

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

**ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES RÈGLES
DE GESTION D'UN RÉSERVOIR DE PRODUCTION
HYDROÉLECTRIQUE MISES À JOUR À L'AIDE DE LA
PROGRAMMATION DYNAMIQUE STOCHASTIQUE
ET D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE**

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Alexandre MARTIN

Jury : Robert LECONTE (directeur)
Pascal CÔTÉ
Gregory ÉMIEL
Mathieu NUTH

*À mes grands-parents,
Roger, Huguette, Juliette et Arthur*

RÉSUMÉ

L'entreprise Rio Tinto effectue la gestion du système hydrique de la rivière Nechako, situé en Colombie-Britannique (Canada), à partir de règles de gestion optimisées à l'aide d'un algorithme de programmation dynamique stochastique (PDS) et de scénarios d'apports historiques. Les récents développements en recherche opérationnelle tendent à démontrer que la mise à jour des règles de gestion en mode prévisionnel permet d'améliorer la performance des règles de gestion lorsque des prévisions d'ensemble sont utilisées pour mieux cerner les incertitudes associées aux apports à venir. La modélisation hydrologique permet de suivre l'évolution d'un ensemble de processus hydrologiques qui varient dans le temps et dans l'espace (réserve de neige, humidité du sol, etc.). L'utilisation de modèles hydrologiques, en plus d'offrir la possibilité de construire des prévisions d'ensemble qui tiennent compte de l'ensemble des processus simulés, permet de suivre l'évolution de variables d'état qui peuvent être utilisées à même l'algorithme d'optimisation pour construire les probabilités de transition utiles à l'évaluation de la valeur des décisions futures.

À partir d'un banc d'essais numériques dans lequel le comportement du bassin versant de la rivière Nechako est simulé à l'aide du modèle hydrologique CEQUEAU, les résultats du présent projet démontrent que la mise à jour des règles avec l'algorithme de PDS en mode prévisionnel permet une amélioration de la gestion du réservoir Nechako lorsque comparée aux règles optimisées avec l'algorithme en mode historique. Le mode prévisionnel utilisant une variable hydrologique combinant un modèle autorégressif d'ordre 5 (AR5) et la valeur maximale de l'équivalent en eau de la neige (ÉENM) a permis de réduire les déversements non-productifs et les inondations tout en maintenant des productions similaires à celles obtenues à l'aide de règles optimisées en mode historique utilisant l'ÉENM comme variable hydrologique. De plus, les résultats du projet démontrent que l'utilisation de prévisions hydrologiques d'ensemble en mode historique pour construire une variable hydrologique permettant d'émettre une prévision du volume d'apport médian pour les huit mois à venir (PVAM) ne permettait pas d'obtenir des résultats de gestion supérieurs à ceux obtenus avec la variable d'ÉENM.

Mots-clés : Programmation dynamique stochastique (PDS), CEQUEAU, variable hydrologique, mode prévisionnel, prévision d'ensemble, optimisation de réservoir

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier mes codirecteurs de recherche, Robert Leconte et Pascal Côté pour leur soutien dans mes analyses, leurs précieux conseils et leur appui en général. Je tiens également à remercier la compagnie Rio Tinto pour son soutien financier ainsi que pour le partage des modèles et données nécessaires à l'accomplissement de mon projet. Je suis également reconnaissant envers le Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique du Québec (INRS-ETE) pour la fourniture du modèle hydrologique CEQUEAU. J'aimerais de plus remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour son soutien financier. J'adresse aussi un remerciement particulier au département de génie civil et à la faculté de génie de l'Université de Sherbrooke pour m'être offert un soutien financier, un espace de travail et les ressources matérielles nécessaires à l'accomplissement de mon projet de recherche. J'aimerais finalement remercier mes collègues (et plus particulièrement Alexandre, Didier, Élyse, Émilie, Félix-Antoine, Gabriel, Gino-Karl, Hassan, Jean, Kelly, Marc-Olivier, Mélanie, Mohammad et Sophie) pour leur support, leurs conseils et leur enthousiasme quotidien.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES ACRONYMES	xiii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Définition du projet de recherche	2
1.2.1 Description du système hydrique de la rivière Nechako	3
1.2.2 Gestion du système hydrique de la rivière Nechako.....	4
1.3 Objectifs du projet de recherche.....	6
1.4 Contributions originales	8
1.5 Plan du document	8
CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART.....	11
2.1 Modélisation hydrologique.....	11
2.1.1 Représentation des processus hydrologique	11
2.1.2 Représentation des propriétés du milieu	12
2.2 Modèle hydrologique CEQUEAU	14
2.2.1 Principes de base du modèle.....	14
2.2.2 Description de la fonction de production.....	16
2.2.3 Description de la fonction de transfert.....	22
2.3 Prévisions hydrologiques d'ensemble	23
2.4 Programmation dynamique stochastique.....	25
2.4.1 Principes de base de la programmation dynamique stochastique.....	25
2.4.2 Utilisation d'une variable hydrologique	29
2.5 Mise à jour des règles de gestion en mode prévisionnel	30
2.5.1 Performance des modèles prévisionnels en optimisation de réservoir	32
2.5.2 Prévisions hydrologiques d'ensemble en mode prévisionnel	33
2.5.3 Influence de l'horizon de prévision	34
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	37
3.1 Modélisation des apports.....	37
3.1.1 Apports sur le sous-bassin Nechako	38
3.1.2 Apports sur les sous-bassins Cheslatta et Nautley.....	45
3.2 Calcul des variables hydrologiques	45
3.2.1 Modèle autorégressif d'ordre 5 (AR-5)	46
3.2.2 Équivalent en eau maximum de la neige (ÉEMN)	46
3.2.3 Combinaison des modèles autorégressifs et de neige (Combo).....	48

