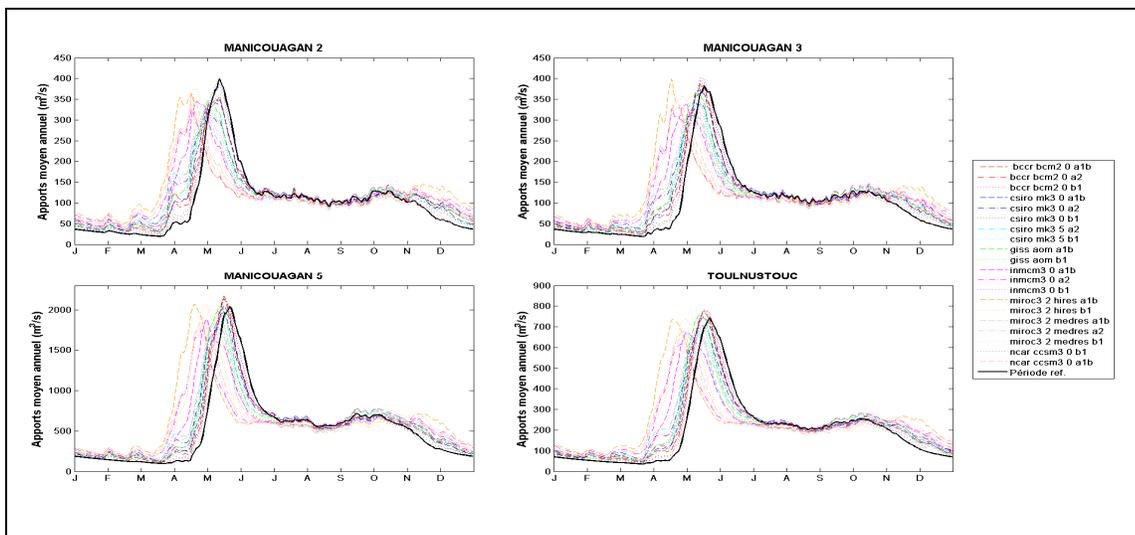


Figure 7.4 Scénarios d'apports naturels annuels moyens de l'horizon 2085.

Voir annexe VIII pour les résultats de tous les horizons

La Figure 7.4 illustre un exemple des modifications typiques au régime hydrologique des sous-bassins à l'horizon 2085. On y observe des devancements de la crue printanière, des hausses du débit d'hiver, une variabilité du volume et du débit de pointe à la crue printanière.

L'exemple de la Figure 7.5 et les graphiques de l'annexe IX quantifient les impacts sur le régime hydrologique de façon probabiliste. Les résultats sont présentés sous forme d'écarts entre les différents horizons et la période de référence.

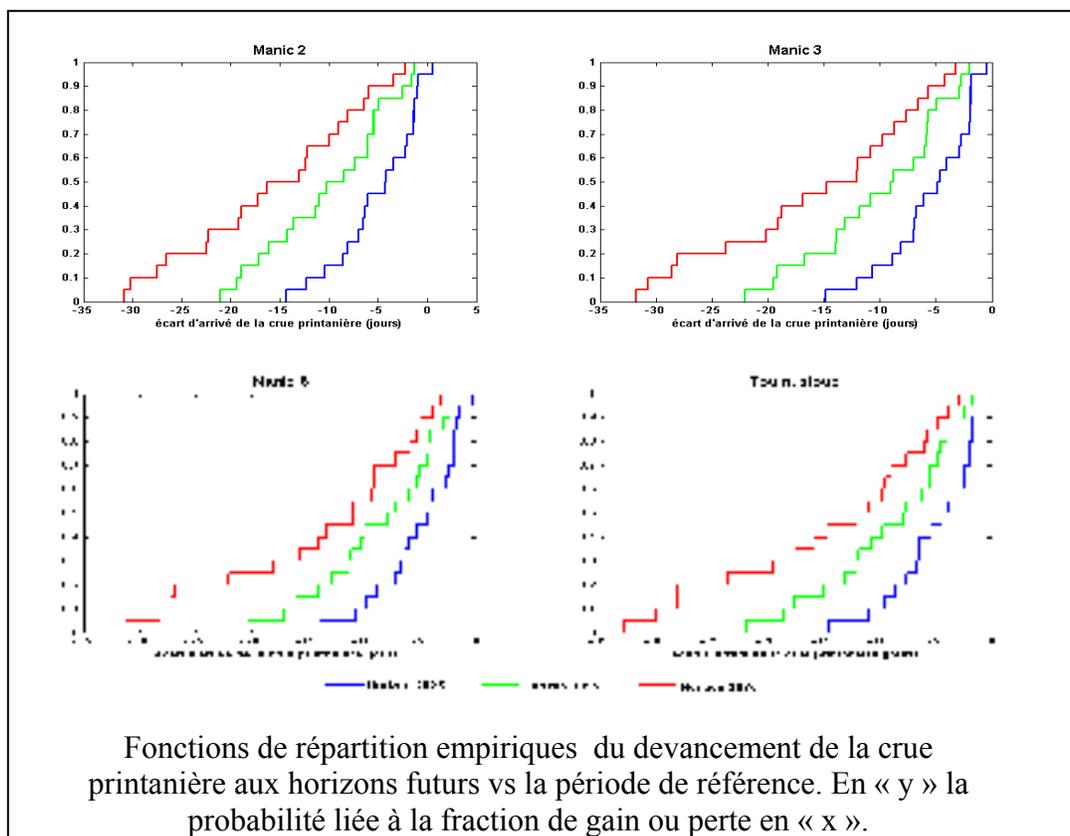


Figure 7.5 Probabilité de devancement de la crue printanière en jours

Quatre points saillants ont été retenus pour l'analyse. Premièrement, le devancement de la crue printanière est une certitude se confirmant dans le temps. Seul Manic-2 à l'horizon 2025 connaît une probabilité négligeable de voir une crue tardive. Ce devancement de la crue connaît une forte variabilité. L'initiation de la crue printanière pourrait connaître un devancement minimum inférieur à cinq jours et atteindre les 15, 22 et même 33 à court, moyen et long termes.

Le second point caractérisant la crue printanière est la forme de son hydrogramme. Les critères retenus pour caractériser cet hydrogramme sont le débit de pointe et le volume d'eau

généralisé par cette crue. Pour Manic-2 il est extrêmement probable que les débits de pointes seront à la baisse (annexe IX). Ces réductions pourraient atteindre 22% du débit actuel moyen en 2085. Pour les autres sous-bassins, la réponse est plus partagée. La probabilité d'une baisse des débits de pointe varie de 35% à 70% alors que la réduction maximum du débit serait de 17%. Le potentiel de gain quand à lui semble limité à 8% par rapport à la période de référence. Du point de vue volume des crues, la réponse est tout aussi partagée. Il y a 30% à 75% de probabilité de voir les volumes diminuer. Ces diminutions pourraient atteindre 13% de la période de référence, alors que le potentiel de gain de volume s'étend à 19%.

Le dernier point est lié au volume total annuel. Au terme de l'horizon 2025, il serait probable [80%] d'observer des hausses du volume cumulé annuel. Les improbables pertes n'excéderaient pas les 3% alors que les gains potentiels seraient limités à un maximum de 8%. Aux horizons suivants, une certitude quand aux gains s'installe avec un potentiel variant de 1% à 22% de volume supplémentaire.

7.6 Discussion

Malgré la grande variété de modèles-scénarios utilisés dans cette étude, l'étude des diagrammes de dispersion des deltas de l'annexe V démontre, tel que mentionné à la section 7.2, l'inexistence de cas maximisant et minimisant les ruissellements. Au contraire, la distribution des marqueurs tend à s'aligner selon une tendance où la température augmente proportionnellement aux précipitations. Cette tendance a pour effet de favoriser l'évapotranspiration, réduisant ainsi en partie le potentiel de ruissellement supplémentaire issu des précipitations plus abondantes.

Autre point non négligeable, le réchauffement du climat, par l'augmentation de la température moyenne en hiver, sera responsable d'un raccourcissement de cette période de gel hivernal tel que démontré à la Figure 7.3. Les impacts principaux associés à ceci sont la diminution des réserves de neige disponibles pour alimenter les crues printanières et le

devancement de celles-ci. Cette dernière constatation est le reflet des fortes probabilités de baisse des volumes de crue printanière et des pointes plus faibles démontrées précédemment.

L'augmentation des précipitations anticipées en hiver due à ce rétrécissement de la période de gel, se manifestera aussi par une augmentation des pluies d'hiver. Ces pluies plus abondantes en hiver augmentent la proportion de pluie sur les précipitations totales hivernales plutôt que de favoriser le couvert nival (voir Figure 7.6). Dans 87% des combinaisons modèle-scénario-horizon-sous-bassin, ces augmentations de précipitations liquides seront suffisantes pour combler les pertes prévues de précipitations sous forme de neige. Dans la plupart des cas, il y aura une augmentation du bilan cumulatif total des précipitations de la période hivernale. Les principaux cas où ce bilan demeure déficitaire par rapport à la période de référence se trouvent sous BCCR A1B avec un déficit de 27 à 33mm à court terme seulement, NCAR B1 (4 à 11mm) et INMCM3 A2 (1 à 17mm) à court, moyen et long termes.

La réduction de la neige précipitée ainsi que l'augmentation de précipitations liquides et de la température conjuguée à une période réduite de gel auront un impact négatif sur les stocks de neige responsables de la crue printanière. Ces impacts sont clairement visibles à la Figure 7.4, où l'on observe des débits plus importants en hiver, plus faibles en été, des crues précoces et dans plusieurs cas moins intenses sont à prévoir. Les périodes d'étiage quant à elles, semblent partagées à l'horizon 2025, mais sur les horizons suivants, il devient de plus en plus probable qu'une tendance à la baisse des débits d'étiage s'installe.

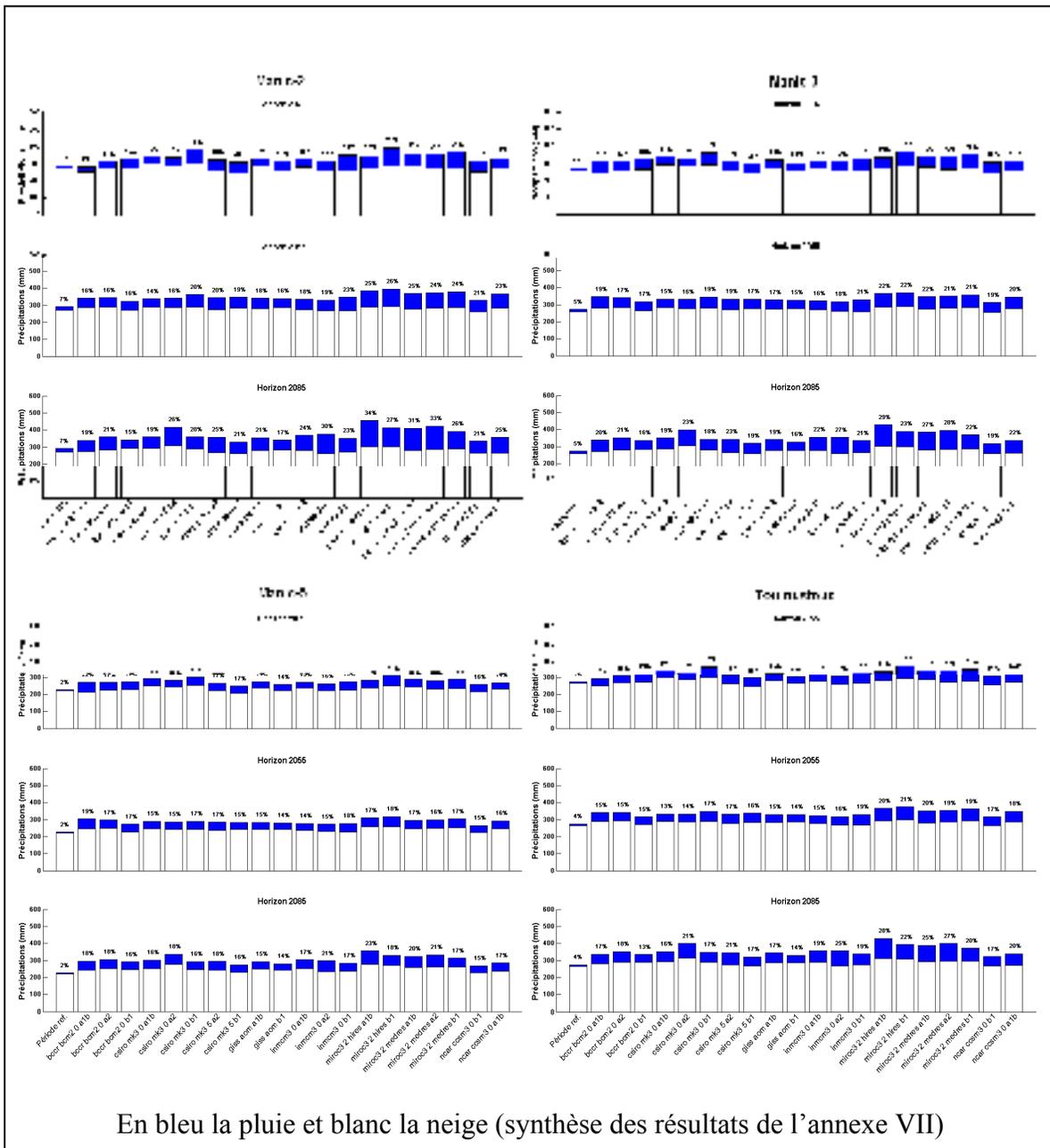


Figure 7.6 Évolution des portions neige et pluie des précipitations durant les mois de décembre, janvier, février et mars

En résumé: (1) les périodes de gel seront plus courtes et plus tempérées; (2) les précipitations sous forme de pluie durant la période de gel seront plus fréquentes alors que celles sous forme de neige tendent à diminuer; (3) la combinaison de l'augmentation de précipitations liquides, de la diminution de celles solides et de l'augmentation de la température favorisera la réduction des accumulations de neige, réduisant ainsi le volume de la crue printanière tout

en favorisant un ruissellement plus important et continu durant la période de gel; (4) dû au réchauffement, un devancement de la crue printanière est une quasi certitude (Figure 7.5); (5) la saison estivale subira des hausses de température proportionnellement à celle des précipitations, ce qui laisse présager un maintien ou une légère variation allant de 6% à -12% des conditions actuelles de ruissellement lors de la période d'été. Pour terminer, l'étude de la figure-A IX-4 à l'annexe IX démontre de forte probabilité d'augmentation du volume moyen annuel à chacun des sous-bassins.

CHAPITRE 8

MODÉLISATION DE LA PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE

La modélisation de la gestion du bassin versant de la rivière Manicouagan est l'étape ultime de cette étude. Cette modélisation permet d'obtenir les scénarios de production d'hydroélectricité nécessaires à l'estimation des impacts de l'optimisation des règles de gestion. Ce chapitre présente la méthodologie puis les outils nécessaires à cette opération. Les résultats et discussion de ceux-ci sont présentés aux chapitres 9 et 10.

8.1 Méthodologie

La modélisation d'un système hydrique nécessite deux intrants : les données d'apports naturels (voir CHAPITRE 7) et les règles de gestion. Les règles de gestion sont, en un premier temps, générées par l'optimisateur de règles. Deux types de règles sont produits. Le premier type de règles est celui optimisé sur les données de la période de référence. Ces règles sont utilisées en conditions futures pour quantifier l'impact direct des changements climatiques sur la production hydroélectrique. Ces simulations sont identifiées comme étant « sans optimisation ». Le second type de règles est optimisé sur la série de données d'apports futurs traités. Ces dernières règles permettent de mesurer le potentiel de gain directement lié à l'optimisation des règles. Ces dernières simulations sont identifiées comme étant « avec optimisation ». Ces règles sont ensuite introduites dans le modèle du système hydrique de la rivière Manicouagan. La combinaison de règles optimisées ou non aux jeux d'apports naturels futurs permet de générer 40 scénarios (20 avec optimisation et 20 sans optimisation) de production hydroélectrique pour chacun des horizons. Il importe de mentionner que l'utilisation des règles de gestion établies pour la période de référence dans le contexte d'un climat futur est un exercice académique, puisque dans la réalité, les règles sont optimisées sur une base annuelle et qu'elles se modifieront graduellement au fil des années. La comparaison des règles « sans optimisation » avec celles dites « avec optimisation » permet néanmoins d'évaluer l'importance de cette opération comme méthode d'adaptation aux changements climatiques.

8.2 La modélisation du système hydrique

Cette section introduit en un premier temps l'optimisateur de règles de gestion employé pour la génération des règles de gestion. À ceci suivra une description du modèle de simulation de la gestion hydrique programmé pour les besoins de ce travail.

8.3 L'optimisation des règles de gestion

Les règles de gestion sont des commandes régissant les soutirages à exercer aux différents réservoirs selon le niveau d'eau de ceux-ci. Ces règles ont pour objectif d'assurer, tout au long de l'année, une capacité de production hydroélectrique satisfaisant à la demande par la gestion des réserves d'eau (réservoirs). L'optimisation de ces règles de gestion vise à maximiser la production électrique sur l'ensemble du réseau par des stratégies de soutirages minimisant les déversements non productifs et optimisant les niveaux des réservoirs. Ces règles optimisées sont générées par le PPS2 puis introduites dans le modèle de gestion hydrique.

8.4 Le modèle de gestion hydrique

Le modèle proposé est constitué de quatre sous-bassins combinant une organisation en série et en parallèle. Le transit des volumes d'eau d'un bassin à l'autre est fait sous le principe du bilan de masse à un pas de temps prédéterminé (journalier dans le cas présent). L'organisation de ce modèle est schématiquement représentée à la Figure 8.1.

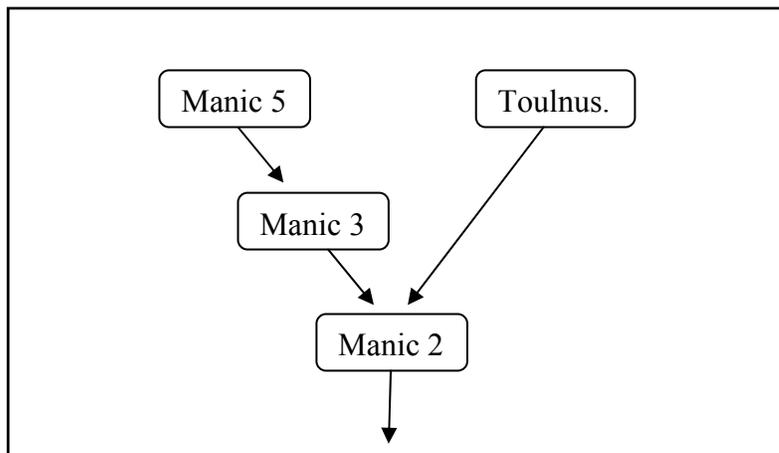


Figure 8.1 Schéma de l'organisation du réseau hydrographique dans le modèle de gestion hydrique

Les réservoirs Manic-5 et Touloustouc sont chacun à la tête d'une des branches du réseau formant le système parallèle. Manic-2 est le nœud inférieur (exutoire) servant de jonction aux deux branches. Manic-3, quant à lui, s'insère entre les réservoirs Manic-5 et Manic-2. Il est à noter que Manic-2 et 3 sont dotés de centrale au fil de l'eau.

8.5 Le bilan hydrique et le routage

Ce modèle est dépendant, en premier lieu, des règles de gestion. Les règles générées par le PPS2 hebdomadairement déterminent le volume d'eau à soutirer afin de maintenir les niveaux des réservoirs pour une production électrique optimale. Ce volume est alors turbiné et/ou déversé puis redirigé vers le sous-bassin aval où il sera disponible au pas de temps suivant. Les apports intrants, quant à eux, sont les apports naturels du sous-bassin concerné combiné aux soutirages (déversé et turbiné) au pas de temps précédant des sous-bassins en amont.

8.6 La production électrique

Les volumes d'eau soutirés établis par les règles de gestions lors du routage sont considérés turbinés jusqu'à atteinte de la capacité maximale de turbinage des installations. Le volume excédentaire est simplement déversé sans être turbiné (déversement non productif).

Les volumes d'eau turbinés ainsi établis permettent de déterminer périodiquement la production électrique à chacune des centrales. Pour Toulnostouc et Manic-5, les deux centrales à réservoir et la production électrique en MWh est estimée par la fonction $P(u,s)$ (Équation 8.1). Cette équation est celle d'une courbe de chargement optimum générée lors de l'optimisation des règles de gestion. Cette courbe permet d'établir la production en MW en fonction du débit turbiné déterminé par la règle de gestion. Afin de tenir compte du niveau des réservoirs et de l'influence considérable de celui-ci sur la production, un facteur de similitude est inséré dans l'équation sous forme d'alpha et bêta permettant de passer à la fonction inverse (Équations 8.3 et 8.4) :

$$P(u, s) = cg(u) \times \alpha(s) \quad (8.1)$$

$$P(u) = cg(u) \quad (8.2)$$

$$\alpha(s) = \left(\frac{ce(s)}{href} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (8.3)$$

$$\beta(s) = \left(\frac{ce(s)}{href} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (8.4)$$

Où « u » est le soutirage à turbiner en m^3/sec et « s » le volume d'eau admissible du réservoir en Hm^3 . La fonction « cg » fait référence à la courbe de génération ou courbe de chargement optimum qui permet, à partir du débit à turbiner, d'évaluer la production électrique. La fonction « ce » réfère à la courbe d'emmagasinement, celle-ci convertit un volume d'eau « s » contenu dans un réservoir en niveau équivalent de celui-ci. La constante « $href$ » est la hauteur de chute de référence propre à l'installation. Dans les cas de Manic-2 et 3 où les centrales sont au fil de l'eau, la production électrique s'évalue directement par l'utilisation de

la courbe de chargement optimum, ce qui résume ainsi la fonction de production à $P(u)$ de l'équation 8.2.

CHAPITRE 9

RÉSULTATS

Ce chapitre regroupe la synthèse des résultats finaux de cette étude. Les variables étudiées sont la production électrique, les déversements non productifs et le niveau des réservoirs. Ces résultats sont issus de trois opérations de modélisation aux caractéristiques et objectifs distincts.

La première opération de modélisation est exécutée par l'utilisation des apports naturels historiques (période de référence 1971-2000). Une optimisation des règles de gestion est faite sur ces données. Ces résultats ont pour objectif de servir de base de référence comparative.

La seconde opération de modélisation est exécutée par l'utilisation des 20 scénarios d'apports naturels futurs aux trois horizons 2025, 2055 et 2085. Les règles de gestions utilisées sont celles de la période de référence. Ces résultats, comparés à ceux de la période de référence, permettent d'estimer l'évolution des variables due aux changements climatiques.

La dernière opération de modélisation est exécutée sur les 20 scénarios d'apports naturels futurs aux trois horizons 2025, 2055 et 2085. La variante est qu'une optimisation des règles de gestion est faite à chacune des combinaisons scénario-horizon. Ces résultats, comparés aux précédents, permettent d'estimer l'évolution des variables due à l'optimisation des règles de gestion en conditions de changements climatiques.

9.1 Les niveaux des réservoirs

Le niveau est un indicateur important du potentiel de production électrique d'une centrale à réservoir telle que Manic-5 et Toulnostouc. La Figure 9.1 présente les niveaux annuels moyens des 20 scénarios obtenus suite aux trois opérations de simulations.

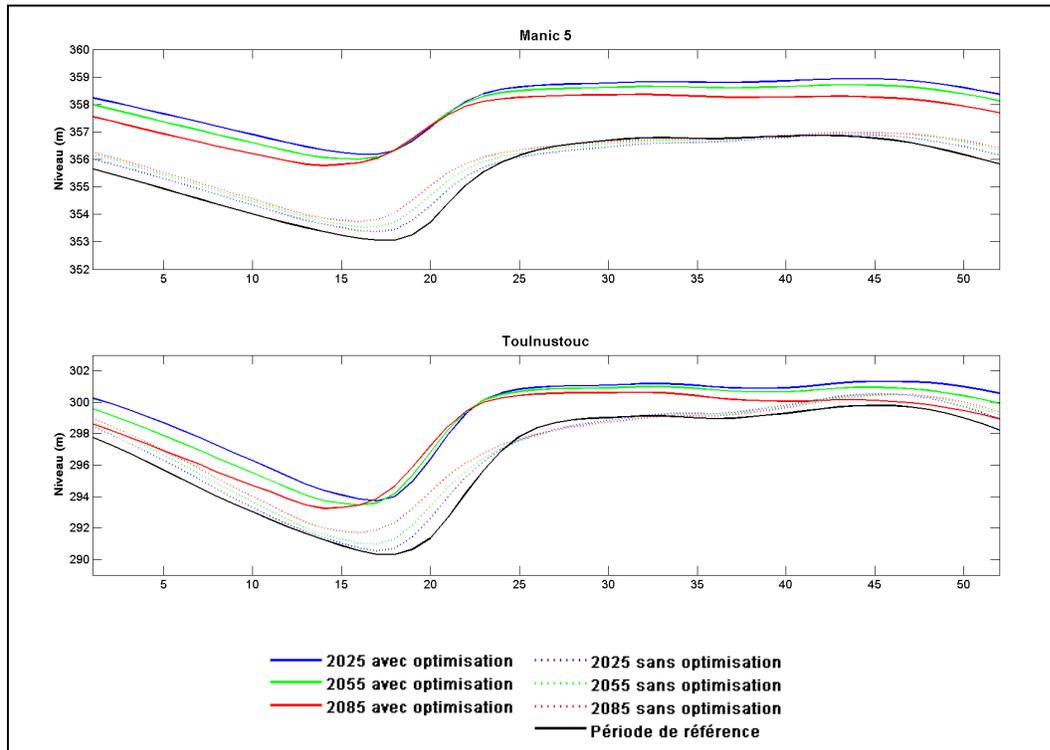


Figure 9.1 Niveaux des réservoirs Touloustouc et Manic-5 à la période de référence et aux horizons 2025, 2055 et 2085

Les règles de gestion actuelles, soumises aux scénarios climatiques futurs, génèrent des hausses modestes de niveaux aux réservoirs Manic-5 et Touloustouc qui tendent à augmenter dans le temps. La période de vidange précédant la crue printanière est la période où les rehaussements sont les plus marqués. Comparativement à la période de référence, le niveau moyen de Manic-5 pourrait subir une hausse de 14 à 38 cm (2025, 2085) alors que Touloustouc verrait son niveau s'élever de 41 à 77 cm pour les mêmes horizons. À la période hivernale, les hausses sont plus modérées alors que la période estivale conserve un état similaire aux observations passées. L'optimisation des règles de gestions sur les scénarios futurs permet un rehaussement considérable des niveaux aux deux réservoirs. Contrairement aux cas précédents, l'évolution temporelle des niveaux se fait cette fois-ci à la baisse. Au réservoir de Manic-5, le niveau moyen augmente de 2,52 m par rapport à la période de référence pour l'horizon 2025. Cette augmentation se réduit progressivement pour se terminer à 2,01 m en 2085.

9.2 Les déversements non productifs

Les déversements non productifs sont des indicateurs de perte de rendement due à une gestion déficiente et/ou à des installations inadaptées aux conditions réelles d'exploitation. Quantifier ces déversements permet, dans un premier temps, de démontrer le niveau d'efficacité de l'optimisation des règles de gestion, d'estimer les gains ou pertes de rendement puis finalement de souligner un potentiel de gain en production par l'adaptation des installations si déversements majeurs il y a. La Figure 9.2 présente les probabilités de déversement non productif liées aux divers horizons avec et sans optimisation des règles de gestion.

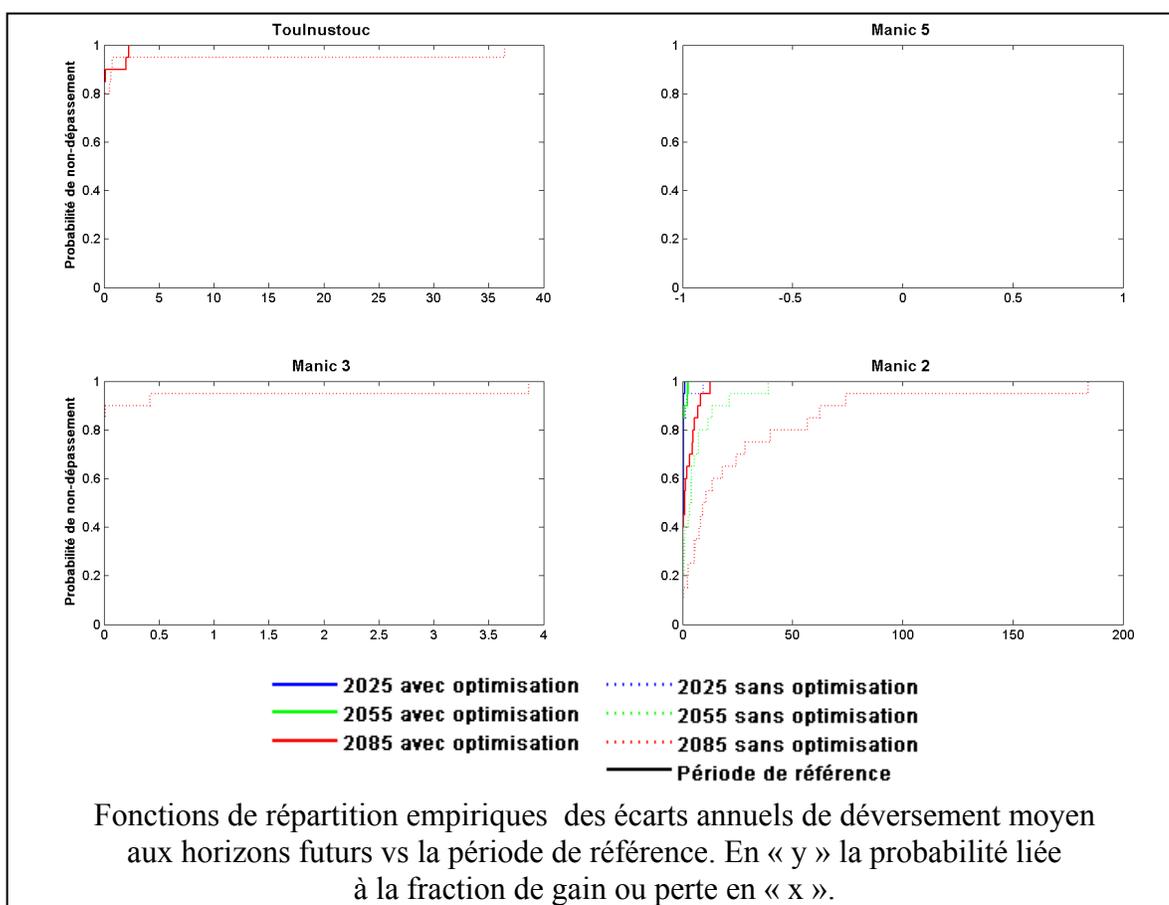


Figure 9.2 Probabilité de variation des déversements (hm^3) par rapport à la période de référence

En premier lieu, l'optimisation des règles de gestion sur le scénario d'hydraulicité actuel permet d'éliminer à 100 % les déversements non productifs. L'utilisation de ces mêmes règles appliquées aux scénarios futurs ne génère que des déversements négligeables sur Touloustouc et Manic-3 à l'horizon 2085. Manic-2 est la centrale présentant le plus de risque de déversement avec un relativement faible volume de déversement n'excédant pas 200 hm³ en 2085 et des déversements négligeables aux horizons précédents. L'optimisation des règles de gestion sur les scénarios futurs permet de réduire tout type de déversement non productif à des volumes moyens annuels inférieurs à 13 hm³. Finalement, Manic-5 demeure, sous toute condition, exempt de déversement.

9.3 La production d'énergie et le soutirage

En premier lieu, cette section présente les résultats généraux de la production électrique du parc de production Manicouagan. À ceci suivent les résultats détaillés aux centrales pour en faire ressortir les principales tendances.

Note : les soutirages ne sont pas directement abordés dans ce chapitre. La génération d'énergie étant directement liée au soutirage, la présentation des graphiques de ces deux paramètres devient redondante. Les remarques et observations concernant la production d'énergie sont donc aussi valables pour le soutirage.

9.4 Le parc de production Manicouagan

La Figure 9.3 présente les probabilités de générer des gains ou pertes en production d'énergie sur l'ensemble du parc de production de la rivière Manicouagan.

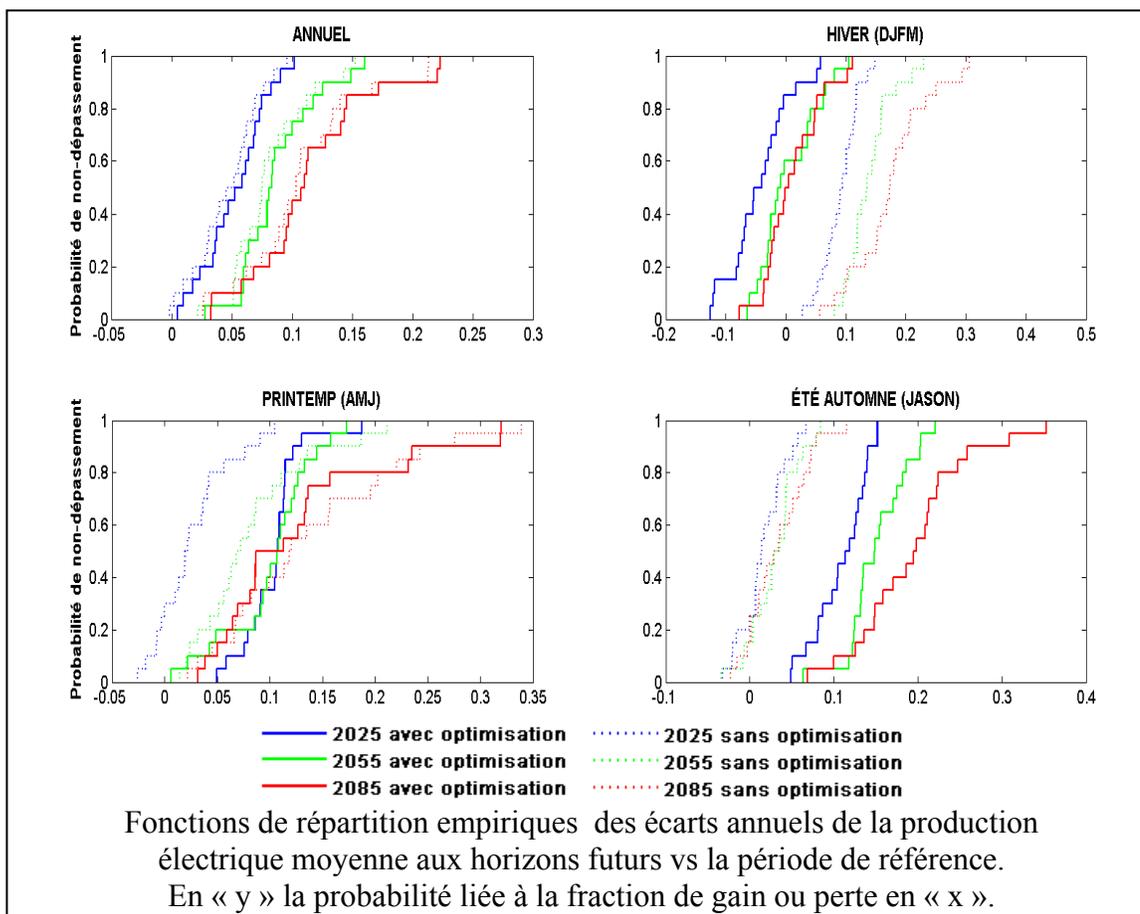


Figure 9.3 Probabilité de variation de la génération d'électricité du parc de production Manicouagan par rapport à la période de référence

Les différents scénarios d'hydraulicité, sans optimisation, démontrent de forte probabilité en des hausses de production annuellement. À l'horizon 2025, 19 scénarios sur 20 génèrent une hausse de production alors qu'aux horizons suivants cette proportion passe à 20 sur 20. Sans l'intervention de l'optimisation des règles de gestion, la hausse moyenne de 4,4 % en 2025 passe à 7,8 % en 2055 puis atteint 10,4 % en 2085.

L'optimisation des règles permet des gains additionnels sous tous les scénarios. Les gains moyens sont de 5 % en 2025, 8,5 % en 2055 et de 11 % en 2085. L'optimisation permet donc un gain supplémentaire moyen, comparativement aux scénarios non optimisés, de 0,6 % en production d'énergie et de 5 % en probabilité d'occurrence.

9.5 Les centrales à réservoirs

Les résultats annuels moyens aux centrales à réservoir Manic-5 et Touloustouc sont présentés à la Figure 9.4. Ces graphiques exposent les résultats des centrales à réservoir sous forme probabiliste.

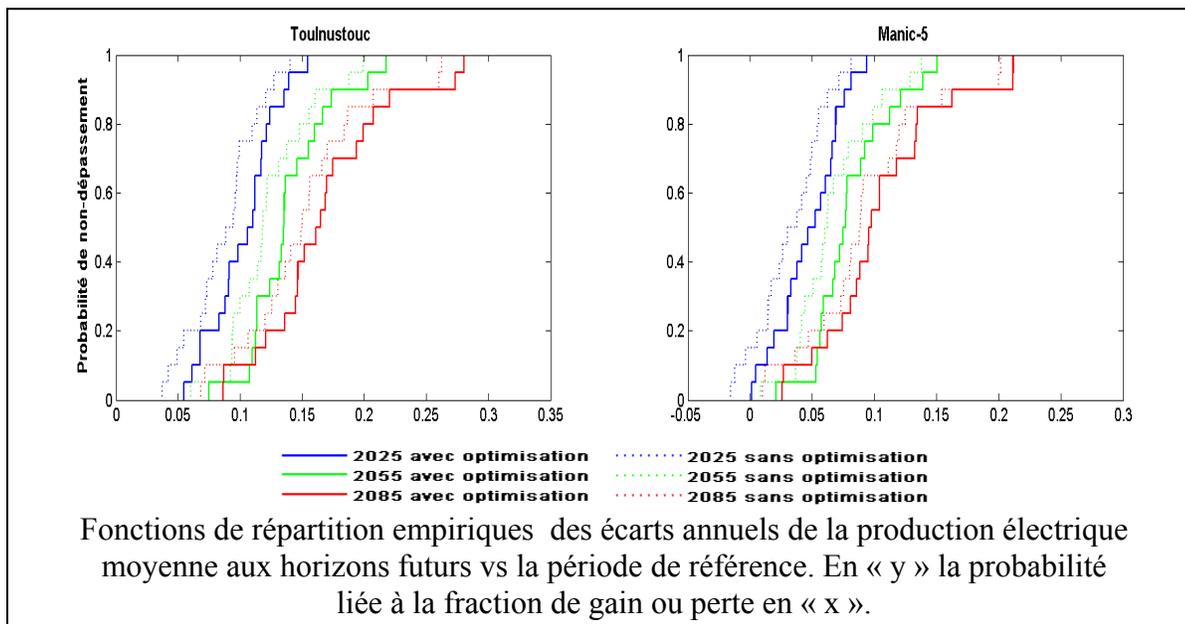


Figure 9.4 Probabilité de variation de la génération d'électricité des centrales à réservoir par rapport à la période de référence

Cette première figure démontre de forte probabilité que les règles de gestion actuelles permettront d'obtenir une hausse moyenne de la production d'électricité à la centrale Touloustouc de l'ordre de 8,5 % à 14,8 % (2025-2085). À la centrale Manic-5, les hausses moyennes sont de l'ordre de 3 % à 8,9 % (2025-2085) avec une faible probabilité (trois scénarios sur vingt) de baisse de productivité n'excédant pas 1,5 % (2025).

L'observation des résultats sur une base saisonnière (voir Figure 9.5 et annexe X) permet de dégager plus aisément les divergences dues à l'optimisation des règles de gestion.

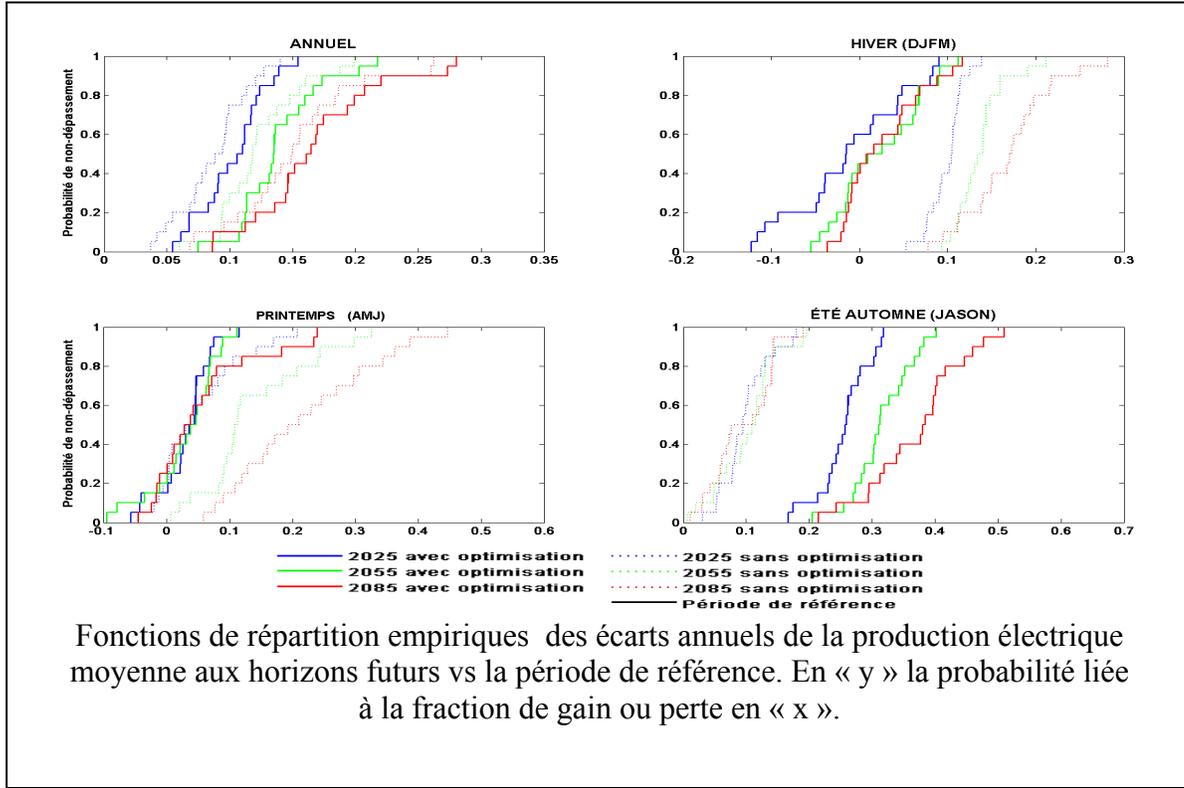


Figure 9.5 Probabilité de variation de la génération d'électricité à la centrale Toulnostouc par rapport à la période de référence

Au sous-bassin Toulnostouc, les règles de gestion actuelles transposées aux scénarios futurs favorisent une optimisation de la production d'énergie sur toute l'année. L'optimisation des règles de gestion modifie ce patron de production en concentrant les efforts d'optimisation sur la période estivale (gains de 15 % à plus de 50 %) et en permettant des baisses de production le reste de l'année avec une probabilité de 20 % à 60 %.

Au sous-bassin Manic-5 avant l'optimisation des règles, seule la saison estivale génère de fortes probabilités d'une baisse de production d'énergie [60 % à 85 %]. Tel qu'observé sur Toulnostouc, l'optimisation des règles engendre de fortes probabilités de baisse en génération d'énergie en hiver [50 % à 80 %] et concentre l'optimisation de la production sur les autres saisons.

L'analyse de la répartition annuelle de la production d'énergie de l'annexe XI détaille les énoncés précédents ainsi que l'incertitude croissant dans le temps dû aux différents scénarios.

Les observations passées démontrent une complémentarité entre Manic-5 et Tournustouc. Lors de la crue printanière, la production de Manic-5 est progressivement abaissée pour permettre le remplissage du réservoir. La production de Manic-5 atteint son minimum à la mi-mai. Tournustouc, complémentairement, atteint une pointe de production à cette même période. En conditions futures, les règles actuelles tendent à maintenir ce patron de production et génèrent une forte incertitude sur Tournustouc lors de la période de crue. L'optimisation des règles supprime le patron de complémentarité dépendant de Tournustouc en synchronisant la vidange et remplissage de ce dernier sur celui de Manic-5.

9.6 Les centrales au fil de l'eau

La Figure 9.6 et l'annexe X exposent les résultats sous forme probabiliste des centrales Manic-2 et Manic-3.

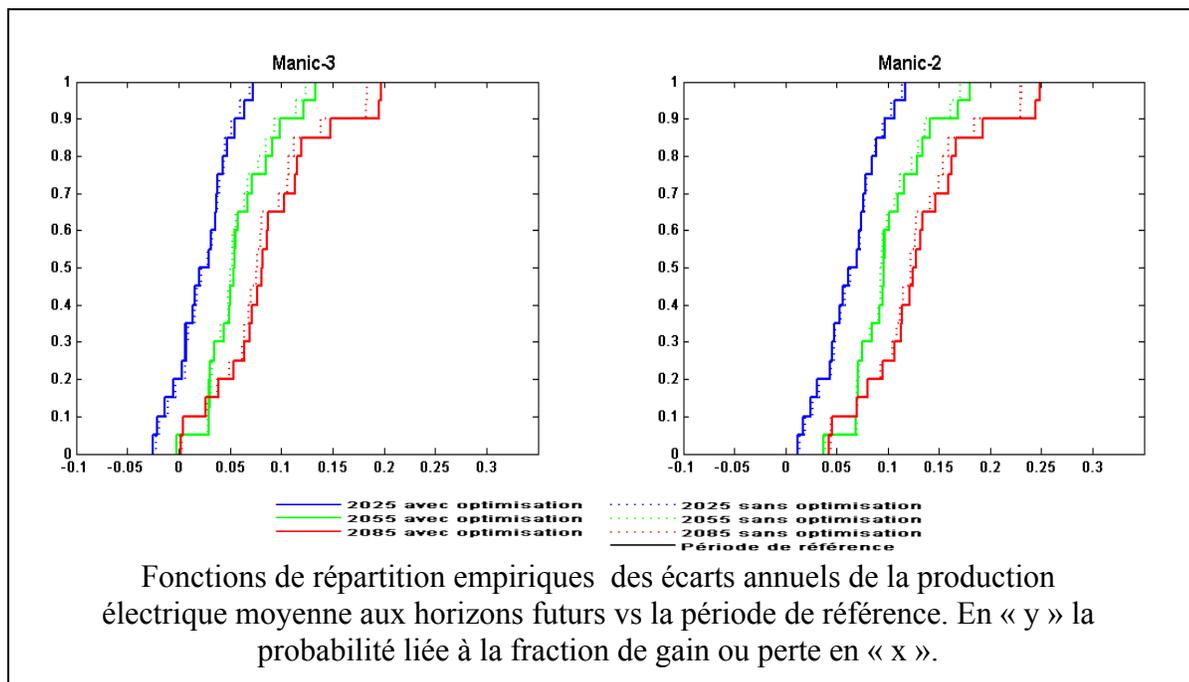


Figure 9.6 Probabilité de variation de la génération d'électricité des centrales au fil de l'eau par rapport à la période de référence. Les centrales Manic-3 et Manic-2, par leur nature (fil de l'eau) et leur positionnement en cascade, présentent une certaine similarité de leurs réponses en production d'électricité. La principale différence est que Manic-2 profite des apports de Manic-5 et Tournustouc, lui

permettant un gain supplémentaire moyen de 5 % comparativement à Manic-3 qui ne dépend que de Manic-5. L'analyse des résultats sur une base annuelle révèle que l'optimisation des règles de gestion n'a que peu d'impact sur la production d'électricité des deux centrales. L'analyse des résultats sur une base saisonnière ou périodique est nécessaire pour percevoir les modifications apportées par l'optimisation (voir annexe X).

Par exemple, sans l'optimisation des règles de gestion, Manic-3 générera en hiver des gains moyens de 7 % à 15 % (horizon 2025 à 2085). Au printemps les gains moyens seront de -0,2 % à 8,5 % avec un risque considérable en 2025 puis très peu probable en 2055 et 2085 de connaître des baisses de production n'excédant pas 5 %. En période estivale les probabilités de générer des pertes de production n'excédant pas 5 % sont à la hausse alors que les gains moyens en production varient dans le temps de -0,6 % à 1,4 %.

L'optimisation des règles modifie le patron de production en éliminant le risque de perte de production durant les mois d'avril à novembre, augmentant le gain moyen de 8,5 % à 11 % au dessus de la période de référence au printemps et de 6,4 % à 13,6 % en période estivale. L'hiver présente de fortes probabilités de baisse de productivité avec une production moyenne de 1,2 % à 7,3 % sous la période de référence.

Manic-2 présente une réponse similaire à celle de Manic-3 bonifiée d'une hausse de la production de l'ordre de 4 % due à l'influence des apports de Toulnostouc sur ce dernier sous-bassin (voir annexe X).

CHAPITRE 10

DISCUSSION

10.1 L'impact des changements climatiques sur la production

La modélisation de la période de référence permet de comprendre le comportement et mode de gestion actuels du système Manicouagan. Tout d'abord, deux types de comportements sont observés, celui des grands réservoirs puis celui des centrales au fil de l'eau. Les sous-bassins avec réservoirs, par leur importante superficie et leur forte capacité de rétention, gouvernent le mode de gestion du système hydrique. Selon ce mode de gestion optimisé sur la période de référence, Tournustouc est en dépendance de Manic-5 dans un patron de complémentarité. Cette complémentarité s'observe par la synchronisation de la pointe de production de Tournustouc au seuil de production de Manic-5 afin d'éviter une surcharge en apports aux centrales en aval ce qui aurait pour effet de générer des déversements non productifs à Manic-2. Ce synchronisme est nécessaire pour permettre à Tournustouc de soutirer une part considérable du volume de fonte de la neige qui excède la capacité de rétention du réservoir. De plus, ce patron de gestion permet de supporter la production par le rehaussement du soutirage de Tournustouc au moment où Manic-5 atteint un minimum de production. Les centrales au fil de l'eau quant à elles sont en mode passif, sans capacité de rétention réelle, elles turbinent tous les apports jusqu'à l'atteinte de la capacité maximale des installations sans aucune forme de régulation. La contribution de Manic-2 et Manic-3 aux apports naturels globaux est noyée par l'important soutirage des réservoirs amont. Globalement, les réponses hydrologiques autant que celles de la génération d'énergie de Manic-3 sont fortement corrélées à Manic-5, alors que Manic-2 est à l'image globale du parc puisqu'elle subit à la fois les influences de Manic-5 et de Tournustouc.