3.2.4	Prévision du volume d'apport médian (PVAM).....	51
3.3	Calcul des probabilités de transitions.....	52
3.3.1	Discrétisation de la variable hydrologique au stade actuel (t).....	53
3.3.2	Discrétisation de la prévision des apports au stade actuel (t).....	53
3.3.3	Discrétisation de la variable hydrologique au stade suivant (t+1).....	55
3.4	Optimisation des règles de gestion.....	56
3.4.1	Objectif d'optimisation de Rio Tinto.....	56
3.4.2	Modélisation des contraintes de gestion du système Nechako.....	56
3.4.3	Fonction de pénalités pour les contraintes non respectées.....	57
3.4.4	Implémentation de l'algorithme d'optimisation.....	57
3.5	Calage des paramètres de la fonction-objectif.....	58
3.6	Banc d'essai pour la mise à jour des règles de gestion.....	60
CHAPITRE 4 ARTICLE SCIENTIFIQUE.....		63
4.1	Avant-propos.....	63
4.2	Abstract.....	64
4.3	Introduction.....	65
4.4	Nechako Reservoir System and Management.....	68
4.5	Natural inflows modeling.....	70
4.6	Optimization model.....	71
4.7	Hydrological variables.....	75
4.8	On-line updating testbed.....	77
4.9	Results and discussion.....	80
4.9.1	Calibration results.....	80
4.9.2	Testbed comparison with hydrological variables.....	81
4.9.3	Testbed analyses over the yearly inflow volumes.....	85
4.10	Conclusion.....	89
4.11	Acknowledgements.....	90
CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET ANALYSES COMPLÉMENTAIRES.....		91
5.1	Analyse de la variable hydrologique « PVAM ».....	91
5.1.1	Comparaison de la variable hydrologique « PVAM » avec le banc d'essai.....	91
5.1.2	Analyse en fonction des volumes d'apports annuels.....	93
5.2	Discussion complémentaire sur la gestion annuelle.....	97
5.2.1	Comparaison sur les années d'apports faibles, modérés et élevés.....	97
5.2.2	Comparaison sur les années d'apports extrêmes.....	98
5.2.3	Conclusion sur l'utilisation des prévisions d'ensemble en mode prévisionnel.....	99
5.2.4	Conclusion sur l'utilisation des prévisions d'ensemble en mode historique.....	99
5.3	Analyse complémentaire aux prévisions d'ensembles.....	105
5.3.1	Discussion sur les simulations de CEQUEAU.....	105
5.3.2	Recommandations complémentaires aux résultats dans un environnement virtuel.....	106
CHAPITRE 6 CONCLUSION.....		109
6.1	Sommaire des travaux réalisés.....	109

6.2	Contributions originales des travaux de recherche.....	110
6.3	Recommandations et perspectives de recherche	110
	ANNEXE A – COEFFICIENTS DE BASSIN	115
	ANNEXE B – RÉSULTATS DE SIMULATION EN MODE HISTORIQUE	119
	ANNEXE C – DRÉSULTATS DE SIMULATION EN MODE PRÉVISIONNEL	139
	LISTE DES RÉFÉRENCES.....	159