Sur l'ensemble du parc, les changements climatiques ont un impact considérable. Les fortes probabilités d'augmentation des apports naturels en hiver, combinées au mode de gestion actuel, favorisent un gain de production d'énergie durant cette période. Ce gain est dû en

partie à l'élévation du niveau moyen des réservoirs favorisant un gain de rendement durant cette période, mais principalement à l'augmentation des soutirages, tel que le montre la Figure 10.1. Cette figure permet d'identifier la difficulté avec laquelle les règles de gestion actuelles s'adaptent au devancement de la crue printanière.

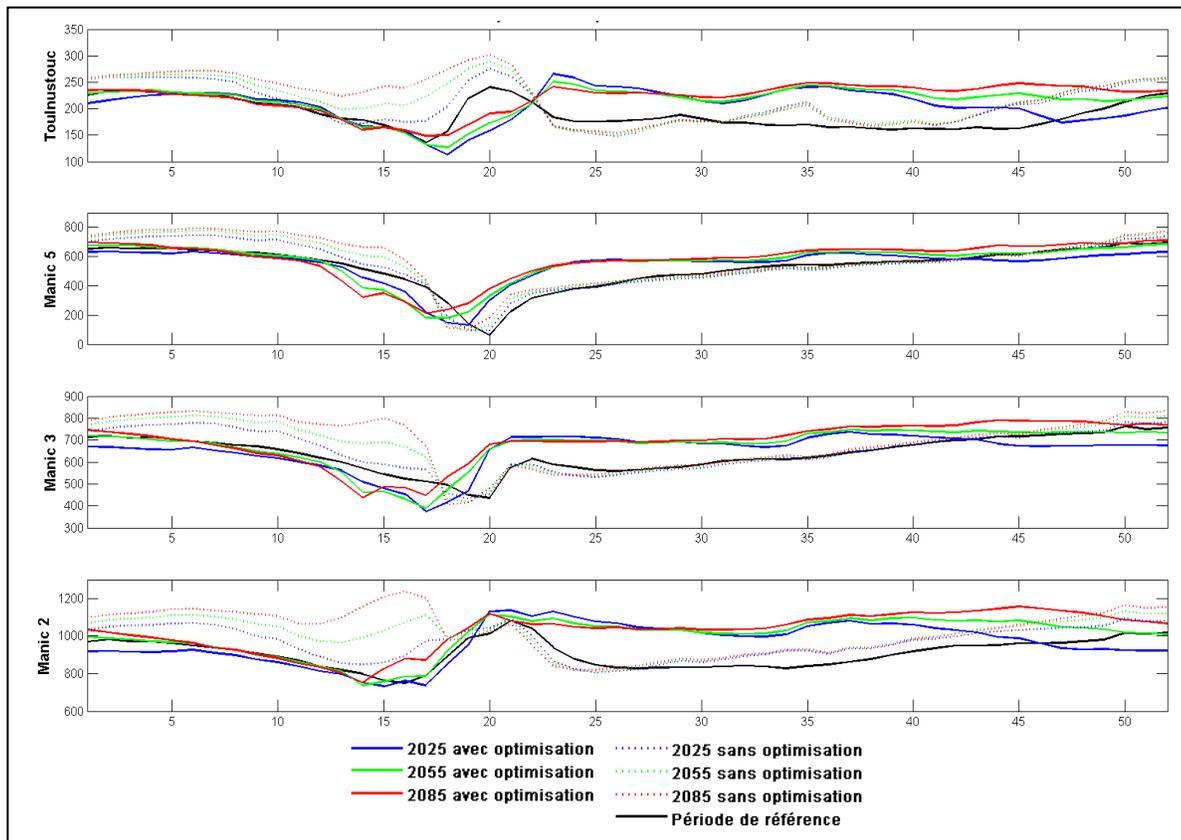


Figure 10.1 Soutirage moyen (20 projections) aux réservoirs Manic-5 et Touloustouc pour les horizons 2025, 2055 et 2085

L'annexe XI met en évidence une forte incertitude liée aux opérations de gestion durant la crue printanière au réservoir Touloustouc. Un mode de gestion non optimisé tend à reproduire le synchronisme actuel de production en retardant les manœuvres liées à la crue printanière et en maintenant l'effet de complémentarité entre les deux réservoirs. Cette complémentarité qui place Touloustouc en dépendance de Manic-5, cumule ainsi l'incertitude et l'incapacité de s'adapter au devancement de la vidange de son réservoir en accord avec les signaux des changements climatiques.

Ce manque de souplesse des règles actuelles face à la crue printanière est responsable de la majorité des déversements non productifs. Ces déversements sont causés, en premier lieu, par de fortes hausses des soutirages à Manic-5 et Toulnostouc qui, une fois combinés dans le sous-bassin Manic-2 excèdent la capacité à turbiner des installations locales dès 2025 (voir annexeXII). La prise en compte tardive de la crue printanière combinée aux apports naturels hivernaux à la hausse réduit progressivement le temps de vidange disponible au réservoir Toulnostouc. Dès 2055, des évènements apparaissent où le niveau nécessaire pour recevoir le volume de crue n'est pas atteint, ce qui engendre des déversements non productifs pour éviter d'atteindre la cote de sécurité maximale du réservoir. Ces déversements laissent présager une incapacité des infrastructures actuelles à répondre à la demande d'un tel mode de gestion.

En été-automne sur Toulnostouc et Manic-2, la Figure 10.1 démontre un léger gain en soutirage comparativement à la période de référence alors que les gains sont nuls sur Manic-3 et 5. En contrepartie, les probabilités de générer des hausses de production pour cette période sont supérieures à 80 % sur l'ensemble du parc, avec des gains pouvant excéder 10 % en 2085. Toulnostouc et Manic-2 contribuent avec certitude à cette hausse alors que la probabilité de voir Manic-5 et Manic-3 y contribuer est mitigée. L'examen des niveaux aux réservoirs permet d'identifier, dès la 32^e semaine (Toulnostouc) et la 40^e semaine (Manic-5), une hausse comparativement à la période de référence. Cette hausse des niveaux n'est par contre pas suffisante pour être responsable d'une hausse de rendement favorisant des gains en production (voir annexe XIII). Dans tous les cas, la hausse de production serait liée aux soutirages légèrement plus élevés. Les moyennes de soutirage sous la période de référence aux sous-bassins Manic-3 et Manic-5 viennent appuyer les probabilités incertaines de gains en production d'énergie.

10.2 L'optimisation de la production

L'optimisation des règles de gestion influence considérablement les résultats sur deux points majeurs. Le premier, les grands réservoirs sont gérés à des niveaux moyens plus élevés, soit de 1,79 m à 2,67 m au dessus de la période de référence. Ce rehaussement du niveau des

réservoirs affecte théoriquement de façon positive le rendement des groupes turbine-alternateur.

Le second point est une réorganisation du patron de production sur l'ensemble du parc, mais plus particulièrement importante sur le bassin versant Toulnostouc. Tout d'abord, au sous-bassin Manic-5, alors que sans optimisation la production augmentait durant l'hiver en accord avec les augmentations d'apports naturels, l'optimisation inverse la tendance et réduit la production. Au printemps, les règles adaptées permettent de bien prendre en charge la crue printanière. L'incertitude concernant la production d'énergie durant la période de crue est beaucoup plus importante. Cette dernière est conforme à l'incertitude grandissante sur l'initiation des crues printanières. Cette synchronisation aux événements de crue combinée à une transition rapide vers un patron de production plus fort durant l'été sont responsables des gains importants en production durant cette saison. En été, les règles de gestion tirent profit du plus grand volume d'eau disponible dû au rehaussement de niveau aux réservoirs. Ce volume est exploité pour favoriser une production plus soutenue par l'augmentation des soutirages durant la saison estivale. Dans son ensemble, l'optimisation des règles de gestion permettra des gains de l'ordre de 4 % à 10,1 % (2025 à 2085) aux installations de Manic-5 contre 3% à 8,9% sans optimisation des règles de gestion.

L'optimisation des règles de gestion au sous-bassin Toulnostouc génère un résultat similaire à Manic-5 en hiver. L'importante diminution des probabilités de générer des gains de production est causée par un soutirage revu à la baisse. Au printemps, l'optimisation sur les horizons futurs élimine complètement le lien de complémentarité observé entre Toulnostouc et Manic-5. Le patron de production ne s'organise plus sur la venue de la crue printanière de Manic-5, ce qui élimine l'incertitude entourant la production d'énergie due à cette dépendance envers Manic-5. L'incertitude durant la crue printanière demeure tout de même considérable, mais à l'image de celle observée dans les scénarios d'apports sur cette même période. La production durant le printemps se retrouve par ce fait reportée de trois semaines réduisant considérablement les gains de production au printemps, mais augmentant ceux de l'été. Tout comme au sous-bassin Manic-5, l'optimisation favorise des gains de production

durant la saison estivale. La gestion aux horizons futurs, combinée aux apports naturels plus importants maintient un niveau de réservoir plus élevé. Malgré cette hausse du niveau, le rendement est à la baisse sur Toulnostouc durant l'été. Ceci démontre que les installations seront utilisées au-delà de leur optimum et que le gain en production est essentiellement dû aux soutirages plus importants durant cette saison (voir l'annexe XI et XIII).

Pour les centrales Manic-3 et Manic-2, l'optimisation des règles de gestion n'a que peu d'impact sur la production moyenne d'énergie. N'ayant aucun gain possible lié au rehaussement des niveaux, la diminution des soutirages en hiver aux grands réservoirs et la hausse en été-automne s'équilibre pour générer une diminution moyenne de la production de l'ordre de 0,1 % sur les centrales au fil de l'eau. Le gain le plus important est celui lié à la réduction des déversements non productifs de Manic-2 (2085), qui, par l'optimisation des règles devient quasi nul.

L'analyse des rendements démontre que les centrales à réservoir profiteront d'un rendement moyen légèrement à la hausse (0,27 % à 0,38 %) à l'horizon 2025 alors que les centrales au fil de l'eau maintiendront l'état actuel. Pour les horizons suivants, le rendement subira une dégradation négligeable de 0,05 % à 0,15 % par horizon aux centrales à réservoir alors qu'aux centrales au fil de l'eau la dégradation sera inférieure à 0,05 %.

Plus en détails, le rendement de Manic-5 à l'horizon 2025 est en tout point supérieur à celui de la période de référence (annexe XIII). Par contre aux horizons suivants, le rendement diminue progressivement tout comme le niveau du réservoir alors que la moyenne du soutirage est à la hausse. Il serait à considérer que les installations de la centrale Manic-5 soient en un premier lieu, surdimensionnées pour les conditions d'exploitation actuelles. De plus, l'exploitation de Manic-5 sera au plus près de son optimum de rendement sous l'horizon 2025 par le biais de niveau et du soutirage moyen revus à la hausse. Aux horizons suivants, une hausse continue des soutirages permettra de soutenir la croissance de production électrique. Finalement, une baisse du niveau moyen au réservoir Manic-5, en réaction aux soutirages toujours plus soutenus, sera en partie responsable de la perte de

rendement progressive de cette centrale. La possibilité que les soutirages toujours plus élevés excèdent le point de rendement optimum des groupes turbine-alternateur serait aussi à considérer dans les causes de perte de rendement. Dans le même sens, le potentiel de gains en production par un soutirage plus soutenu, malgré une perte de rendement, semble plus important que les gains disponibles par un rehaussement du niveau de réservoir.

En moyenne, le rendement de la centrale Touloustouc sera, aux horizons futurs, plus élevé qu'à la période de référence. Sur une base saisonnière, le rendement sera plus fort en hiver et printemps alors qu'il sera plus faible en été et en automne. L'étude en simultané des graphiques des soutirages et du rendement permet de mettre en évidence un lien entre ces derniers paramètres. Plus le soutirage est faible comparativement à la période de référence, plus le rendement augmente. À l'inverse, les hausses en soutirage durant l'été et l'automne tendent à faire diminuer le rendement. Ces tendances persistent dans le temps ce qui pousse le rendement à la baisse alors que les soutirages tendent à augmenter. Contrairement à Manic-5, les installations de Touloustouc semblent être parfaitement adaptées au régime d'exploitation présent. Par contre, les pertes de rendement et gains de production semblent indiquer que les groupes turbine-alternateur seront exploités au-delà de leur optimum aux horizons futurs. Puis finalement, le niveau du réservoir à la baisse dans le temps contribuera certainement à la dégradation du rendement. Ici encore on constate qu'un soutirage accru semble plus profitable, d'un point de vue production que le rehaussement du niveau du réservoir.

À Manic-3 et Manic-2, durant l'hiver et le printemps, le rendement ne subit que peu de variations comparativement à la période de référence. Seule la hausse des soutirages en été parvient à modifier de façon perceptible le rendement qui passe alors sous la moyenne de la période de référence. Les niveaux ne pouvant être en cause ici, ce résultat pointe encore une fois sur la capacité des groupes turbine-alternateur qui semblent cette fois-ci parfaitement adaptés aux conditions actuelles d'exploitation et semblent fonctionner sur l'optimum de leurs rendements. Le poids important de Manic-5 et Touloustouc dans l'optimisation des règles de gestion ne permet pas d'atteindre un rendement supérieur sur ces centrales.

Dans l'ensemble, l'optimisation des règles de gestion favorisera une optimisation des grands réservoirs en minimisant les déversements aux centrales avalées dus aux soutirages simultanés de Manic-5 et Toulouste. Les gains de production générés grâce à l'optimisation ne sont que très peu dus au rehaussement des niveaux aux réservoirs. Ces rehaussements aux réservoirs sont le résultat des hausses significatives d'apports naturels. Ce volume accru aux réservoirs permet l'augmentation des soutirages qui est à l'origine de la quasi-totalité des gains en production d'énergie. D'un point de vue du rendement, exception faite de Manic-5, toutes les installations semblent fonctionner dans le présent près de leur optimum. Manic-5 semble être conçue pour supporter de plus grands apports et/ou un niveau de réservoir supérieur. Dans le futur, toutes les installations pourraient être appelées à fonctionner au-delà de leur optimum.

Pour terminer, une comparaison de cas similaires soulève un questionnement. Des études sur le bassin versant de la rivière Péribonka, bassin versant voisin à celui de la rivière Manicouagan (Minville, 2008, Minville et *al.* 2009, Minville et *al.* 2010), démontraient de fort potentiel de gain en production par l'optimisation des règles de gestion. L'étude de la rivière Manicouagan, avec ses résultats plus mitigés, soulève un point non négligeable. La présence d'un sous-bassin beaucoup plus important que les autres et la présence de très grand réservoir (Manic-5) semble être problématique. Dans le présent cas, Manic-5 représentant près de 50% de la superficie totale du bassin versant et son réservoir de capacité excessive, possède un poids trop important dans le processus d'optimisation des règles de gestion. Le résultat est une optimisation des règles ne prenant pratiquement compte que de Manic-5 et centré sur ce dernier. Il est donc difficile voir impossible d'optimiser parfaitement la production aux autres sous-bassins. La capacité de rétention et le volume disponible de Manic-5 qui permet d'alimenter le soutirage de façon soutenu et hors-norme ne permettent donc pas une comparaison directe au cas de la rivière Péribonka.

CONCLUSION

La recherche dans le domaine des changements climatiques constitue un défi de taille. Les impacts liés à ces changements seront majeurs et nécessitent dès maintenant une meilleure compréhension de ceux-ci. Cette compréhension permettra de déterminer les stratégies et ressources nécessaires pour s'y adapter le plus rapidement possible. L'adaptation de la production hydroélectrique du Québec représente l'un des défis de taille pour notre société. Des études ont démontré que les changements climatiques auront un impact significatif sur le régime hydrique des bassins versants québécois. Certaines de ces études se sont penchées plus particulièrement sur l'incertitude entourant ces changements et l'origine de celle-ci. L'étude présente oriente les efforts sur l'adaptation potentielle aux changements climatiques d'un bassin versant québécois. L'objectif étant une étude d'impact de l'optimisation des règles de gestion sur la production hydroélectrique du bassin versant Manicouagan, le résultat est une image du potentiel d'adaptation que génère l'optimisation des règles.

Tout d'abord, une approche de calage du modèle hydrologique HSAMI a été expérimentée. La transposition en condition de changements climatiques du modèle HSAMI, modèle empirique global, induit une incertitude et possiblement un biais important. Pour pallier à cette problématique, le calage en parallèle et simultané des sous-bassin de la rivière Manicouagan a été expérimenté. Cette méthode combinée à des études de corrélation a permis de faire passer le nombre de paramètres initialement fixé à 69 à une configuration allégée à 25 paramètres. Ce premier pas permet d'augmenter le niveau de confiance en la transposition du modèle en conditions de changements climatiques tout en préservant la performance de ce dernier sur les grands réservoirs (baisse du Nash-Sutcliffe n'excédant pas 1 %). Pour ce qui est de Manic-3 une diminution de 10 % du Nash-Sutcliffe résulte de cette opération, établissant le coefficient de Nash-Sutcliffe à une valeur acceptable de 0,71.

La création des scénarios météorologiques futurs soumis aux des changements climatiques a été exécuté par l'entremise de la méthode des deltas. 20 combinaisons de modèles et

scénarios d'émission de gaz à effet de serre ont été retenus pour créer vingt scénarios météorologiques à chacun des trois horizons, soit 2025, 2055 et finalement 2085.

HSAMI ainsi calé et soumis aux différents scénarios climatiques a permis la modélisation hydrologique afin de générer les scénarios d'apports en découlant. Cette large gamme de scénarios permet en un premier temps de tracer une image représentative de l'incertitude issue des scénarios de GES et des MCG. L'analyse des scénarios d'apports futurs permet de dégager les grandes tendances entourant l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant. Cette dernière démontre que l'arrivée des crues printanières subira un devancement certain pouvant atteindre jusqu'à un mois en 2085. Des hausses considérables des débits d'hiver se feront progressivement sentir et une variabilité croissante concernant la pointe et volume de la crue printanière sont aussi à venir.

Finalement, ces scénarios d'apports futurs sont introduits dans un simulateur de gestion du système hydrique dont les règles ont été calculées avec à un optimisateur de règles de gestion. Les résultats démontrent clairement que sur une base annuelle, les changements climatiques auront des répercussions positives et significatives sur la production d'hydroélectricité. Le parc de production Manicouagan génèrera dès 2025 des hausses de production d'énergie moyennes de 4,4 %. Cette hausse pourrait atteindre une moyenne de 10,4 % en 2085. Ces gains sont directement liés aux apports naturels plus abondants aux horizons futurs. Malgré ces gains, les déversements non productifs mettent en évidence un manque d'efficacité du mode de gestion actuel à s'adapter aux impacts des changements climatiques. L'optimisation des règles de gestion parvient à élever les niveaux aux réservoirs, augmenter les soutirages tout en réduisant la fréquence et le volume des déversements non productifs. Cette hausse d'efficacité se traduit par un gain moyen de production d'énergie de 0,6 % sur l'ensemble du parc. Incluant les gains dus aux changements climatiques et à l'optimisation des règles, le potentiel en production sur l'ensemble du parc pourrait connaître une hausse de 5 % à 11 % (2025-2085).

Si les résultats démontrent l'efficacité de l'optimisation des règles de gestion pour pallier aux impacts des changements climatiques sans intervention sur les équipements et infrastructures, ces mêmes résultats démontrent que les groupes turbine-alternateur ne seront probablement pas exploités à leur rendement optimum. Une étude sur l'optimisation des équipements serait nécessaire pour quantifier ce potentiel disponible que l'optimisation des règles de gestion ne peut exploiter.

ANNEXE I

INFORMATION D'AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA SUR LES DONNÉES NLWIS

Document émis par Agriculture et Agroalimentaire Canada concernant leurs données météorologiques nommées NLWIS.

The poster is titled "A Daily 10km Gridded Climate Dataset for Canada, 1961-2003" and is a collaboration between NLWIS/AAFC, Natural Resources Canada, Environment Canada, and the Australian National University. It features a "NEW" starburst in the top right corner. The main content is organized into several sections:

- Introduction:** Explains the dataset's purpose for climate modeling and research.
- Why do we need an Interpolated Gridded Data Set?** Discusses the need for consistent, high-resolution data for modeling.
- The ARIZIPM Model:** A flowchart showing the process from "Input Data" (10km Gridded) and "The Great Validators" to "Output Data (Kilohm Grid)".
- Grid Generation: Input Data:** A map of Canada showing the input data grid.
- Grid Generation: Output Data (Kilohm Grid):** A map of Canada showing the output data grid, with a yellow arrow pointing from the input data to the output data.
- The Collaborative Team:** Lists the institutions and individuals involved in the project.
- How to I get the data?** Provides information on how to access the dataset.

The poster also includes the Canadian flag and the "Canada" logo at the bottom.

Figure-A I-1 Description des données météorologiques NLWIS

ANNEXE II

RÉSULTATS DES OPÉRATIONS DE CALAGE ET DE VALIDATION CROISÉE

Les tableaux suivants représentent les coefficients de Nash-Sutcliffe des calages automatiques et validations sur le modèle HSAMI pour les différentes sources de données. Ces résultats sont issus de la procédure décrite à la section 5.3 et sont à la base de l'analyse et du choix énoncé à la section 5.4.

Tableau-A II-1 Résultats de simulations des données PQDH

		Source des données : PQDH											écart	
		# simulation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	moyen	
Manic 2	1975-1989	Calage	0.82	0.82	0.82	0.82	0.83	0.82	0.83	0.83	0.82	0.82	0.09	
	1990-2004	Validation	0.74	0.73	0.74	0.74	0.74	0.69	0.73	0.73	0.74	0.73		
	1990-2004	Calage	0.796	0.787	0.800	0.804	0.803	0.804	0.804	0.804	0.802	0.795	0.784	0.03
	1975-1989	Validation	0.774	0.783	0.763	0.759	0.753	0.768	0.756	0.762	0.782	0.742		
Manic 3	1975-1989	Calage	0.71	0.78	0.72	0.74	0.72	0.74	0.74	0.72	0.71	0.72	-0.06	
	1990-2004	Validation	0.80	0.79	0.80	0.77	0.80	0.78	0.77	0.79	0.80	0.80		
	1990-2004	Calage	0.839	0.837	0.831	0.837	0.833	0.839	0.834	0.831	0.829	0.834	0.15	
	1975-1989	Validation	0.689	0.691	0.686	0.694	0.680	0.689	0.682	0.679	0.669	0.686		
Toulous.	1975-1989	Calage	0.862	0.861	0.879	0.880	0.869	0.869	0.864	0.869	0.855	0.873	0.08	
	1990-2004	Validation	0.788	0.789	0.775	0.778	0.795	0.795	0.789	0.792	0.789	0.781		
	1990-2004	calage	0.800	0.803	0.805	0.806	0.809	0.800	0.804	0.809	0.802	0.804	-0.04	
	1975-1989	validation	0.848	0.845	0.853	0.841	0.847	0.846	0.843	0.842	0.843	0.848		
Manic 5	1975-1989	calage	0.86	0.86	0.86	0.85	0.86	0.85	0.86	0.86	0.86	0.85	0.02	
	1990-2004	validation	0.84	0.84	0.84	0.85	0.84	0.84	0.84	0.83	0.84	0.84		
	1990-2004	calage	0.891	0.906	0.891	0.892	0.877	0.890	0.880	0.898	0.884	0.886	0.11	
	1975-1989	validation	0.803	0.781	0.801	0.710	0.796	0.783	0.779	0.782	0.808	0.800		
P. L. Manic	1975-1989	calage	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	-0.01	
	1990-2004	validation	0.77	0.781	0.77	0.76	0.77	0.78	0.76	0.77	0.76	0.76		
	1990-2004	calage	0.821	0.816	0.821	0.819	0.815	0.816	0.818	0.815	0.815	0.820	0.11	
	1975-1989	validation	0.717	0.717	0.723	0.727	0.713	0.726	0.643	0.657	0.719	0.724		

Tableau-A II-2 Résultats de simulations des données STATION

		Source des données : STATION											écart
		# simulation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	moyen
Manic 2	1974-1988	calage	0.72	0.71	0.71	0.72	0.71	0.72	0.73	0.71	0.73	0.71	0.01
	1989-2003	validation	0.70	0.72	0.71	0.71	0.70	0.71	0.71	0.71	0.68	0.71	
	1989-2003	calage	0.751	0.758	0.755	0.753	0.751	0.758	0.757	0.752	0.761	0.754	0.12
	1974-1988	validation	0.587	0.656	0.620	0.615	0.597	0.675	0.670	0.620	0.654	0.626	
Manic 3	1974-1988	calage	0.71	0.73	0.70	0.71	0.70	0.73	0.71	0.71	0.70	0.71	0.12
	1989-2003	validation	0.59	0.50	0.61	0.59	0.62	0.53	0.63	0.59	0.63	0.60	
	1989-2003	calage	0.768	0.771	0.773	0.772	0.771	0.775	0.776	0.774	0.764	0.773	0.21
	1974-1988	validation	0.537	0.565	0.545	0.576	0.579	0.552	0.539	0.542	0.572	0.575	
Toulus.	1974-1988	calage	0.838	0.837	0.835	0.831	0.835	0.833	0.834	0.838	0.838	0.830	0.18
	1989-2003	validation	0.651	0.640	0.656	0.631	0.646	0.659	0.676	0.648	0.660	0.638	
	1989-2003	calage	0.825	0.820	0.825	0.821	0.824	0.815	0.816	0.827	0.825	0.825	0.10
	1974-1988	validation	0.723	0.731	0.723	0.730	0.732	0.725	0.720	0.729	0.740	0.718	
Manic 5	1974-1988	calage	0.86	0.85	0.86	0.85	0.86	0.86	0.85	0.86	0.85	0.86	0.25
	1989-2003	validation	0.59	0.60	0.60	0.60	0.59	0.59	0.62	0.61	0.61	0.59	
	1989-2003	calage	0.787	0.779	0.781	0.785	0.776	0.781	0.785	0.783	0.783	0.781	0.07
	1974-1988	validation	0.681	0.660	0.735	0.703	0.705	0.736	0.693	0.741	0.749	0.710	
P. L. Manic	1974-1988	calage	0.71	0.71	0.72	0.71	0.71	0.72	0.71	0.71	0.72	0.72	0.55
	1989-2003	validation	0.14	0.175	0.16	0.20	0.20	0.12	0.19	0.15	0.17	0.17	
	1989-2003	calage	0.661	0.666	0.684	0.662	0.668	0.674	0.664	0.684	0.682	0.674	0.18
	1974-1988	validation	0.514	0.516	0.490	0.497	0.492	0.480	0.506	0.488	0.478	0.484	

Tableau-A II-3 Résultats de simulations des données NLWIS

		Source des données : NLWIS											écart
		# simulation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	moyen
Manic 2	1974-1988	calage	0.79	0.80	0.81	0.80	0.81	0.80	0.80	0.81	0.82	0.79	0.12
	1989-2003	validation	0.70	0.66	0.67	0.69	0.68	0.69	0.67	0.70	0.71	0.69	
	1989-2003	calage	0.805	0.806	0.810	0.809	0.807	0.808	0.805	0.801	0.807	0.809	0.05
	1974-1988	validation	0.764	0.758	0.761	0.756	0.758	0.756	0.756	0.744	0.759	0.755	
Manic 3	1974-1988	calage	0.76	0.75	0.75	0.76	0.74	0.75	0.72	0.75	0.74	0.76	0.14
	1989-2003	validation	0.65	0.59	0.61	0.60	0.60	0.61	0.62	0.64	0.64	0.55	
	1989-2003	calage	0.804	0.809	0.808	0.808	0.800	0.805	0.801	0.800	0.808	0.807	0.14
	1974-1988	validation	0.660	0.673	0.663	0.671	0.665	0.664	0.663	0.659	0.673	0.667	
Toulous.	1974-1988	calage	0.894	0.897	0.886	0.881	0.867	0.898	0.897	0.893	0.887	0.891	0.11
	1989-2003	validation	0.768	0.788	0.783	0.782	0.776	0.774	0.773	0.777	0.773	0.771	
	1989-2003	calage	0.861	0.860	0.854	0.859	0.859	0.857	0.860	0.858	0.860	0.856	0.02
	1974-1988	validation	0.845	0.832	0.847	0.849	0.839	0.828	0.827	0.831	0.838	0.843	
Manic 5	1974-1988	calage	0.90	0.90	0.90	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.91	0.07
	1989-2003	validation	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.83	0.84	0.83	0.84	
	1989-2003	calage	0.891	0.882	0.894	0.893	0.894	0.891	0.893	0.893	0.892	0.894	0.01
	1974-1988	validation	0.885	0.853	0.888	0.889	0.889	0.889	0.889	0.887	0.887	0.889	
P. L. Manic	1974-1988	calage	données non disponible										
	1989-2003	validation											
	1989-2003	calage	inclus à Manic-5										
	1974-1988	validation											

Tableau-A II-4 Résultats de simulations des données IREQ

		Source des données : IREQ											écart
		# simulation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	moyen
Manic 2	1974-1988	calage	0.81	0.79	0.80	0.81	0.80	0.81	0.79	0.80	0.80	0.80	0.06
	1989-2003	validation	0.74	0.73	0.75	0.75	0.73	0.73	0.73	0.74	0.74	0.74	
	1989-2003	calage	0.786	0.796	0.796	0.798	0.796	0.789	0.795	0.796	0.795	0.784	0.04
	1974-1988	validation	0.749	0.752	0.751	0.758	0.754	0.752	0.741	0.750	0.756	0.736	
Manic 3	1974-1988	calage	0.77	0.78	0.78	0.74	0.78	0.77	0.78	0.78	0.74	0.78	0.02
	1989-2003	validation	0.75	0.71	0.75	0.75	0.75	0.74	0.74	0.75	0.76	0.75	
	1989-2003	calage	0.813	0.805	0.809	0.807	0.812	0.811	0.808	0.809	0.811	0.810	0.09
	1974-1988	validation	0.723	0.705	0.715	0.710	0.722	0.719	0.715	0.711	0.719	0.719	
Toulous.	1974-1988	calage	0.891	0.888	0.880	0.892	0.900	0.889	0.897	0.894	0.890	0.897	0.07
	1989-2003	validation	0.811	0.830	0.821	0.821	0.814	0.825	0.826	0.800	0.832	0.828	
	1989-2003	calage	0.849	0.847	0.850	0.849	0.848	0.850	0.848	0.849	0.851	0.853	-0.01
	1974-1988	validation	0.871	0.866	0.867	0.861	0.857	0.856	0.864	0.863	0.867	0.865	
Manic 5	1974-1988	calage	0.90	0.90	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.10
	1989-2003	validation	0.79	0.80	0.80	0.79	0.81	0.80	0.79	0.80	0.81	0.80	
	1989-2003	calage	0.850	0.847	0.855	0.850	0.852	0.853	0.845	0.835	0.839	0.849	-0.01
	1974-1988	validation	0.857	0.871	0.874	0.870	0.860	0.862	0.852	0.854	0.864	0.853	
P. L. Manic	1974-1988	calage	données non disponible										
	1989-2003	validation											
	1989-2003	calage	inclus à Manic-5										
	1974-1988	validation											

ANNEXE III

DONNÉES HISTORIQUES DES APPORTS NATURELS AU SOUS-BASSIN PETIT LAC MANICOUAGAN

La figure suivante démontre un exemple de l'hétérogénéité des apports au sous-bassin Petit Lac Manicouagan. En vert une première méthode de filtrage, en bleu une seconde méthode est utilisée avec un résultat moins bruité. En rouge aucun traitement n'a été appliqué, le signal est complètement bruité.

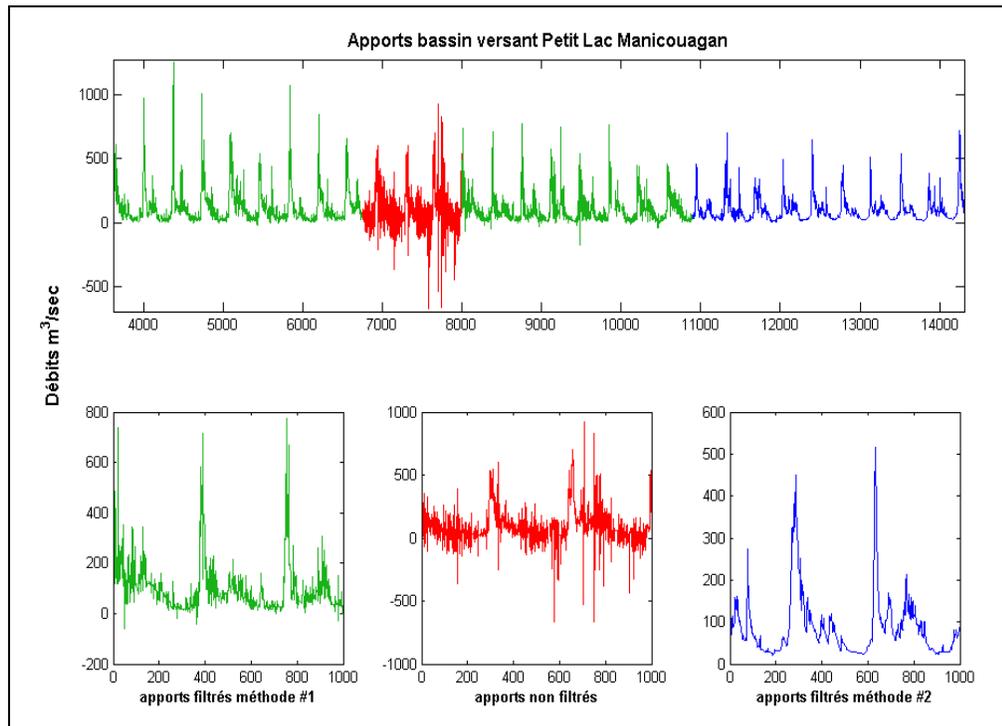


Figure-A III-1 Hétérogénéité des données d'apports naturels

ANNEXE IV

INCERTITUDE LIÉE À L'ÉQUIFINALITÉ EN CALAGE DU MODÈLE HYDROLOGIQUE HSAMI

Les figures ci-dessous démontrent l'évolution dans le temps de l'incertitude liée à la problématique de l'équifinalité rencontrée lors du calage du modèle HSAMI. Chacune des figures expose, pour l'un des trois sous-bassins (Manic-3, Manic-5 et Tournustouc), l'enveloppe d'incertitudes englobant les hydrogrammes annuels moyens d'apports naturels résultant des différents jeux de paramètres possibles.

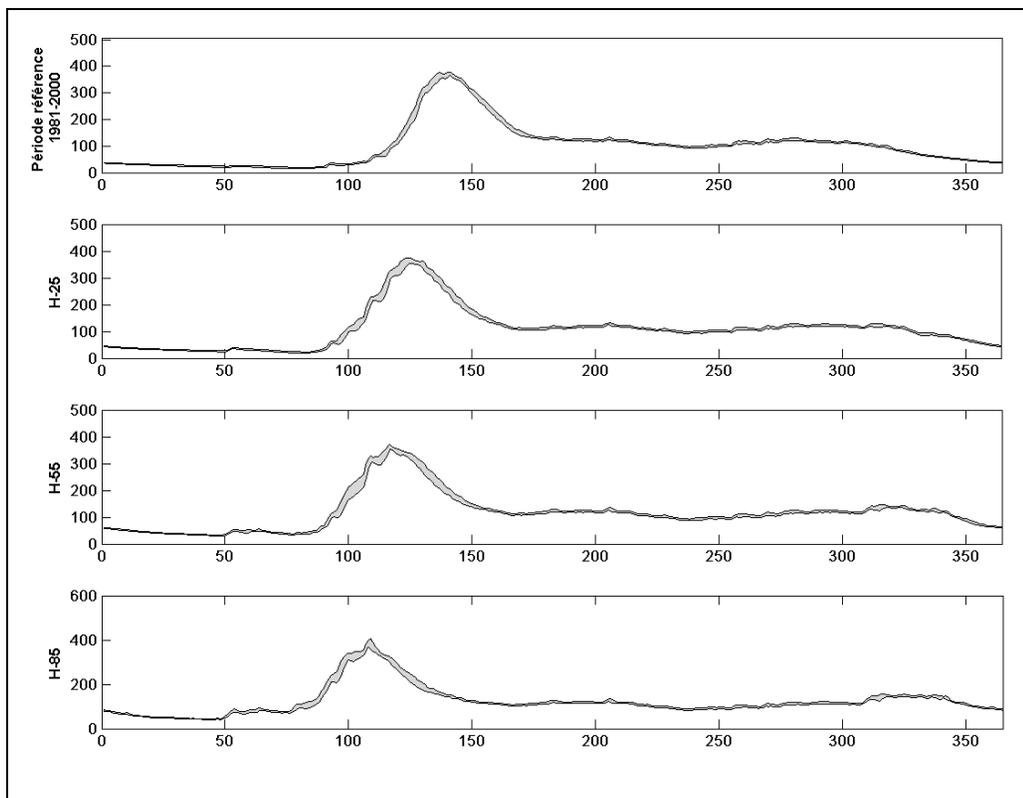


Figure-A IV-1 Manic-3

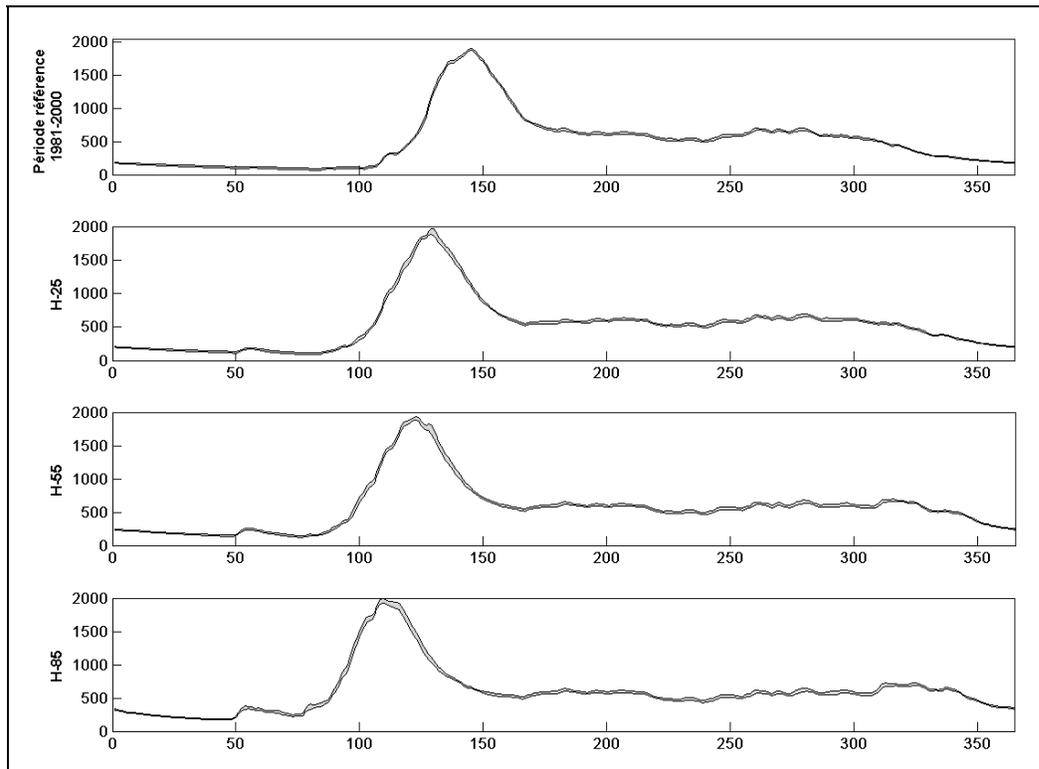


Figure-A IV-2 Manic-5

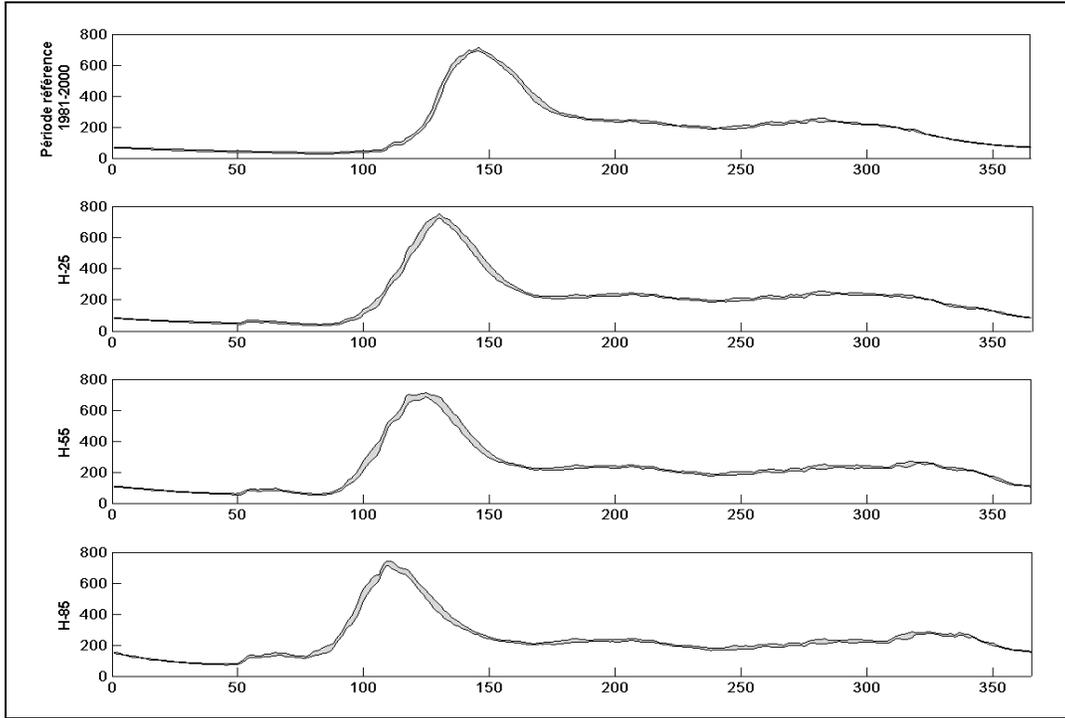


Figure-A IV-3 Toulnostouc

ANNEXE V

DIAGRAMMES DE DISPERSION DES VALEURS DELTA AUX HORIZONS 2025, 2055 et 2085

Les diagrammes suivants démontrent la dispersion saisonnière des vingt combinaisons modèle-scénario de GES aux différents horizons.

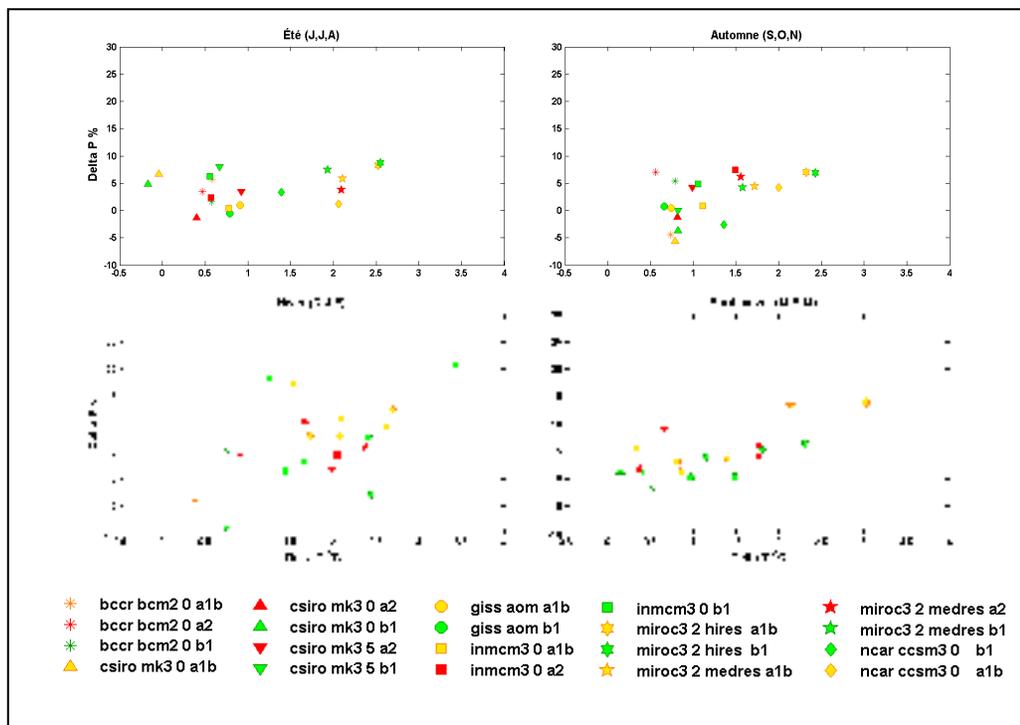


Figure-A V-1 Valeurs delta moyennes pour les saisons d'été, automne, hiver et printemps à l'horizon 2025

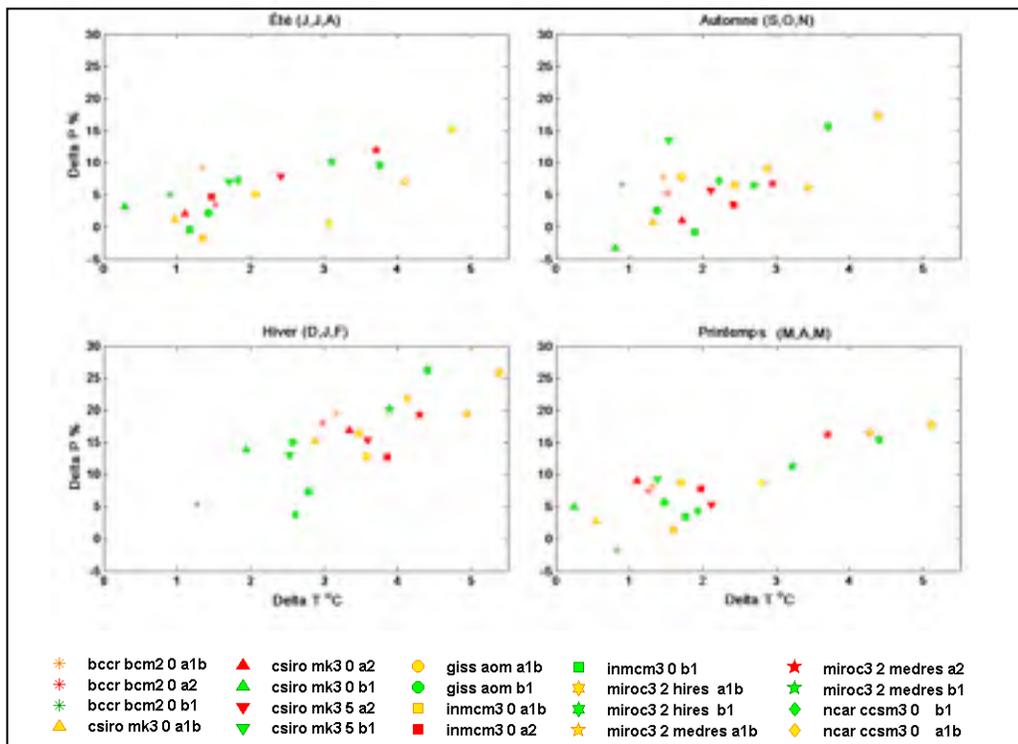


Figure-A V-2 Valeurs delta moyens pour les saisons d'été, automne, hiver et printemps à l'horizon 2055

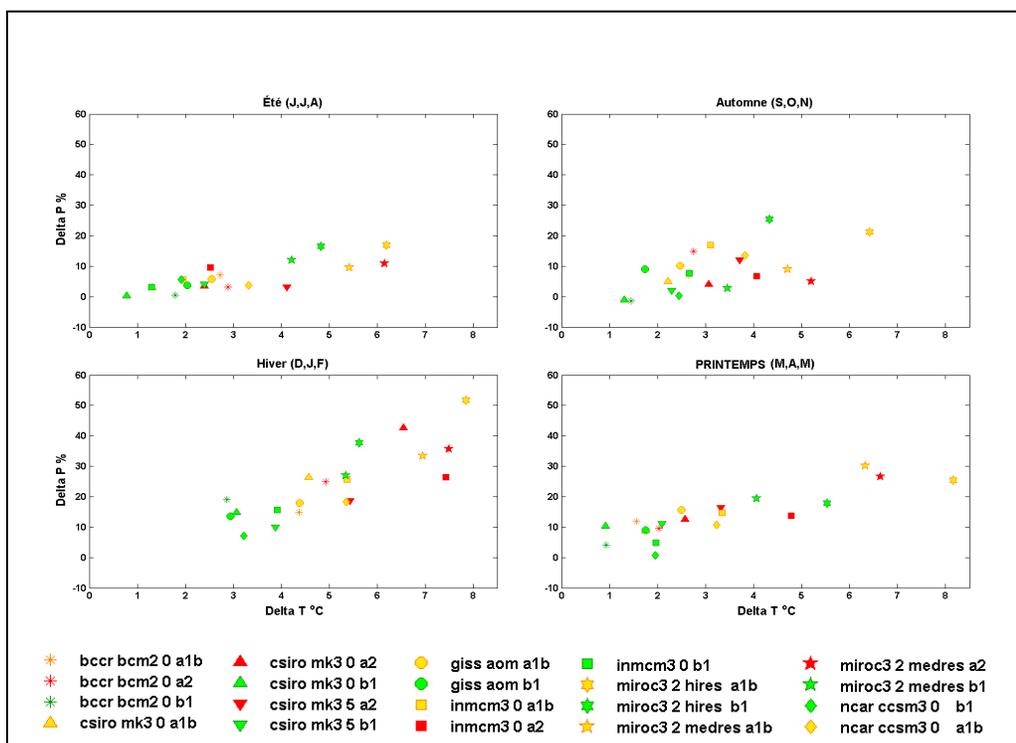


Figure-A V-3 Valeurs delta moyens pour les saisons d'été, automne, hiver et printemps à l'horizon 2085

ANNEXE VI

CYCLE ANNUEL DE TEMPÉRATURE MOYENNE

Ces graphiques démontrent l'impact potentiel des changements climatiques sur le cycle de la température.