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Présentation générale du système hydrique de la rivière Nechako (Source : Rio Tinto).....	4
Figure 2 - Schématisation des carreaux entiers et partiels du modèle CEQUEAU.....	15
Figure 3 - Schématisation de la fonction de production du modèle CEQUEAU.....	17
Figure 4 - Schématisation de la fonction de transfert du modèle CEQUEAU.....	22
Figure 5 - Exemple de prévision hydrologique d'ensemble.....	24
Figure 6 - Représentation schématique d'un réservoir simple.....	26
Figure 7 - Comparaison schématique du mode historique (a) et du mode prévisionnel (b).....	31
Figure 8 - Représentation graphique de l'élévation des carreaux entiers du modèle CEQUEAU du sous-bassin Nechako.....	40
Figure 9 - Exemple de comparaison entre les scénarios historiques et les prévisions d'ensemble pour le 1 ^{er} mars 1976.....	43
Figure 10 - Simulation des apports pour l'année 1960 en utilisant les conditions initiales de 53 scénarios.....	44
Figure 11 - Écart-type des 53 scénarios simulés pour l'année 1960.....	44
Figure 12 - Corrélation entre le volume de crue et différentes variables hydrologiques (source : Desreumaux, Q., 2012).....	47
Figure 13 - Exemple de l'équivalent en eau de la neige (ÉEN) observé et simulé pour l'année 1996.....	48
Figure 14 - Exemple de l'évolution des scénarios d'ÉENM (mm) en fonction de la période t pour l'année 1969.....	49
Figure 15 - Comparaison des variables hydrologiques ÉENM et Combo (14 mai 2000 en mode prévisionnel).....	50
Figure 16 - Comparaison des variables PVAM et ÉENM en mode historique pour une année d'apports élevés, modérés et faibles.....	52
Figure 17 - Exemple d'évaluation des probabilités de transition pour la valeur d'apport (qt) en fonction de la valeur de la variable hydrologique ÉENM (ht) pour la période du 7 juin.....	55
Figure 18 - Exemple de résultats de débit maximal à Vanderhoof obtenus en fonction de la discrétisation de l'espace des paramètres de la fonction objectif (mode historique et variable hydrologique AR5).....	60
Figure 19 - Schématisation de la routine de calculs du banc d'essai prévisionnel.....	61
Figure 20 - Schematic diagram of the Nechako Reservoir system.....	69
Figure 21 - Standard deviation of the MSWE variable through the year (forecast on a 60-day horizon).....	77
Figure 22 - Average yearly inflows (thick dashed line, with dotted lines for standard deviation) compared to the standard deviations of the impact of initial conditions of October 1st (period t = 1) over the simulated inflows for the rest of the year.....	79
Figure 23 - Differential unproductive spill volumes (up) and flood volumes (down) on every period in the year between on-line (Combined) and off-line (MSWE) methods.....	85
Figure 24 - Comparison of the management with off-line/MSWE and on-line/Combined methods over extreme year 1976.....	88
Figure 25 - Prévisions d'ensemble pour la période du 10 juin 1969.....	96
Figure 26 - Comparaison des résultats moyens de la gestion sur les années d'apports faibles.....	101

Figure 27 - Comparaison des résultats moyens de la gestion sur les années d'apports modérés	102
Figure 28 - Comparaison des résultats moyens de la gestion sur les années d'apports élevés	103
Figure 29 - Comparaison des résultats moyens de la gestion sur les années d'apports extrêmes	104
Figure 30 – Valeurs annuelles du critère de biais sur les ÉEN simulés avec les données météorologiques corrigées, lorsque comparées aux observations	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Limites imposées par le NFCP sur les débits déversés à Skins Lake.....	6
Tableau 2 - Comparison of the chosen set of αx penalty parameters for each simulation.....	81
Tableau 3 - Simulation results when applying management rules for 1960-2012.....	82
Tableau 4 - Comparison of the management results using the best hydrological variable in off-line and on-line methods based on the yearly inflows.....	86
Tableau 5 - Comparaison des résultats de gestion du mode historique avec les variables ÉENM et PVAM ainsi qu'en mode prévisionnel avec la variable Combo.....	92
Tableau 6 - Valeur p entre les distributions de la simulation historique/ÉENM et les six autres simulations.....	92
Tableau 7 - Résultats de gestion des règles optimisées en mode historique avec la variable PVAM en fonction des années.....	94
Tableau 8 - Valeurs-p de la distribution des résultats avec la variable hydrologique PVAM et deux simulations de référence différentes.....	94
Tableau 9 - Comparaison des critères de performance pour la simulation des apports hydriques par le modèle CEQUEAU sur l'ensemble des années simulées (1980 à 2010) ...	106