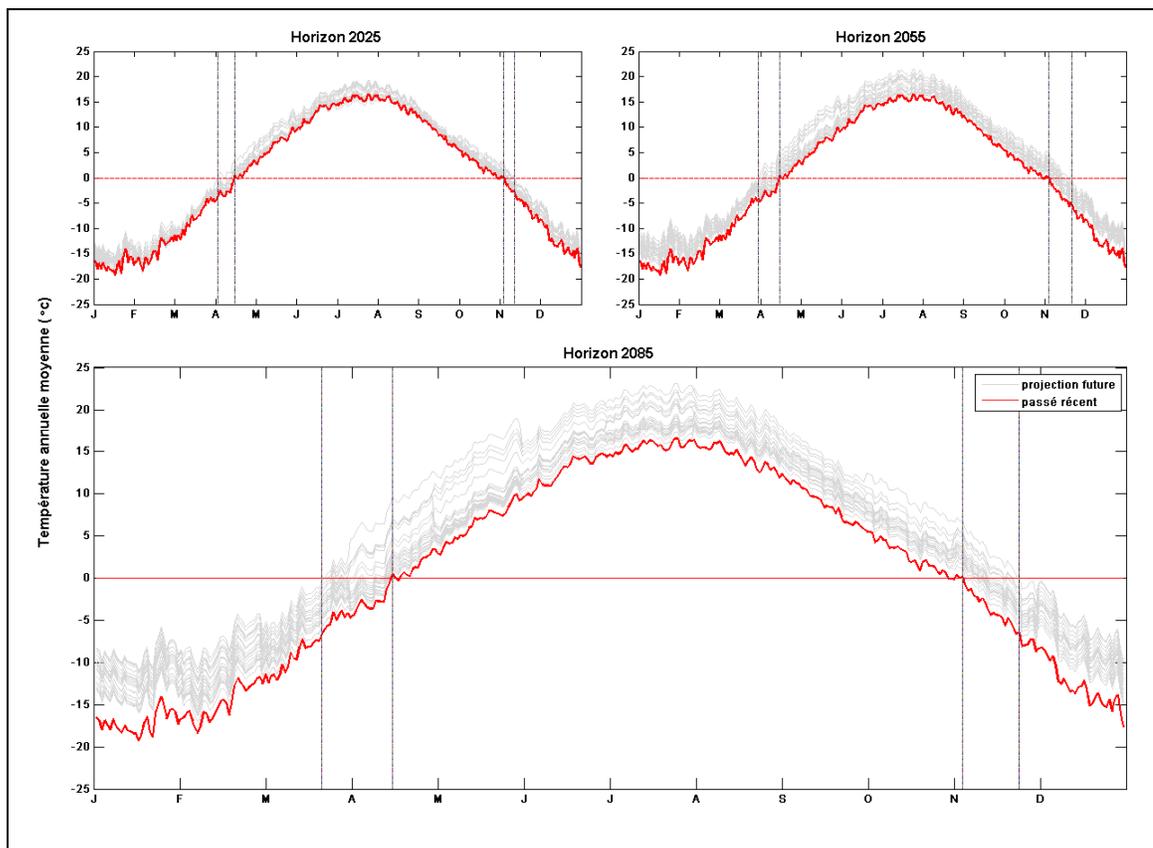


Figure-A VI-1 Évolution du cycle de la température au bassin versant Manic-2

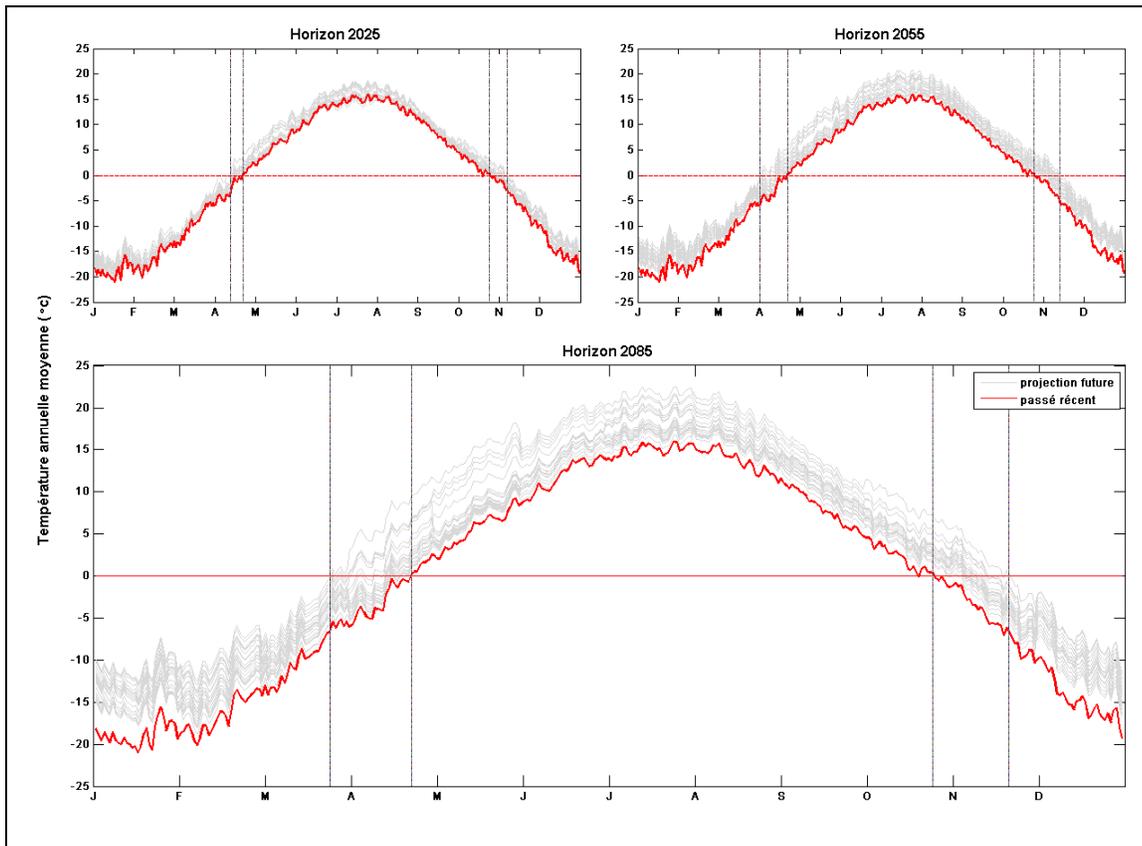


Figure-A VI-2 Évolution du cycle de la température au bassin versant Manic-3

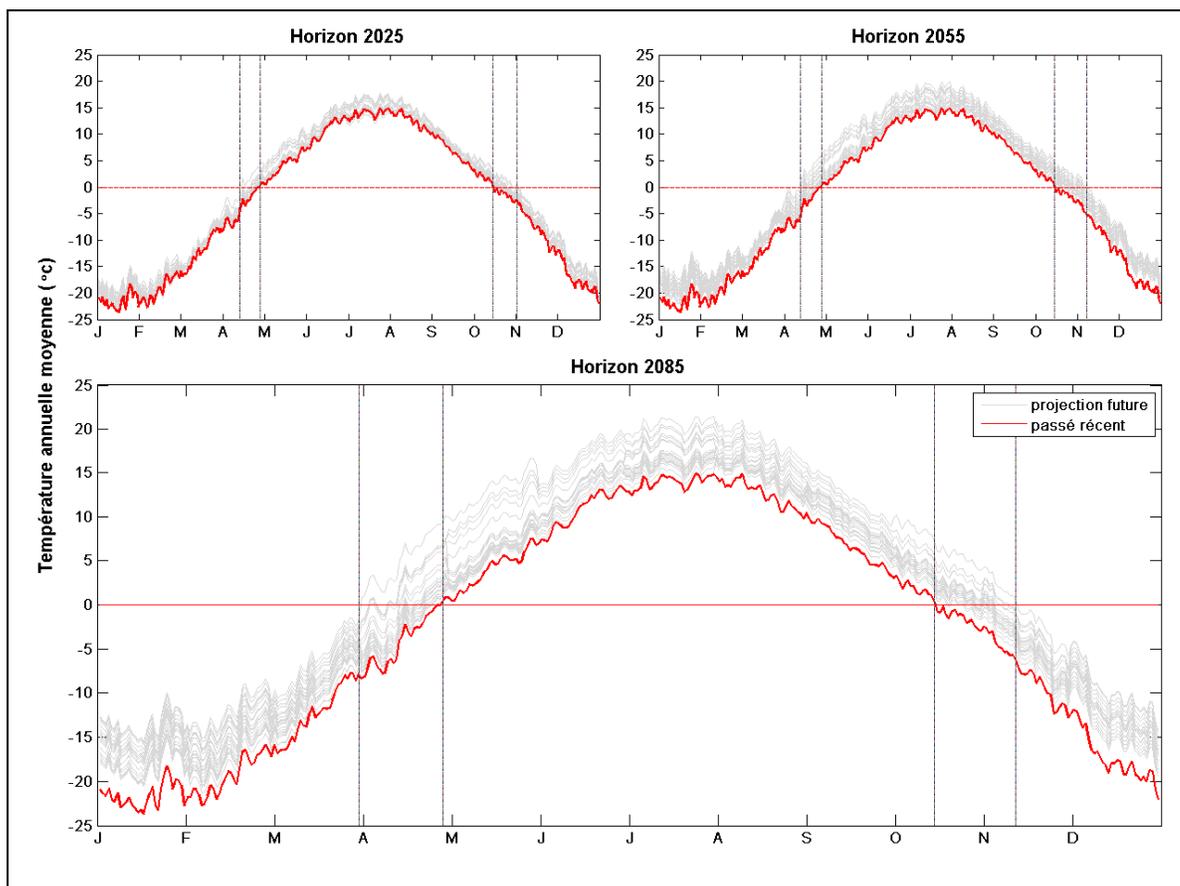


Figure-A VI-3 Évolution du cycle de la température au bassin versant Manic-5

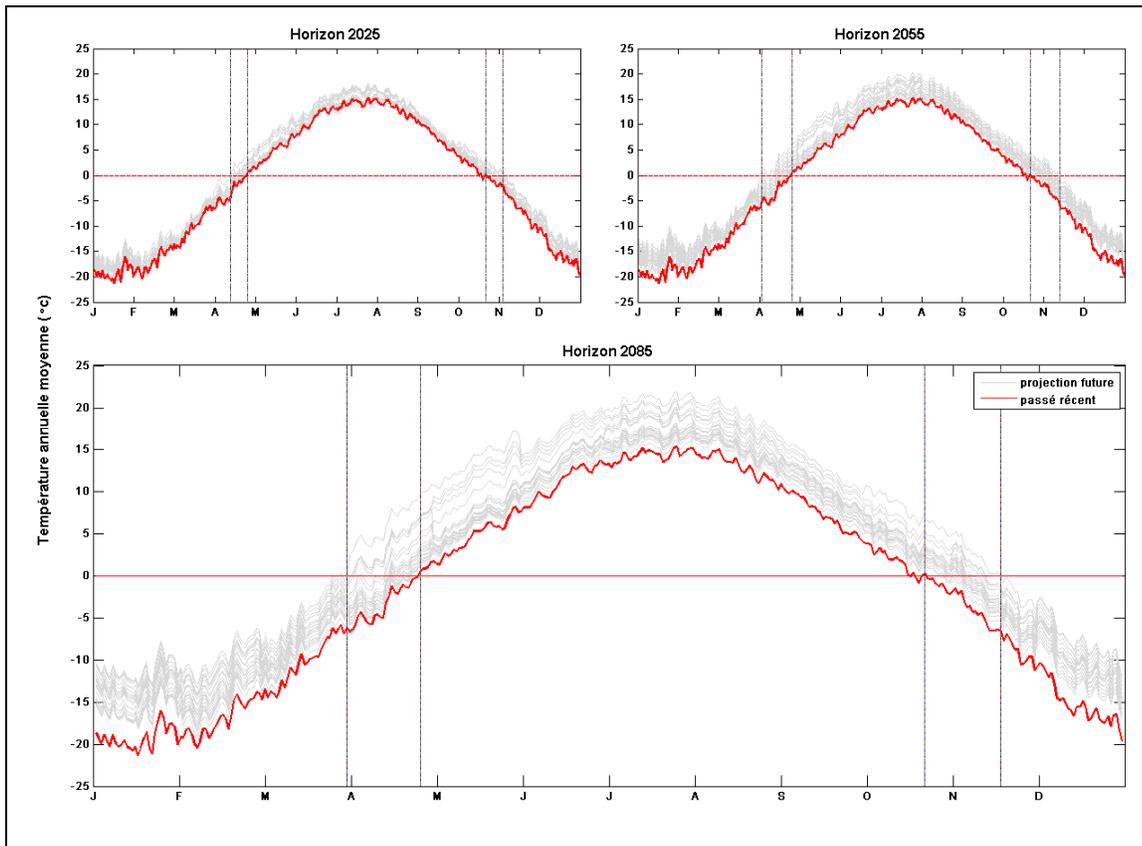


Figure-A VI-4 Évolution du cycle de la température au bassin versant Toulustouc

ANNEXE VII

ANALYSE DES PROJECTIONS FUTURES DE PRÉCIPITATIONS

Tableau-A VII-1 Analyse des scénarios futurs de précipitations au bassin versant Manic-5

MANIC 5 P : précip. Pluie annuelle N : précip. Neige annuelle Ph : Pluie durant la période hivernale (D,J,F,M)	HORIZON 2025				HORIZON 2055				HORIZON 2085			
	P (%)	N (%)	Ph (%)	Ph/Pt(%)	P (%)	N (%)	Ph (%)	Ph/Pt(%)	P (%)	N (%)	Ph (%)	Ph/Pt(%)
bccr bcm2 0 a1b	5	-8	60	-1	13	5	220	1	16	0	300	1
bccr bcm2 0 a2	9	-1	160	0	9	4	240	1	16	4	400	2
bccr bcm2 0 b1	7	-1	240	1	10	-2	240	1	7	2	220	1
csiro mk3 0 a1b	4	7	160	0	7	2	200	1	14	2	360	2
csiro mk3 0 a2	4	1	200	1	10	0	240	1	20	4	700	4
csiro mk3 0 b1	10	4	500	3	8	3	440	3	10	2	440	3
csiro mk3 5 a2	12	-1	380	2	18	-3	440	2	25	-5	560	3
csiro mk3 5 b1	13	-7	360	2	20	2	340	1	14	-4	380	2
giss aom a1b	7	0	240	1	16	-1	320	1	21	-1	400	2
giss aom b1	7	-5	220	1	12	-1	260	1	16	0	280	1
inmcm3 0 a1b	9	-2	220	1	12	-4	300	1	28	-2	520	3
inmcm3 0 a2	16	-7	320	1	18	-7	340	1	34	-12	840	4
inmcm3 0 b1	21	-6	620	3	16	-8	580	3	21	-6	540	3
miroc3 2 hires a1b	25	-6	480	2	37	-4	620	3	50	-2	1240	6
miroc3 2 hires b1	31	-1	860	5	37	-2	800	4	44	0	800	4
miroc3 2 medres a1b	23	0	540	3	28	-5	640	3	38	-4	940	5
miroc3 2 medres a2	22	-3	640	4	29	-3	620	3	37	-5	1060	6
miroc3 2 medres b1	24	-3	760	4	27	-2	680	4	29	-2	680	4
ncar ccsm3 0 b1	14	-9	460	3	22	-9	460	2	18	-9	460	2
near ccsm3 0 a1b	15	-4	420	2	22	-4	580	3	27	-8	620	3
Mean	13,83	-2,5	392	1,9	18,599	-1,89	428	2	24,222	-2,33	587	3,05

Tableau-A VII-2 Analyse des scénarios futurs de précipitations au bassin versant Manic-2

MANIC 2 P : précip. Pluie annuelle N : précip. Neige annuelle Ph : Pluie durant la période hivernale (D,J,F,M)	HORIZON 2025				HORIZON 2055				HORIZON 2085			
	P (%)	N (%)	Ph (%)	Ph/Pt(%)	P (%)	N (%)	Ph (%)	Ph/Pt(%)	P (%)	N (%)	Ph (%)	Ph/Pt(%)
bccr bcm2 0 a1b	6	-10	30	-2	17	-1	170	1	20	-7	220	2
bccr bcm2 0 a2	11	-3	115	0	14	-1	175	1	24	-4	285	4
bccr bcm2 0 b1	9	-2	160	1	13	-5	160	1	10	-1	155	1
csiro mk3 0 a1b	7	5	110	0	10	-1	140	1	20	-4	240	3
csiro mk3 0 a2	6	-1	125	1	15	-5	175	1	28	-3	440	7
csiro mk3 0 b1	14	4	285	4	13	0	260	4	15	-2	255	4
csiro mk3 5 a2	16	-5	205	2	22	-8	250	3	31	-13	345	5
csiro mk3 5 b1	15	-10	205	2	23	-3	225	2	20	-11	240	3
giss aom a1b	9	-2	150	1	20	-6	215	2	27	-8	275	3
giss aom b1	9	-7	140	1	15	-4	175	1	19	-5	190	1
inmcm3 0 a1b	12	-6	145	1	17	-10	200	2	35	-11	345	4
inmcm3 0 a2	20	-12	195	2	23	-13	215	2	40	-18	475	7
inmcm3 0 b1	24	-10	325	5	20	-13	305	4	26	-13	310	4
miroc3 2 hires a1b	28	-11	260	3	42	-9	380	4	56	-8	665	9
miroc3 2 hires b1	33	-5	410	6	40	-7	415	5	48	-6	460	6
miroc3 2 medres a1b	25	-5	295	4	32	-11	365	5	44	-12	545	8
miroc3 2 medres a2	25	-8	330	5	33	-9	355	5	43	-11	590	9
miroc3 2 medres b1	27	-7	380	6	31	-7	365	5	34	-9	405	6
near ccs3 0 b1	16	-13	235	3	24	-14	240	2	21	-14	255	3
near ccs3 0 a1b	18	-9	215	2	27	-10	330	4	32	-16	355	5
Mean	16,42	-5,891	215,8	2,35	22,54	-6,912	255,8	2,75	29,56	-8,695	352,5	4,7

Tableau-A VII-3 Analyse des scénarios futurs de précipitations au bassin versant Manic-3

MANIC 3 P : précip. Pluie annuelle N : précip. Neige annuelle Ph : Pluie durant la période hivernale (D,J,F,M)	HORIZON 2025				HORIZON 2055				HORIZON 2085			
	P (%)	N (%)	Ph (%)	Ph/Pt(%)	P (%)	N (%)	Ph (%)	Ph/Pt(%)	P (%)	N (%)	Ph (%)	Ph/Pt(%)
bccr bcm2 0 a1b	6	-10	100	0	17	2	480	2	21	-5	640	3
bccr bcm2 0 a2	12	-2	360	1	14	1	500	2	24	-1	840	4
bccr bcm2 0 b1	10	-2	540	3	14	-4	500	2	10	1	460	2
csiro mk3 0 a1b	7	7	340	1	10	0	420	2	20	-3	720	4
csiro mk3 0 a2	6	0	380	2	15	-3	480	2	29	-1	1360	7
csiro mk3 0 b1	14	4	880	5	12	2	800	5	14	-1	740	4
csiro mk3 5 a2	15	-3	600	3	24	-7	780	4	33	-12	1080	5
csiro mk3 5 b1	16	-9	680	4	24	-1	680	3	20	-10	720	4
giss aom a1b	9	-1	460	2	20	-5	640	3	28	-8	820	4
giss aom b1	10	-7	440	2	16	-3	520	2	20	-4	540	2
inmcm3 0 a1b	12	-5	420	2	18	-9	580	3	37	-9	1060	5
inmcm3 0 a2	21	-11	600	3	24	-13	660	3	44	-18	1500	7
inmcm3 0 b1	26	-10	1040	5	22	-13	1020	6	28	-12	1000	5
miroc3 2 hires a1b	31	-10	840	4	46	-8	1180	5	62	-6	2160	10
miroc3 2 hires b1	37	-4	1400	7	44	-7	1300	6	54	-6	1460	6
miroc3 2 medres a1b	27	-4	940	5	35	-11	1140	6	48	-11	1720	8
miroc3 2 medres a2	27	-7	1120	6	36	-7	1080	5	47	-10	1900	9
miroc3 2 medres b1	29	-7	1280	7	34	-7	1140	6	37	-8	1300	6
ncar ccs3 0 b1	17	-13	800	4	27	-14	820	4	23	-14	840	4
ncar ccs3 0 a1b	19	-8	720	4	29	-10	1020	5	35	-15	1120	5
Mean	17,6	-5	697	3,5	24,1	-5,84	787	3,8	31,7	-7,6	1099	5,2

Tableau-A VII-4 Analyse des scénarios futurs de précipitations
au bassin versant Touloustouc

Touloustouc	HORIZON 2025				HORIZON 2055				HORIZON 2085			
	P (%)	N (%)	Ph (%)	Ph/Pt(%)	P (%)	N (%)	Ph (%)	Ph/Pt(%)	P (%)	N (%)	Ph (%)	Ph/Pt(%)
bccr bcm2 0 a1b	6	-9	50	-1	16	3	220	1	19	-3	300	2
bccr bcm2 0 a2	11	-1	180	1	12	2	230	1	21	0	390	3
bccr bcm2 0 b1	9	-1	250	2	12	-3	220	1	9	1	210	1
csiro mk3 0 a1b	6	6	150	0	9	1	190	1	18	-1	330	3
csiro mk3 0 a2	6	0	190	1	13	-2	240	1	26	0	640	6
csiro mk3 0 b1	13	4	430	4	11	2	390	4	13	0	380	3
csiro mk3 5 a2	14	-2	330	3	21	-6	340	2	30	-10	510	4
csiro mk3 5 b1	15	-8	340	3	23	0	330	2	18	-7	340	3
giss aom a1b	9	-1	210	1	18	-3	290	2	26	-5	380	3
giss aom b1	9	-6	210	1	14	-2	240	1	18	-2	250	1
inmcm3 0 a1b	11	-4	200	1	16	-7	270	2	34	-7	490	4
inmcm3 0 a2	19	-9	280	2	22	-11	300	2	41	-17	720	6
inmcm3 0 b1	25	-8	500	4	20	-11	460	4	26	-10	470	4
miroc3 2 hires a1b	29	-9	400	3	43	-9	560	4	58	-7	1040	8
miroc3 2 hires b1	35	-3	660	6	41	-6	630	5	51	-5	710	5
miroc3 2 medres a1b	27	-2	460	4	33	-9	560	5	45	-10	830	7
miroc3 2 medres a2	26	-5	510	4	34	-6	510	4	44	-10	910	8
miroc3 2 medres b1	28	-5	590	5	32	-6	550	5	35	-7	610	5
near ccs3 0 b1	17	-11	380	3	25	-11	380	3	22	-12	410	3
near ccs3 0 a1b	18	-6	350	3	27	-8	480	4	33	-13	540	4
mean	16,6	-3,94	334	2,5	22,1	-4,61	370	2,7	29,4	-6,23	523	4,15

ANNEXE VIII

HYDROGRAMMES DES PROJECTIONS D'APPORTS NATURELS

Les graphiques suivants démontrent les hydrogrammes d'apports naturels moyens générés par la simulation des vingt combinaisons modèles-scénarios aux divers horizons et sous-bassins.

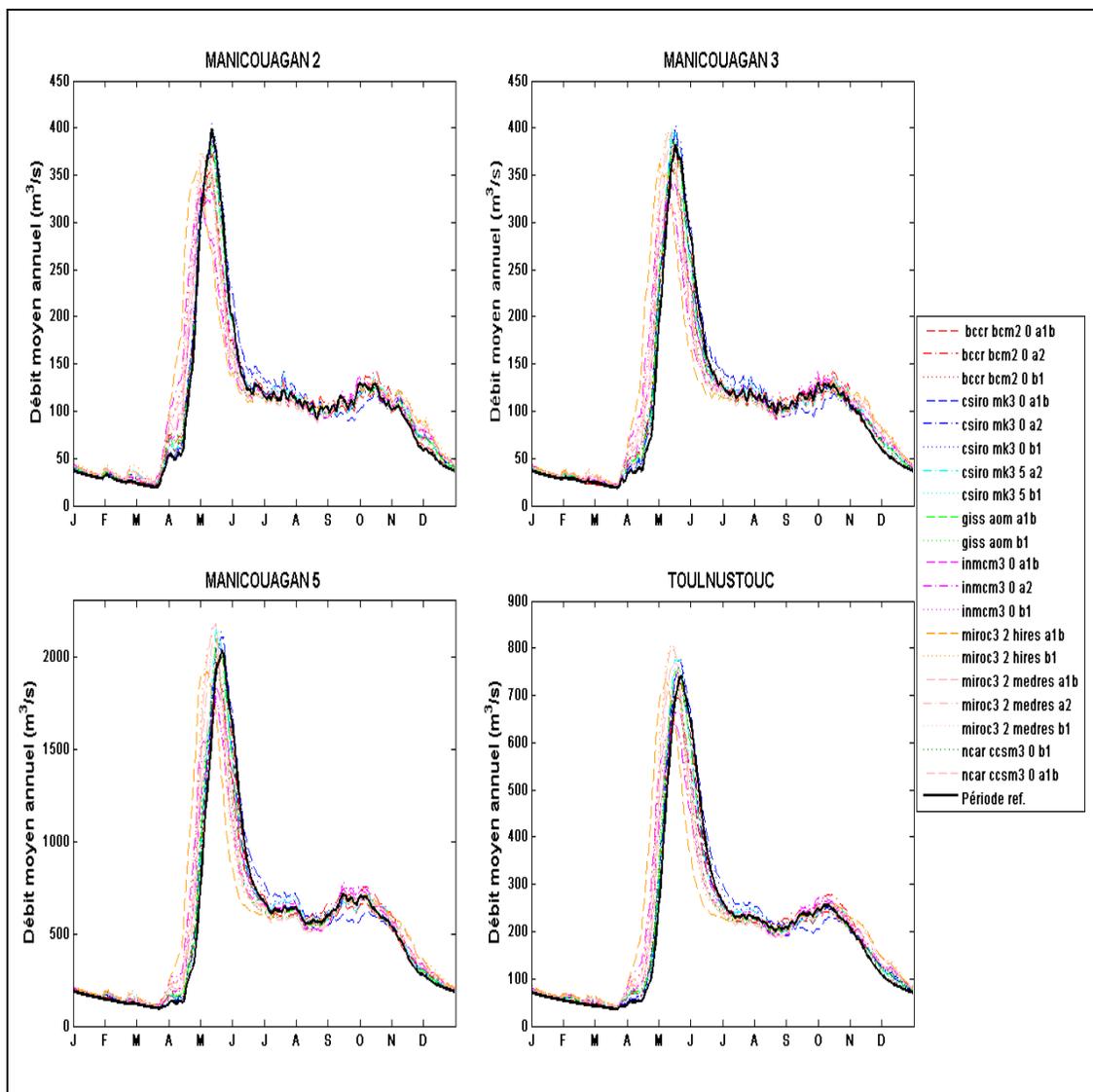


Figure-A VIII-1 Hydrogrammes d'apports naturels moyens de l'horizon 2025

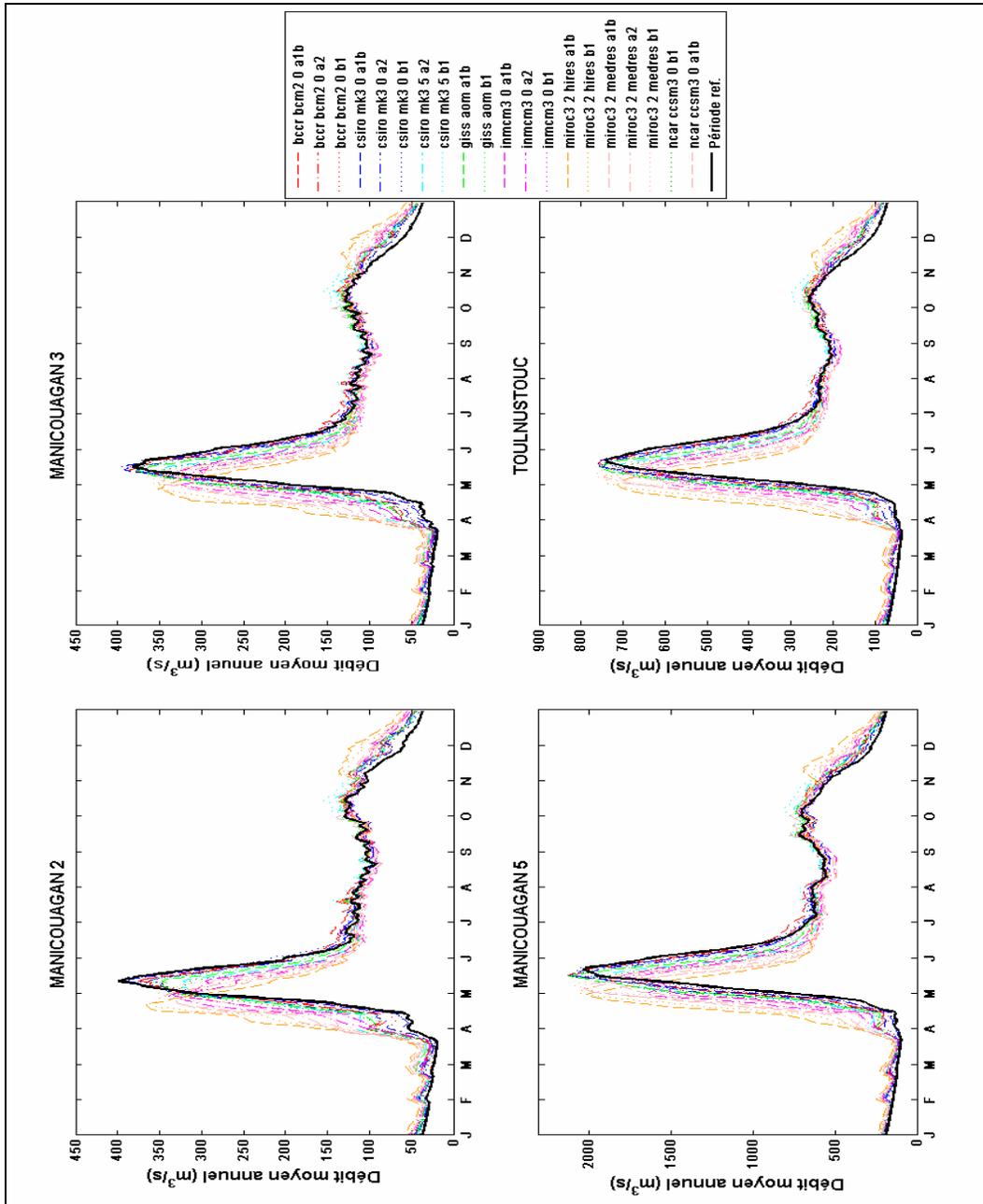


Figure-A VIII-2 Hydrogrammes d'apports naturels moyens de l'horizon 2055

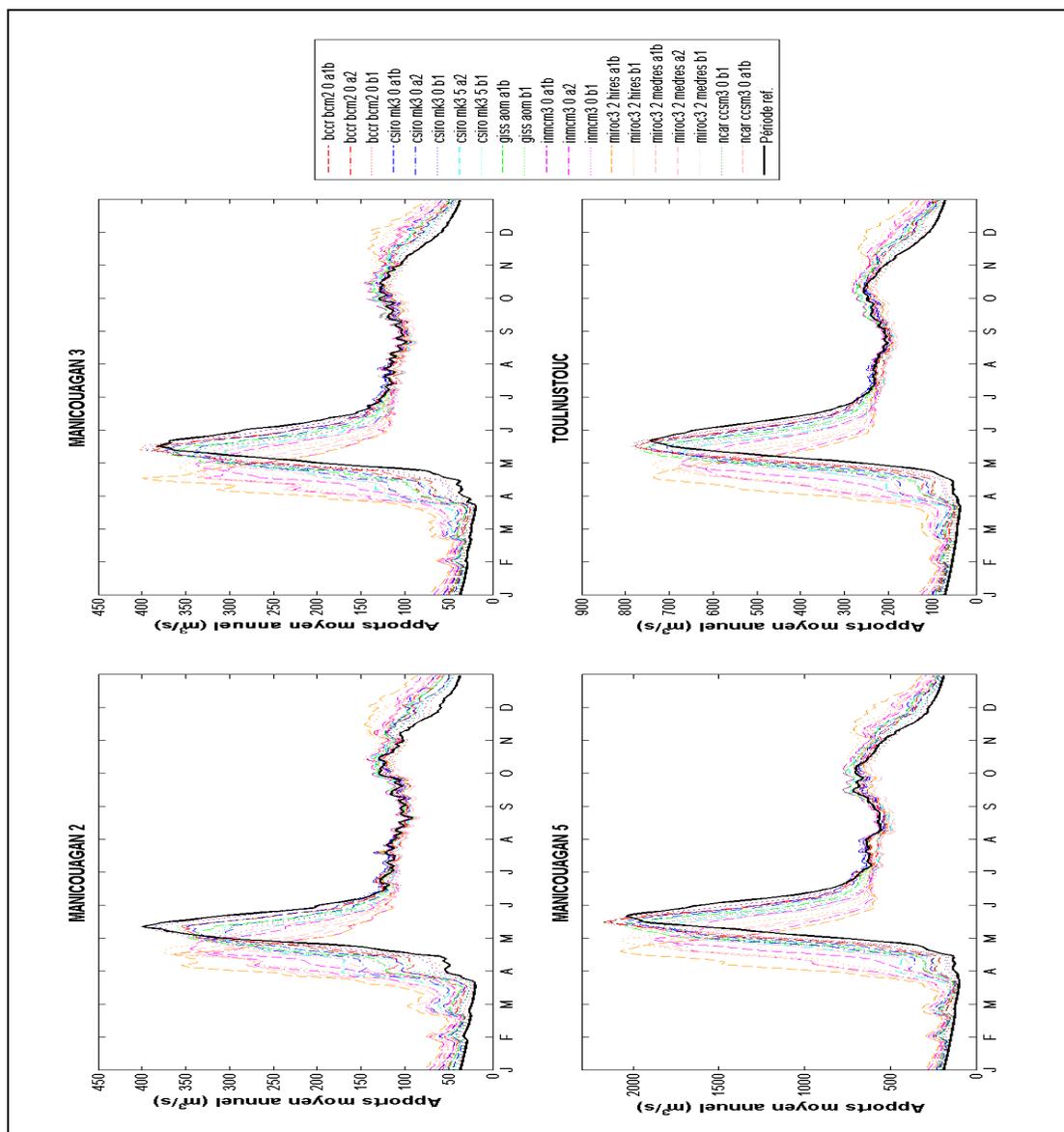


Figure-A VIII-3 Hydrogrammes d'apports naturels moyens de l'horizon 2085

ANNEXE IX

PROBABILITÉ D'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES PARAMÈTRES D'ÉVALUATION DES APPORTS NATURELS

Les figures ci-dessous expriment les probabilités d'observer une modification des paramètres du régime hydrologique dû aux changements climatiques. Les métrés retenus sont le volume total annuel, la date d'initiation de la crue printanière, le volume et le débit de pointe de cette crue. Cest probabilités sont issues de fonctions de répartition empiriques des écarts annuels aux horizons futurs vs la période de référence. En « y » se trouve la probabilité liée à la fraction de gain ou perte exprimé en « x ».

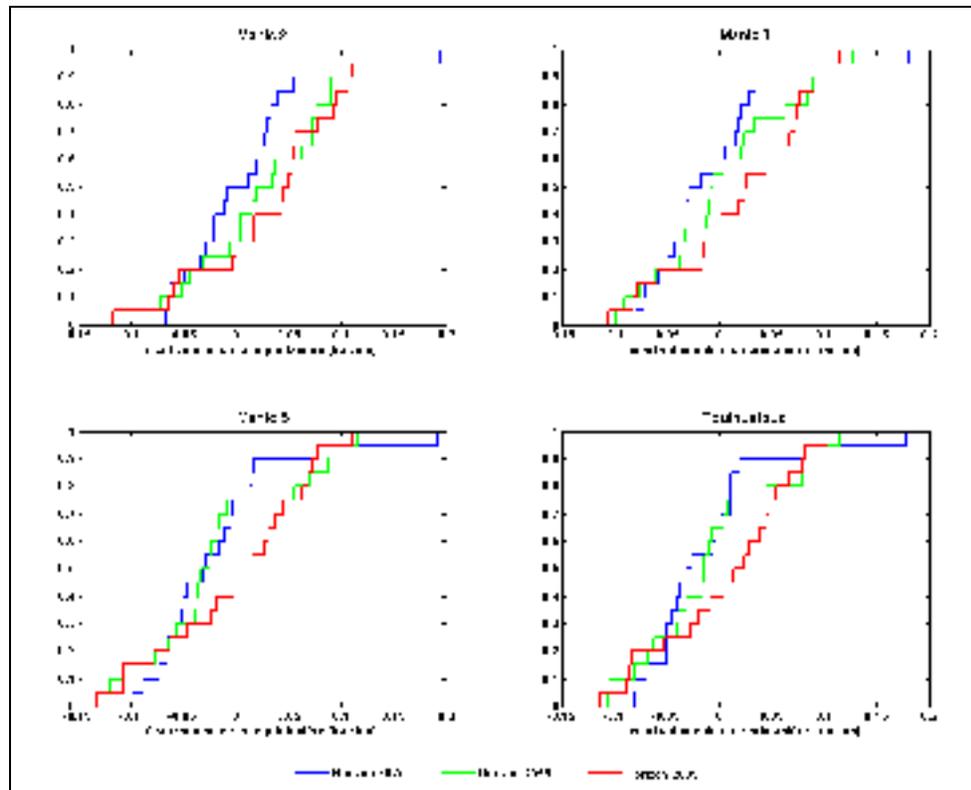


Figure-A IX-1 Probabilité de variation du volume de la crue printanière

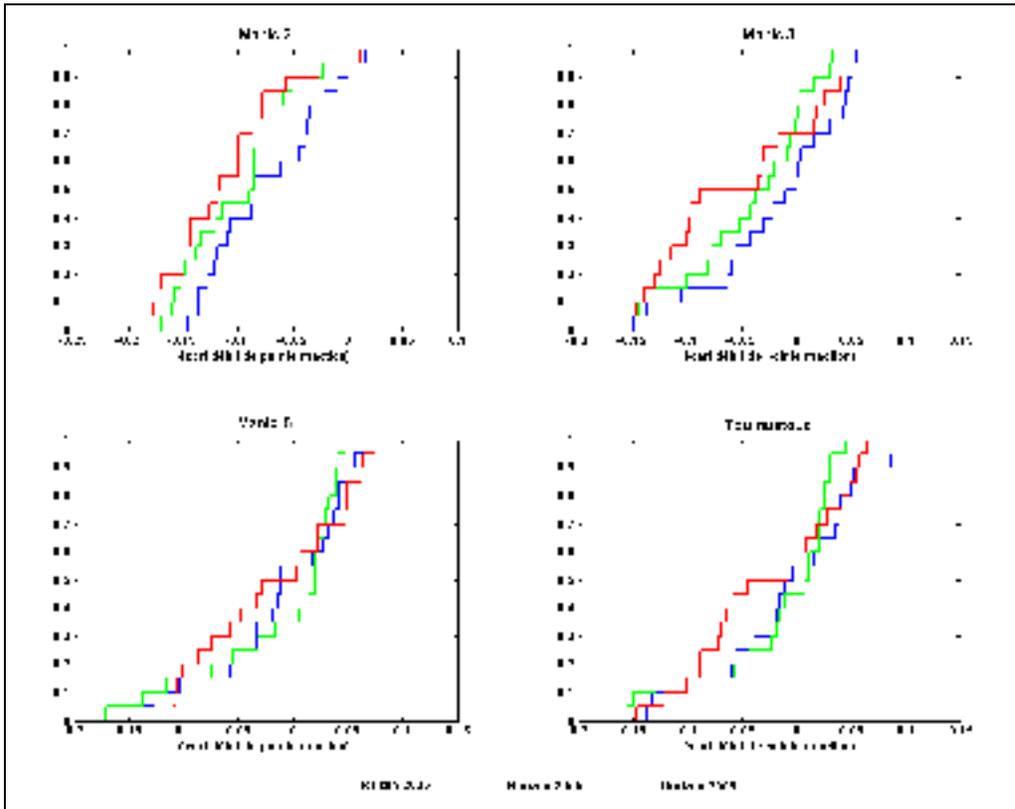


Figure-A IX-2 Probabilité de variation du débit de pointe à la crue printanière

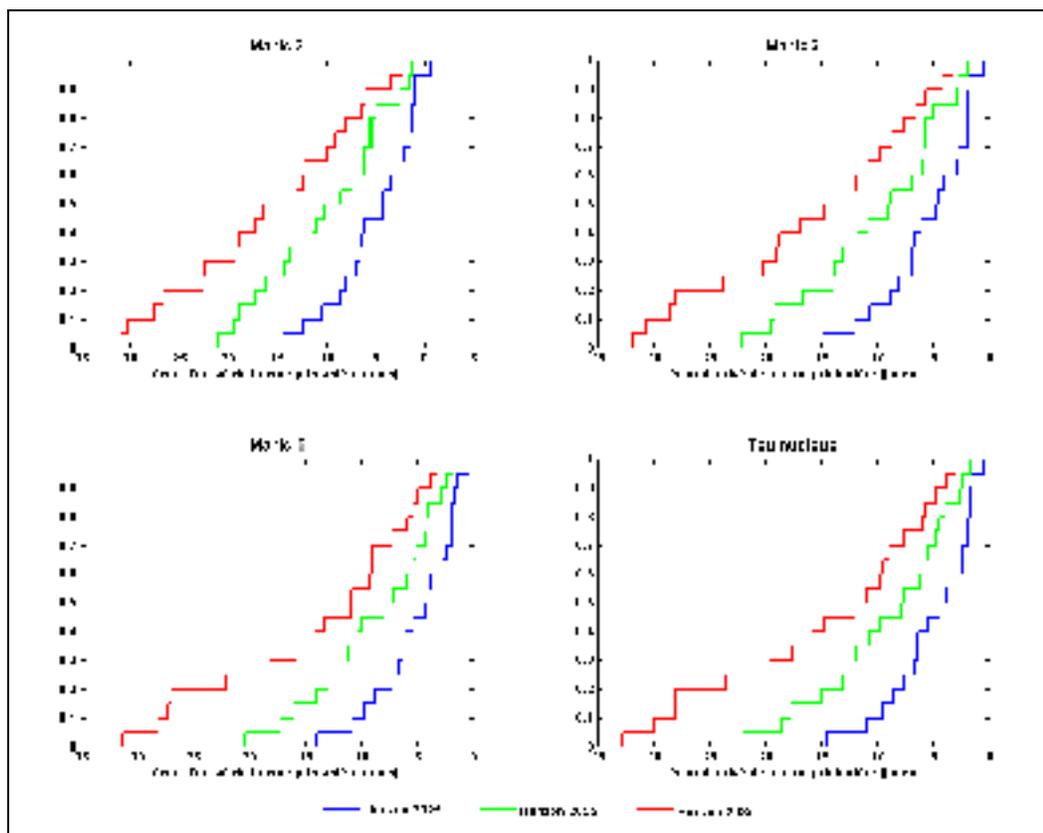


Figure-A IX-3 Probabilité de devancement de la crue printanière en jours

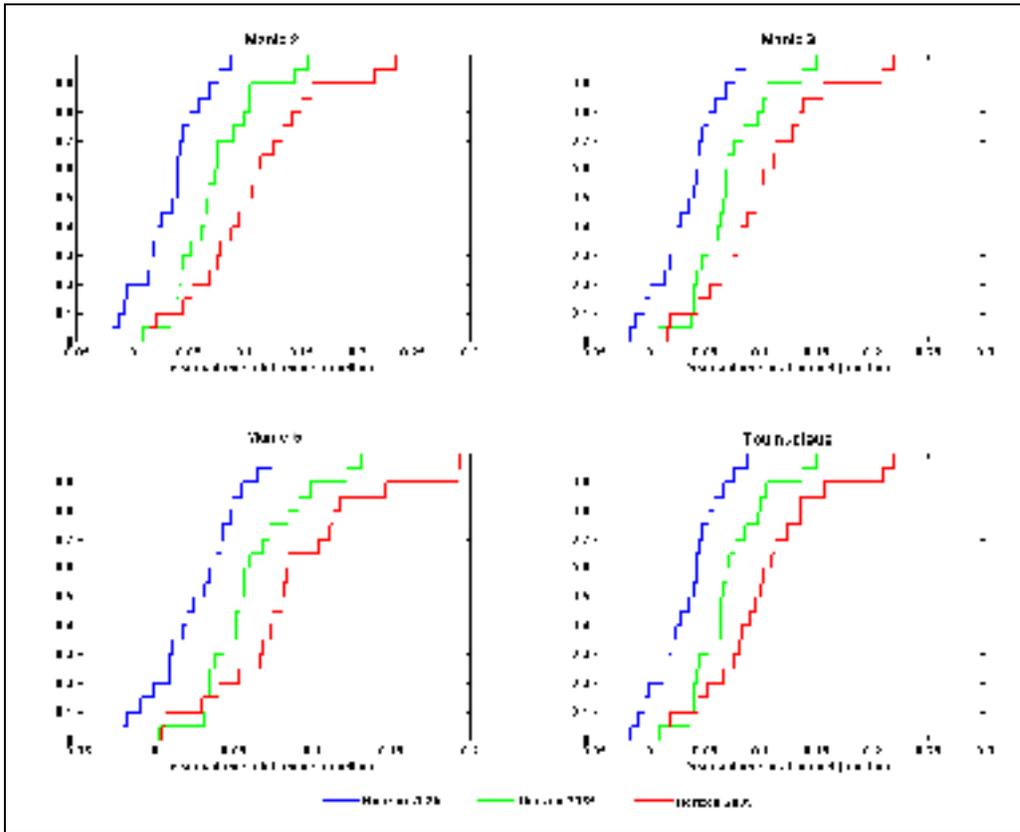


Figure-A IX-4 Probabilité de variation du volume annuel

ANNEXE X

PROBABILITÉ D'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA PRODUCTION D'HYDROÉLECTRICITÉ

Fonctions de répartition empiriques des écarts annuels de la production électrique moyenne aux horizons futurs vs la période de référence. En « y » la probabilité liée à la fraction de gain ou perte en « x ».

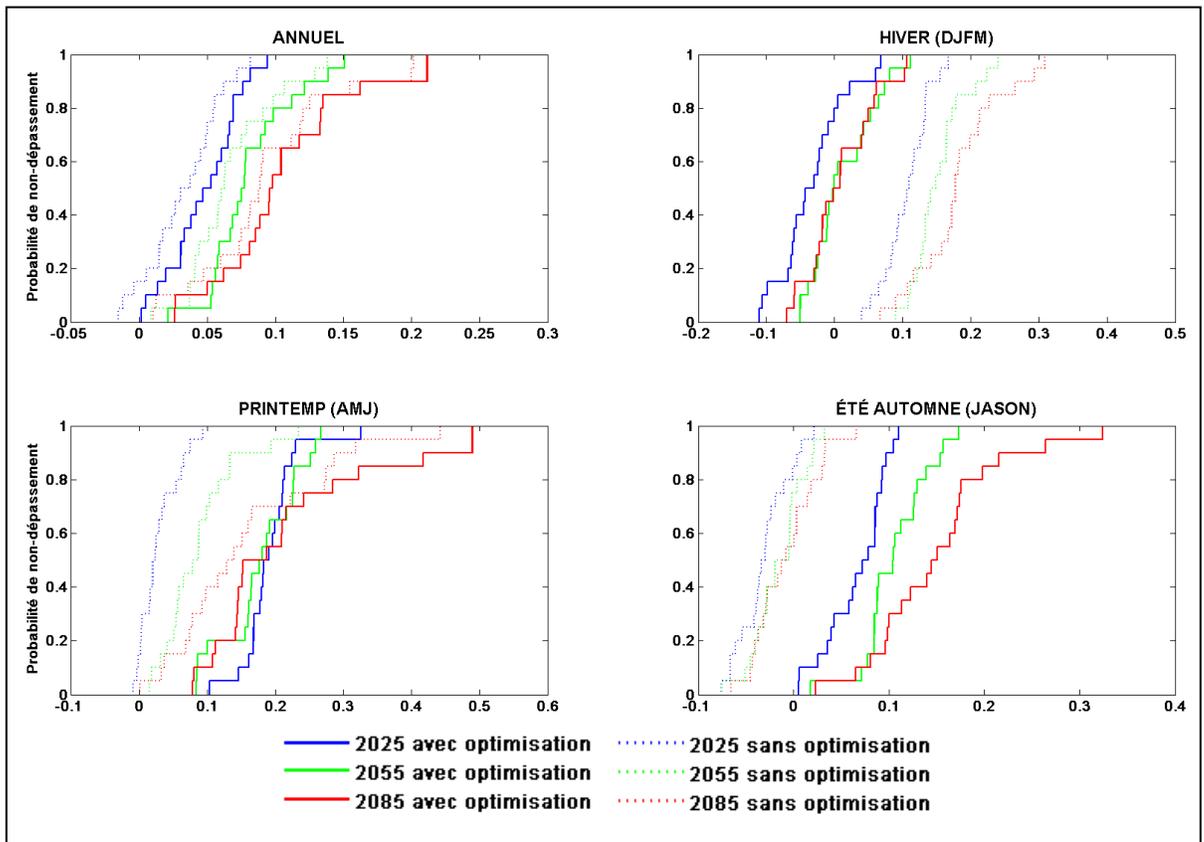


Figure-A X-1 Probabilité de variation de la génération d'électricité à la centrale Manic-5 par rapport à la période de référence

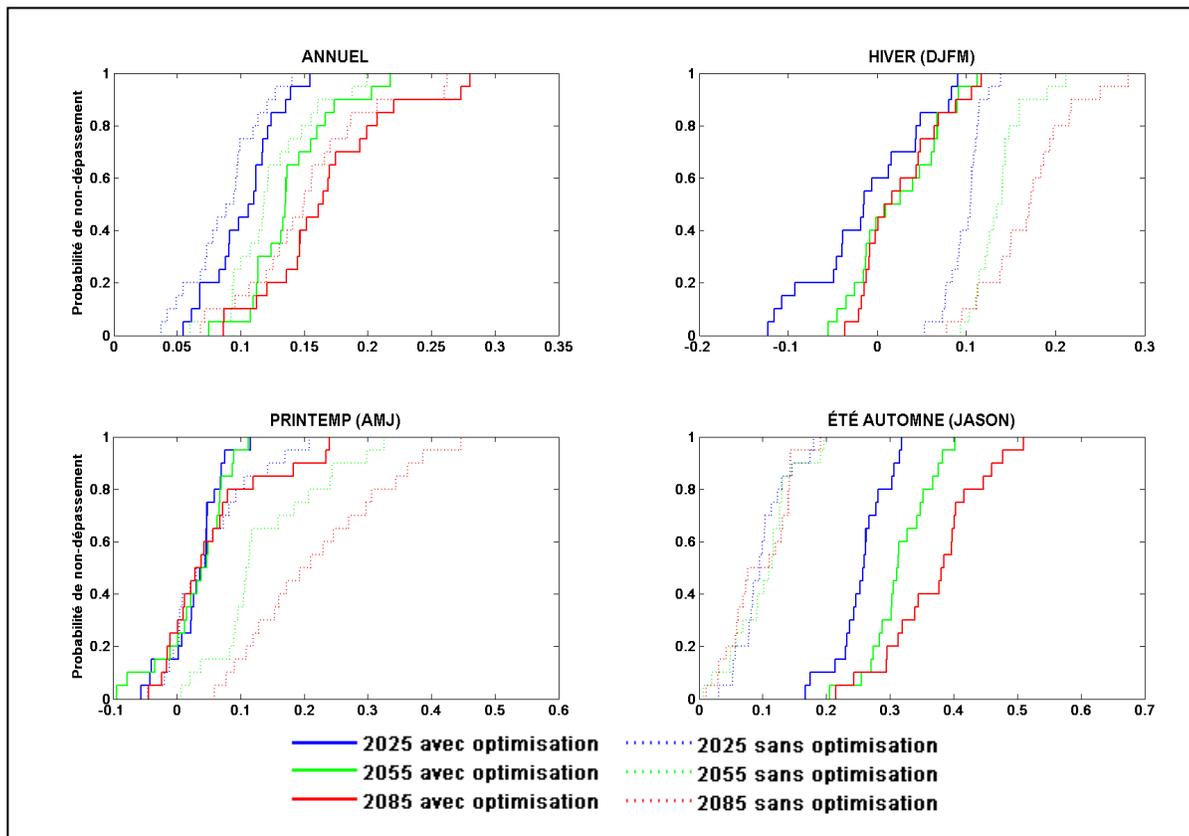


Figure-A X-2 Probabilité de variation de la génération d'électricité à la centrale Toulustouc par rapport à la période de référence

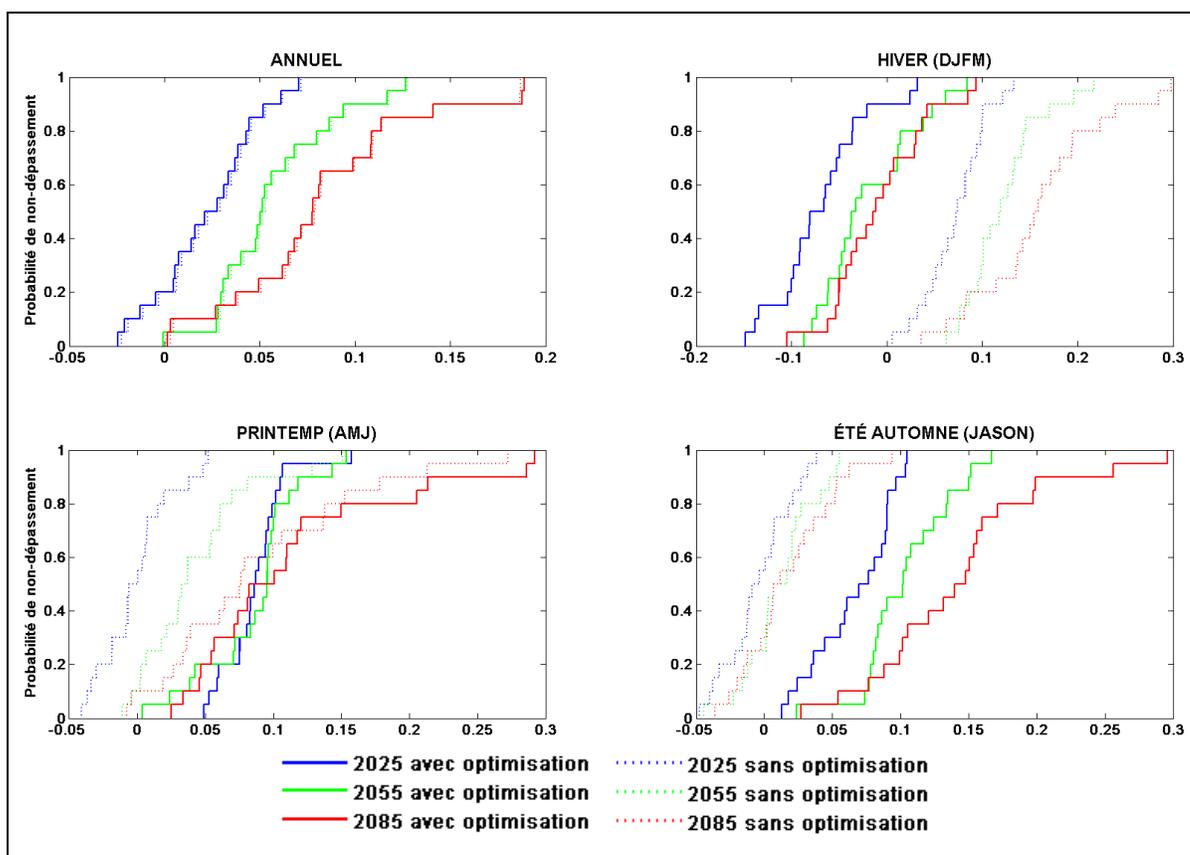


Figure-A X-3 Probabilité de variation de la génération d'électricité à la centrale Manic-3 par rapport à la période de référence

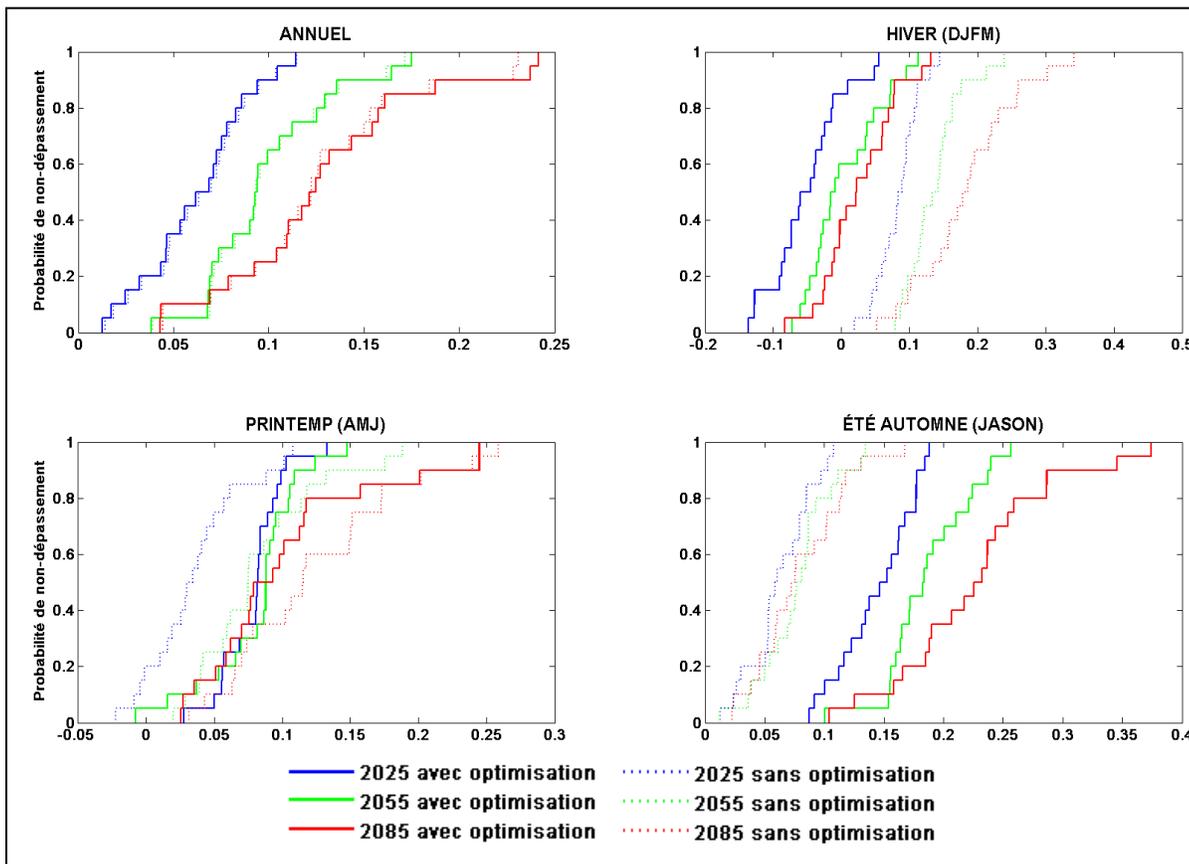


Figure-A X-4 Probabilité de variation de la génération d'électricité à la centrale Manic-2 par rapport à la période de référence

ANNEXE XI

RÉPARTITION DE LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE ANNUELLE

Les graphiques suivants présentent en « y » la fraction de la production annuelle pour la période « x ». En gris, la répartition de la production moyenne de la période de référence. Les boîtes à moustaches représentent la distribution des résultats issue de la modélisation des 20 scénarios climatiques. La boîte encadre les percentiles 25 à 75, la médiane est identifiée par un trait rouge puis les moustaches couvrent toutes les autres valeurs non identifiées comme aberrantes (en rouge).

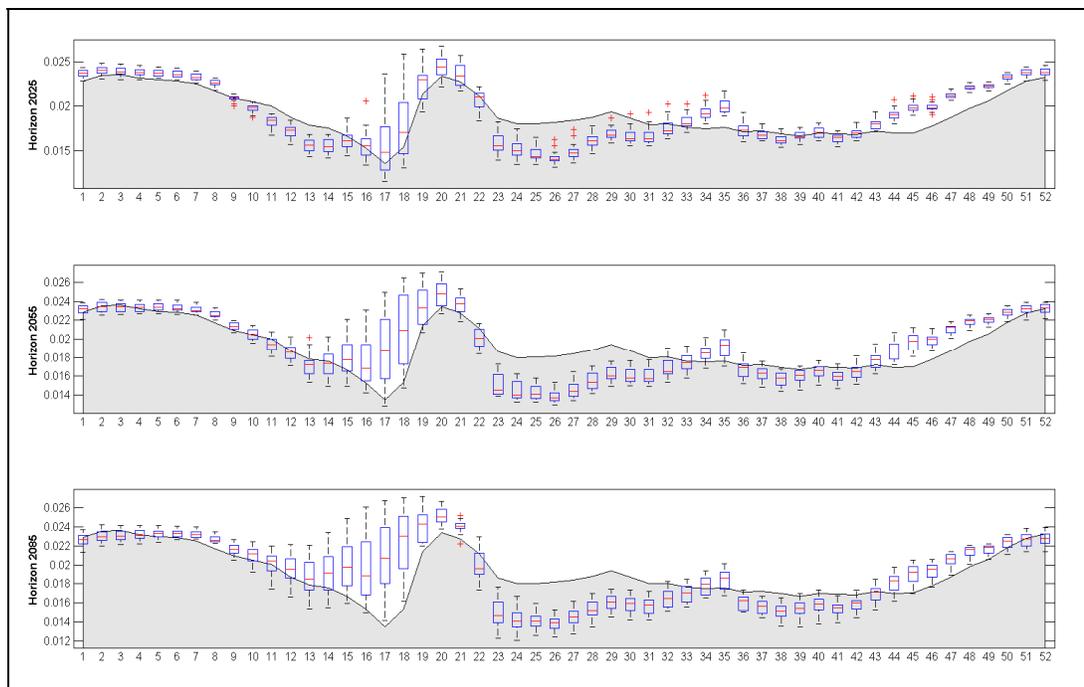


Figure-A XI-1 Répartition de la production électrique annuelle de la centrale Toulustoc sans optimisation

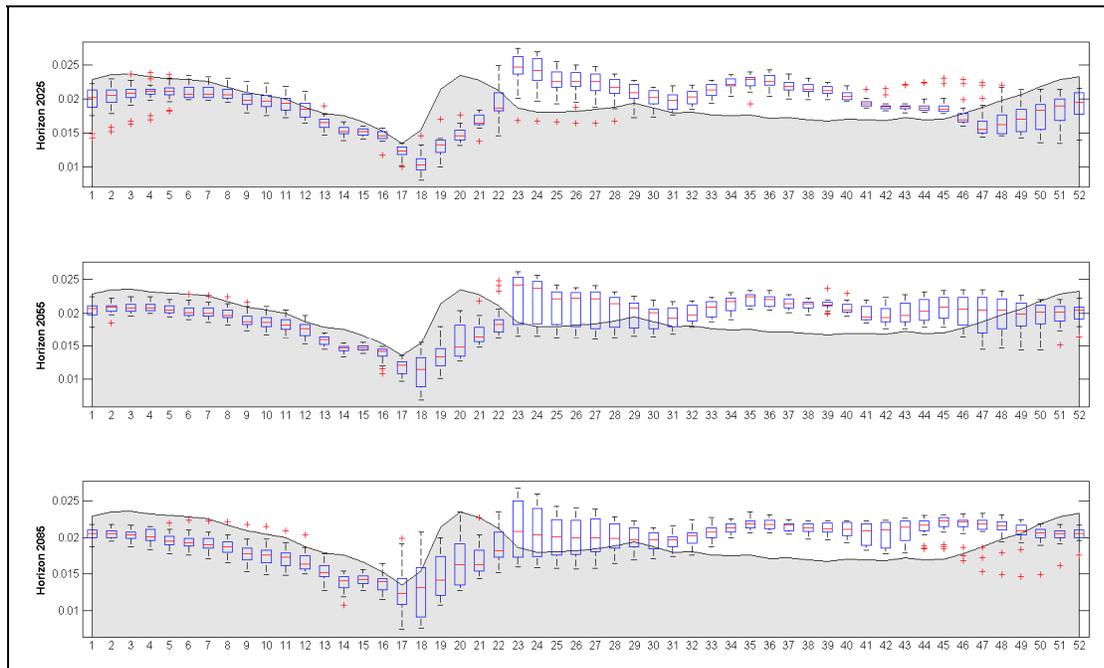


Figure-A XI-2 Répartition de la production électrique annuelle de la centrale Toulustouc avec optimisation

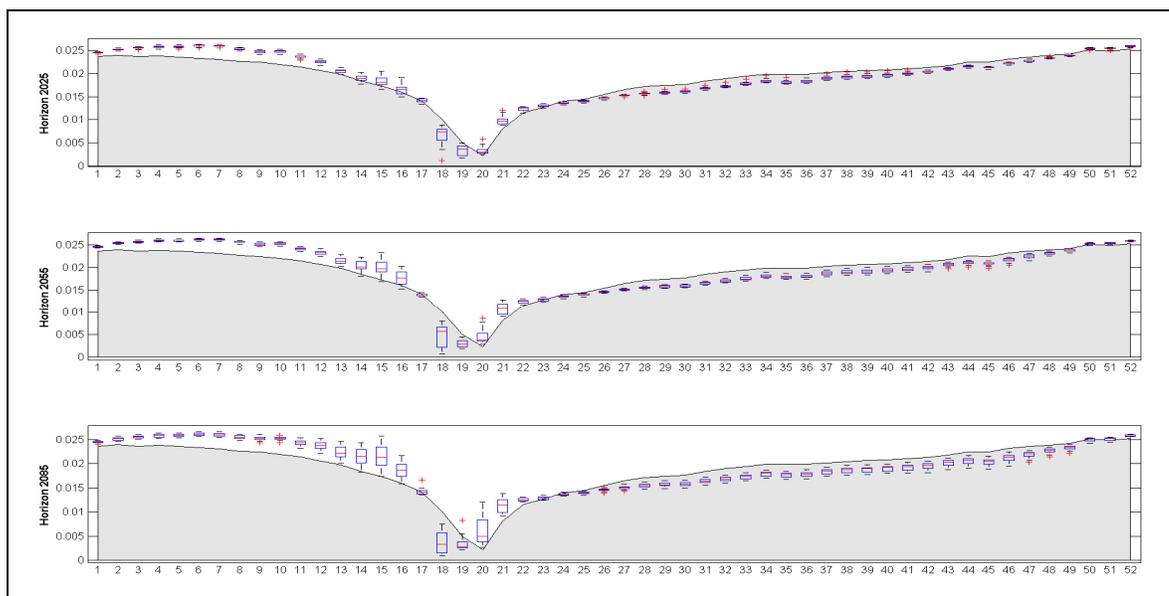


Figure-A XI-3 Répartition de la production électrique annuelle de la centrale Manic-5 sans optimisation

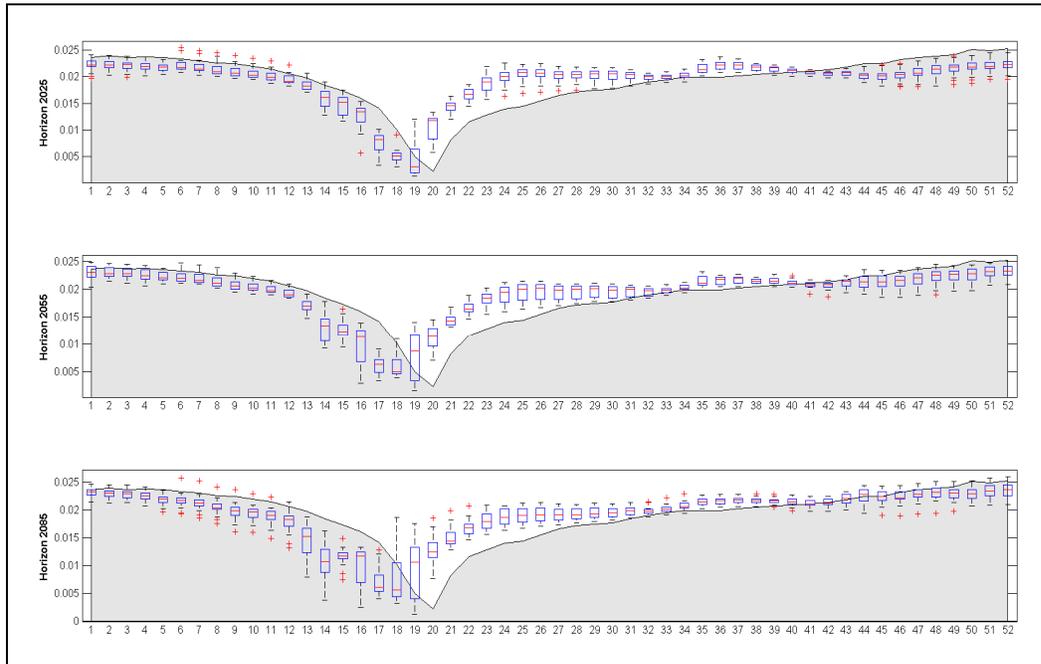


Figure-A XI-4 Répartition de la production électrique annuelle de la centrale Manic-5 avec optimisation

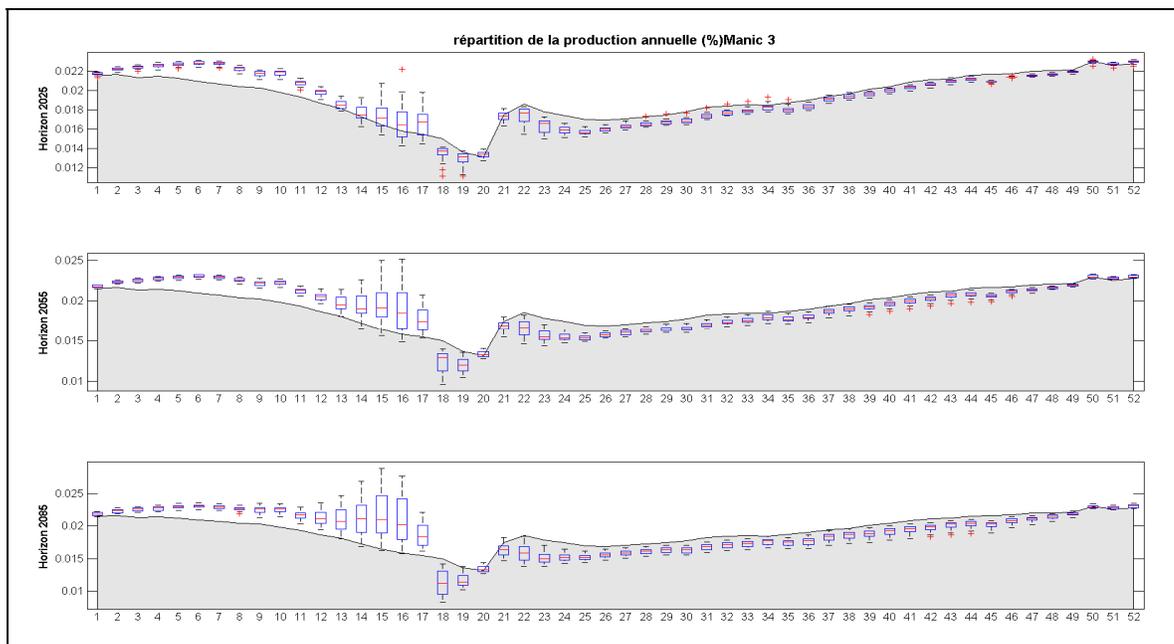


Figure-A XI-5 Répartition de la production électrique annuelle de la centrale Manic-3 sans optimisation

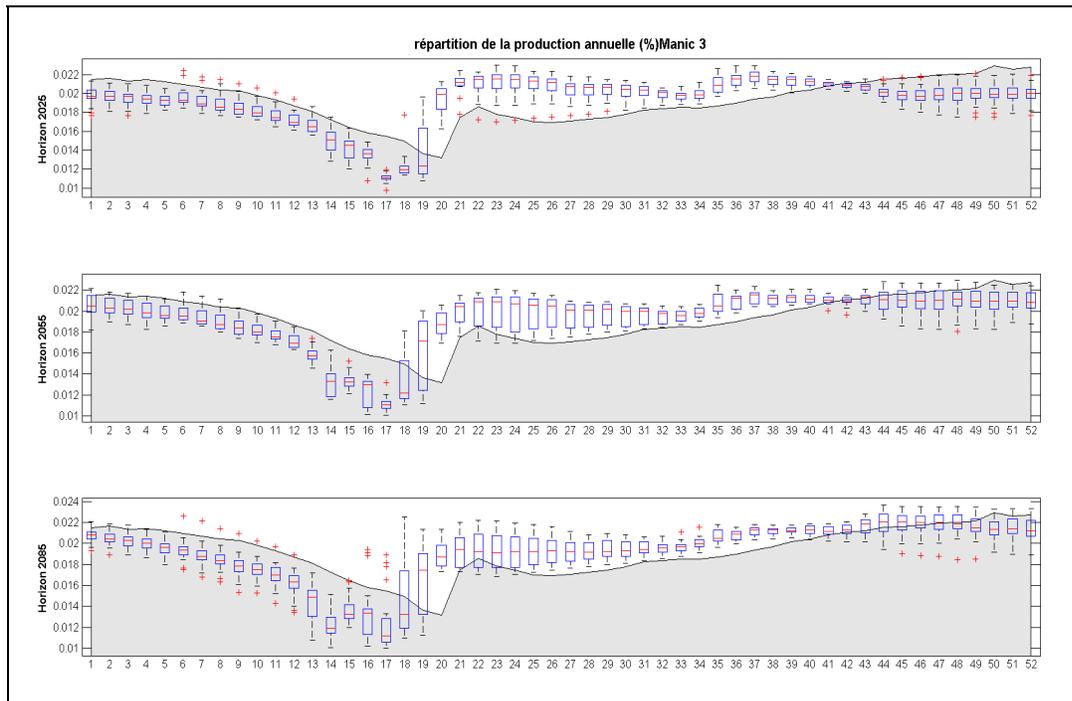


Figure-A XI-6 Répartition de la production électrique annuelle de la centrale Manic-3 avec optimisation

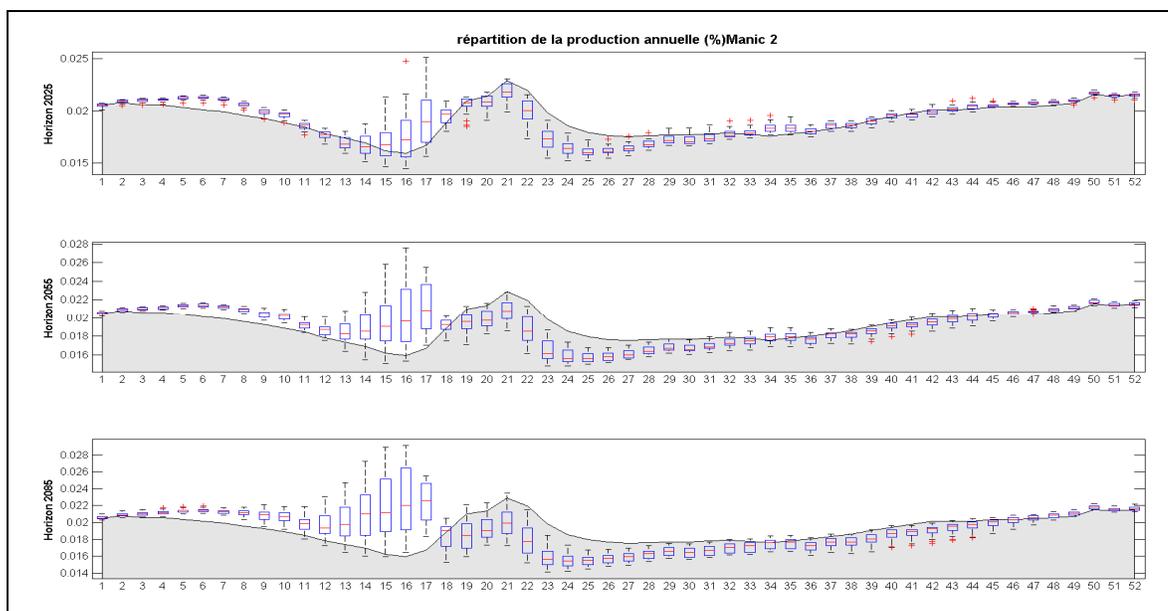


Figure-A XI-7 Répartition de la production électrique annuelle de la centrale Manic-2 sans optimisation

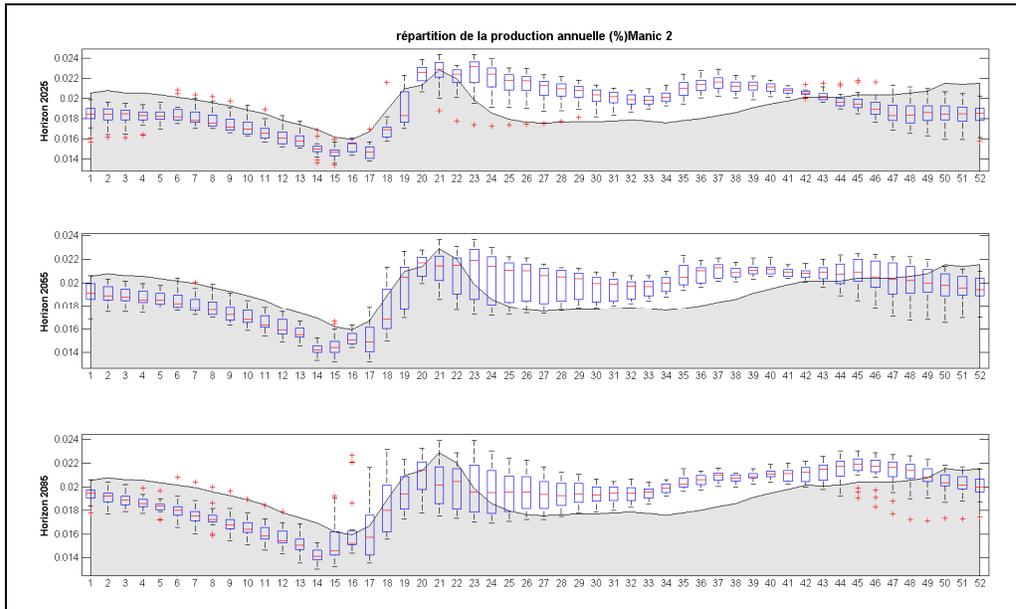


Figure-A XI-8 Répartition de la production électrique annuelle de la centrale Manic-2 avec optimisation

ANNEXE XII

RÉPARTITION DES DÉVERSEMENTS

Les graphiques suivant présentent en « y » le volume moyen de déversement pour chaque semaine de l'année « x ». Seuls les cas présentant des déversements sont illustrés.

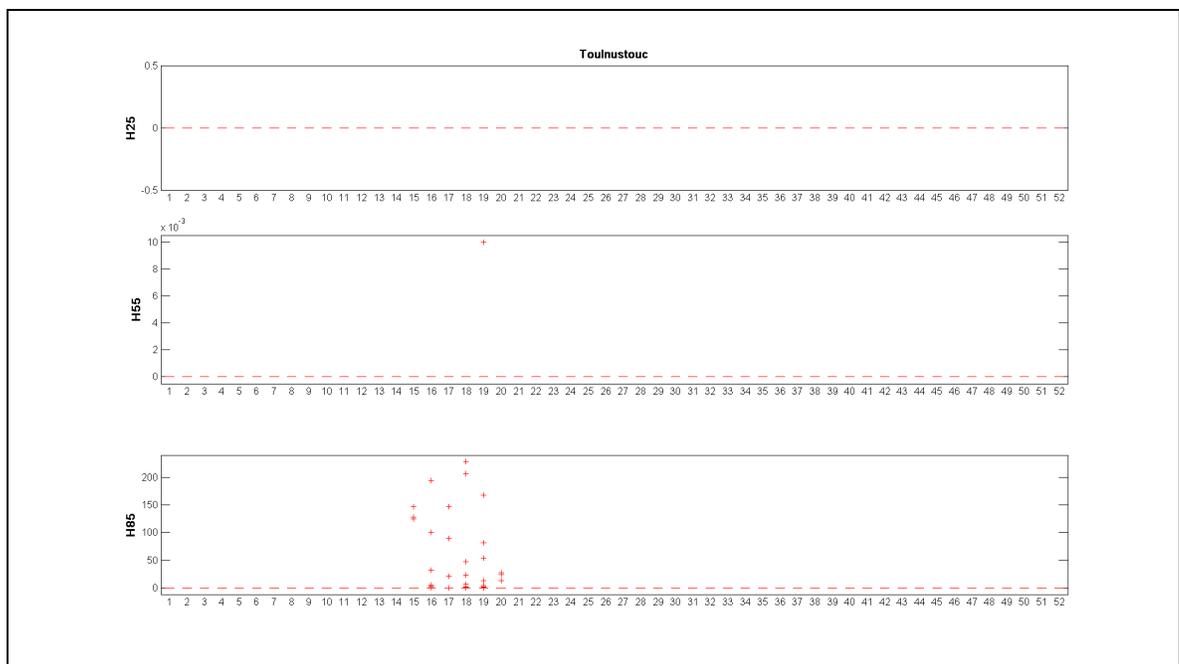


Figure-A XII-1 Déversement en Hm^3 au sous-bassin Toulnostouc sans optimisation des règles de gestion

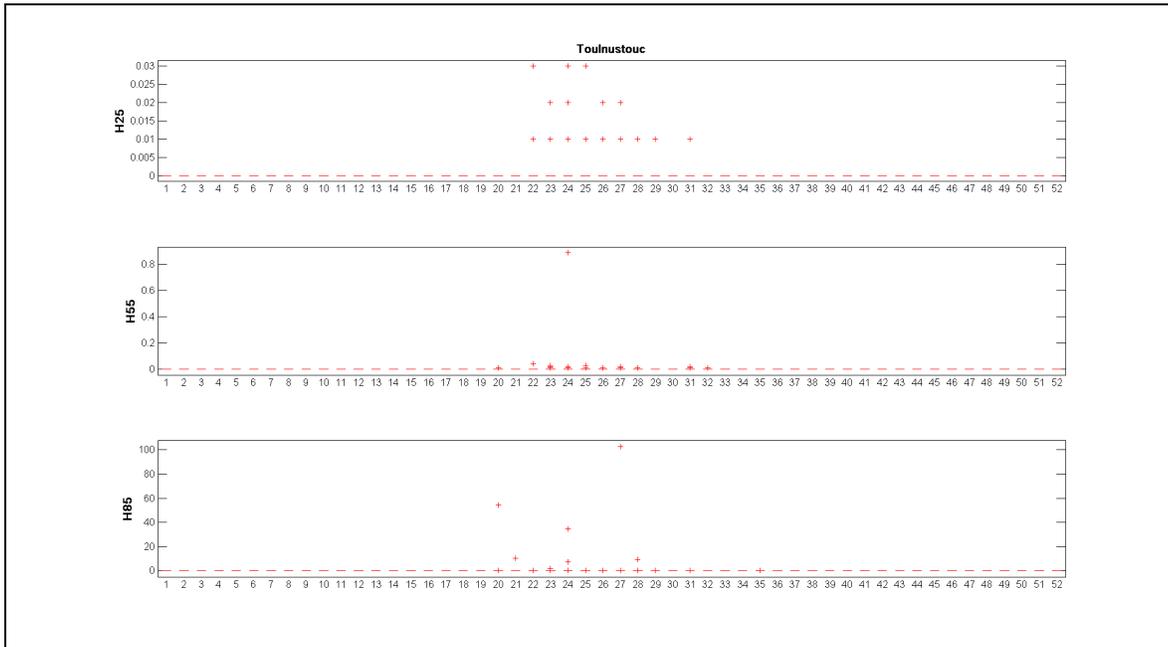


Figure-A XII-2 Déversement en Hm^3 au sous-bassin Toulnostouc avec optimisation des règles de gestion

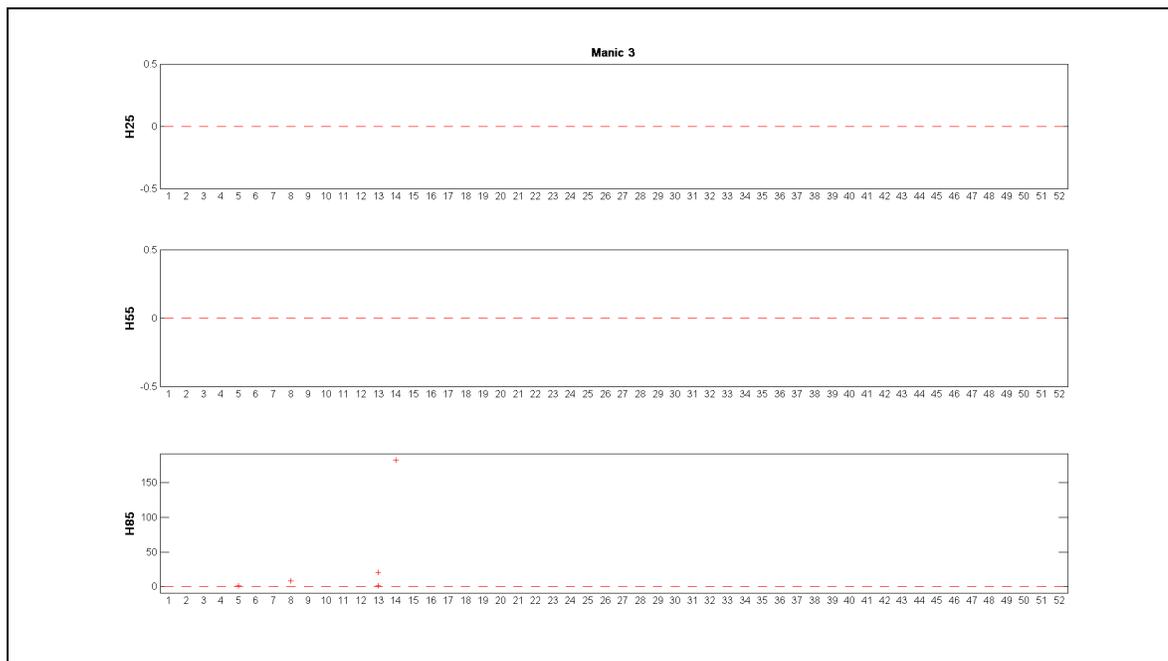


Figure-A XII-3 Déversement en Hm^3 au sous-bassin Manic-3 sans optimisation des règles de gestion. L'optimisation des règles permet l'élimination complète des cas de déversements de Manic-3

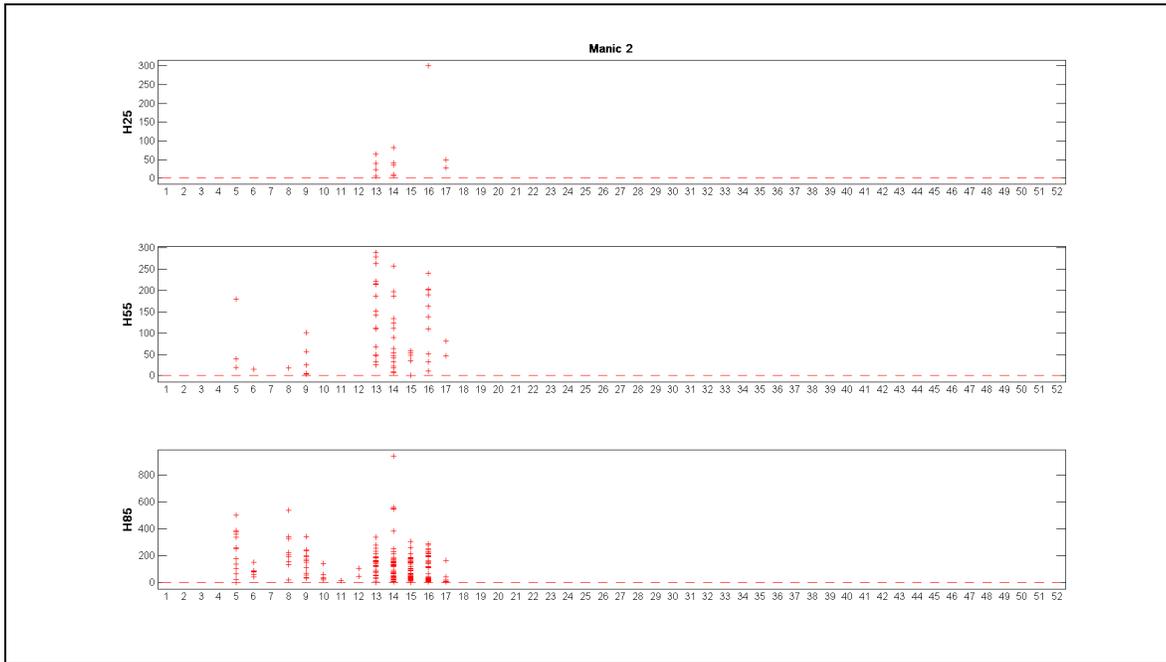


Figure-A XII-4 Déversement en Hm³ au sous-bassin Manic-2 sans optimisation des règles de gestion

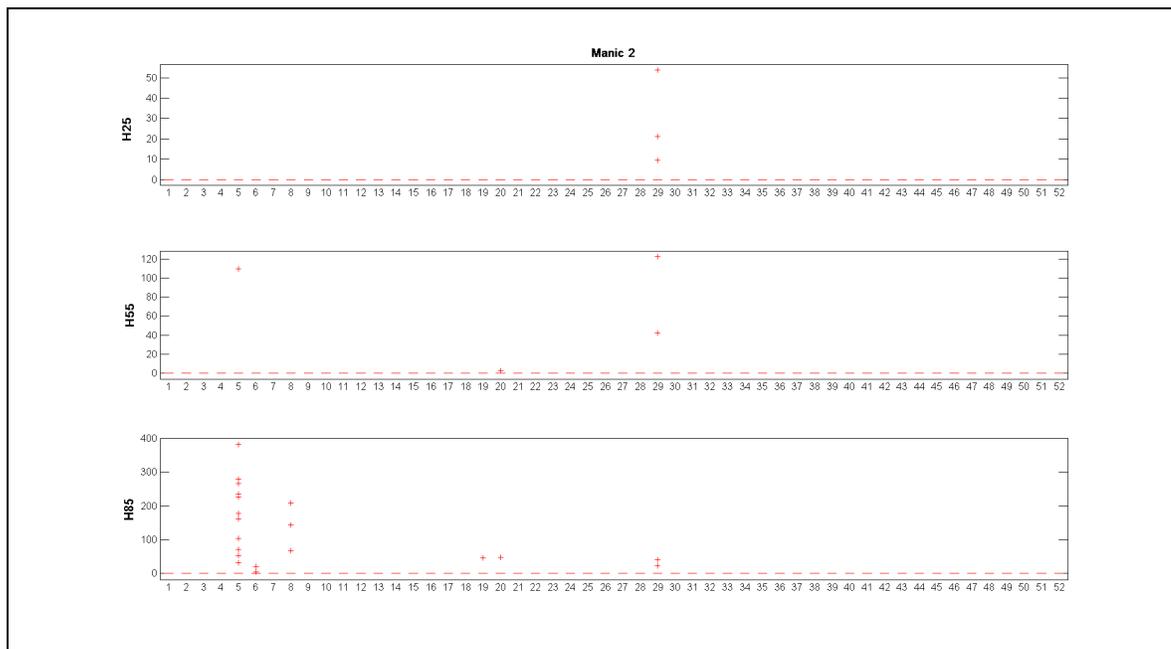


Figure-A XII-5 Déversement en Hm^3 au sous-bassin Manic-2 avec optimisation des règles de gestion

ANNEXE XIII

RENDEMENT DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE

Les figures suivantes présentent le rendement moyen de la production énergétique aux différents horizons pour chacun des bassins versants.

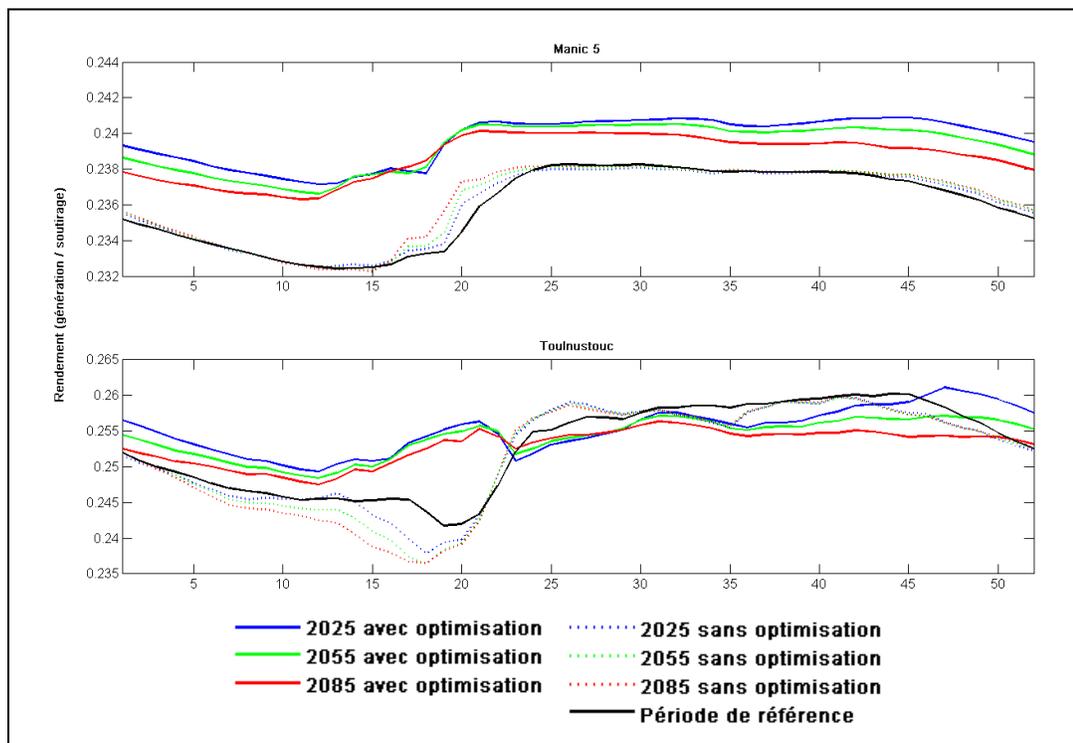


Figure-A XIII-1 Rendement de la production d'énergie aux centrales Manic-5 et Toulnostouc

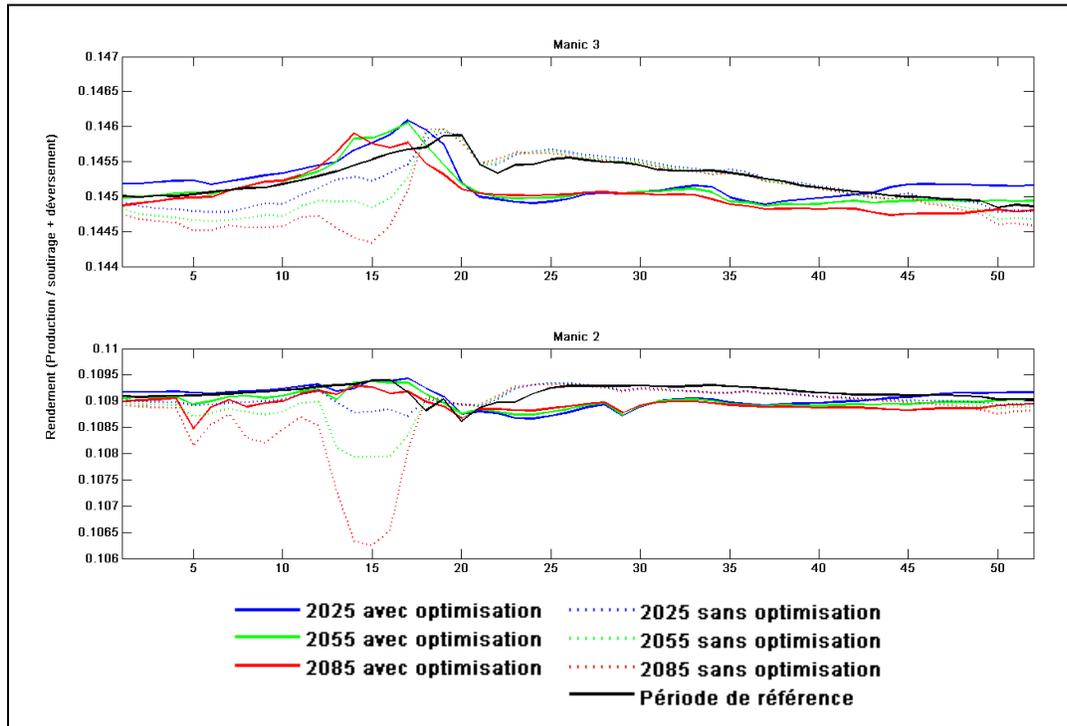


Figure-A XIII-2 Rendement de la production d'énergie aux centrales Manic-3 et Manic-2

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Beven, K. 2006. « A manifesto for the equifinality thesis ». *Journal of hydrology*, vol. 320, p. 18-36.
- Diaz-Nieto, J. et R. L. Wilby. 2005. « A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods : impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom ». *Climatic change*, vol. 69, n° 2-3, p. 245-268.
- Duan, Q.Y., S. Sorooshian et V.K. Gupta. 1994. « Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models ». *Journal of hydrology*, vol. 158, n° 3-4, p. 265-284.
- Fang, Z. X., B. Voron et C. Bocquillon. 1989. « Programmation dynamique: application à la gestion d'une retenue pour l'irrigation ». *Journal des sciences hydrologiques*, vol. 34, n° 4, p. 415-424.
- Fortin, V. 2000. *Le modèle météo-apport HSAMI : historique, théorie et application*. Coll. « Rapport de recherche de l'IREQ ». Varenne (Qc) : Institut de recherche d'Hydro-Québec, 69 p.
- GIEC. 2007. « Publications and data ». Dans *Le site du groupe d'expert sur l'évolution du climat intergouvernemental*. En ligne. <<http://www.ipcc.ch>>. Consulté le 22 août 2011.
- Hay, E. L., R. L. Wilby et G. H. Leavesley. 2000. « A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States ». *Journal of the american water resources association*, vol. 36, n° 2, p. 387-397.
- 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 ». *American meteorological society*, vol. 48, p.725-741.

- Labadie, J. W. 2004. « Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review ». *Journal of water resources planning and management*, vol. 130, n° 2, p. 93-111.
- Lemmen, D.S., F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush. 2008. « From impacts to adaptation : Canada in a changing climate 2007 ». En ligne. 453 p.
<http://adaptation.nrcan.gc.ca/assess/2007/pdf/full-complet_e.pdf>.
Consulté le 22 août 2011.
- Minville, M. 2008. « Potentiel d'adaptation aux changements climatiques de la gestion d'un système hydrique exploité pour la production hydroélectrique : Étude de la rivière Péribonka (Québec, Canada) ». Thèse de doctorat en génie, Montréal, École de technologie supérieure, 273 p.
- Minville, M., Brisette, F., Krau, S., et Leconte, R. 2009. « Adaptation to Climate Change in the Management of a Canadian Water-Resources System Exploited for Hydropower » .*Water resources management*, vol. 23, n° 14, p.2965-2986.
- Minville, Marie, Brisette, F. et Leconte, R. 2010. « Impacts and uncertainty of climate change on water resource management of the Peribonka river système (Canada) ». *Journal of water resources planning and management*, vol. 136, n° 3, p.376-385.
- Nebojsa, N. et R. Swart. 2000. *Special report on emissions scenarios*. Coll. « IPCC special reports ». Cambridge : Cambridge university press, 570 p.
- Poulin, Annie, Brisette, F., Leconte, R., Arsenault, R. et Malo, J.-S. 2011. « Uncertainty of hydrological modelling in climate change impact studies in a Canadian, snow-dominated river basin ». *Journal of Hydrology*, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.08.057 (sous presse).
- Simard, M.-C. 2008. « Caractérisation des impacts des changements climatiques sur les plaines inondables du bassin versant de la rivière Châteauguay ». Mémoire de maîtrise génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 125 p.
- Turgeon, A. 2005. « Solving a stochastic reservoir management problem with multilag autocorrelated inflows ». *Water resources research*, vol. 41, W12414, p. 1-6.

- Turgeon, A. 2007. « Stochastic optimisation of multireservoir operation : The optimal reservoir trajectory approach ». *Water resources research*, vol. 43, W05420, p. 1-10.
- Whitfield, P. H. et A. J. Cannon. 2000. « Recent variations in climate and hydrology in Canada ». En ligne. 47 p. < <http://pubs.cwra.org/doi/pdf/10.4296/cwrj2501019>>. Consulté le 20 août 2011.