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
AR5	Modèle autorégressif d'ordre 5
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
CE	Carreau entier du modèle hydrologique CEQUEAU
Combo	Variable hydrologique combinée (AR5 + ÉENM)
CP	Carreau partiel du modèle hydrologique CEQUEAU
ÉEN	Équivalent en eau de la neige (mm)
ÉENM	Équivalent en eau de la neige maximal (mm)
ESP	<i>Ensemble streamflow predictions</i> (prévisions hydrologiques d'ensemble)
INRS-ÉTÉ	Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique du Québec
MSWE	<i>Maximum snow water equivalent</i> (mm)
NFCP	<i>Nechako Fisheries Conservation Program</i>
NSERC	<i>Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada</i>
PD	Programmation dynamique
PDS	Programmation dynamique stochastique
PVAM	Prévision du volume d'apport médian
SDP	<i>Stochastic Dynamic Programming</i>
SWE	<i>Snow water equivalent</i>

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

La relation que porte l'Homme à l'eau et sa disponibilité est cruciale pour sa survie. La vie sur Terre et l'équilibre des écosystèmes y habitant en dépendent d'ailleurs. De même, les activités socio-économiques de nos sociétés dépendent de cette ressource et peuvent avoir un impact majeur sur sa disponibilité et sa qualité. Bien que présente en grande quantité sur la planète, la distribution de l'eau dans le temps et dans l'espace n'est pas uniforme. L'évolution de l'activité humaine et l'avènement des changements climatiques accentuent la modification des régimes hydriques.

Face à ces enjeux, la gestion des ressources hydriques vise à assurer la disponibilité en eau pour les différents utilisateurs sur le réseau tout en limitant les conséquences des événements extrêmes comme les inondations ou les étiages. Le gestionnaire doit souvent répondre à des utilisations variées et compétitives comme l'alimentation en eau potable pour la population, la production d'hydroélectricité, la conservation des habitats naturels, les installations pour plaisanciers, etc. L'incertitude liée à la variabilité des apports sur le bassin versant d'une période à une autre complique d'autant plus la tâche face à la prise de décision dans un contexte d'aléa hydrologique.

Dans une région nordique comme celle du Canada, la gestion de la fonte printanière constitue l'un des enjeux majeurs pour la gestion des systèmes hydriques. Les volumes d'apports associés à cette période critique constituent souvent une proportion importante des volumes annuels. La connaissance la plus complète possible de l'état du système hydrique à chaque période, de même que l'utilisation d'informations adéquates pour quantifier et prévoir les périodes de début et de fin de cet événement particulier, permettent d'améliorer la gestion de celui-ci sur l'ensemble de l'année.

La disponibilité de l'eau dans l'espace et dans le temps étant variable d'un territoire à un autre, les solutions et outils associés à la gestion d'un système hydrique particulier doivent être développés de façon spécifique au site étudié. Diverses méthodes permettent, une fois la définition du système complétée, d'optimiser le bénéfice associé aux décisions à prendre quant

aux usages de l'eau. En gestion de barrages sur des systèmes simples possédant de un à trois réservoirs, la programmation dynamique stochastique (PDS) demeure à ce jour l'une des solutions les plus répandues et les plus robustes pour répondre aux usages multiples tout en maximisant la production d'hydroélectricité (Labadie, 2004).

Parmi les derniers développements dans le domaine de la recherche opérationnelle, on note l'utilisation d'approches permettant de rafraîchir les règles de gestion en fonction des informations les plus récentes obtenues concernant l'état du système hydrique (Castelletti et coll., 2008b). À cet égard, la modélisation hydrologique offre la possibilité de tenir compte de l'ensemble des processus hydrologiques pour décrire en détails l'état d'un bassin versant. L'utilisation de tels modèles, combinés aux méthodes d'optimisation établies comme la PDS, est un domaine en plein essor en gestion de réservoirs. La polyvalence de ces deux outils combinés est un atout indéniable pour permettre aux gestionnaires de systèmes hydriques de faire face aux défis et opportunités occasionnés par les changements climatiques.

1.2 Définition du projet de recherche

Le projet de recherche a été réalisé en partenariat avec l'Université de Sherbrooke et l'entreprise Rio Tinto dans le cadre du projet Climhydro-2, subventionné par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada. Climhydro-2 vise à établir et évaluer les stratégies d'adaptation des compagnies d'hydroélectricité canadiennes face aux changements climatiques en développant des approches et des outils pour aider à la planification de la production hydroélectrique. Le site à l'étude est le système hydrique de la rivière Nechako, en Colombie-Britannique, géré par l'entreprise Rio Tinto. En plus des contraintes de production hydroélectrique associée à la centrale Kemano qui puise son eau à même le réservoir principal de ce système hydrique, différentes contraintes environnementales doivent être respectées pour assurer la sécurité le long de la rivière Nechako. Le présent projet vise à étudier la performance d'un outil de gestion prévisionnel développé par Rio Tinto qui permet de mettre à jour en temps réel les règles de gestion du système Nechako à partir de prévisions d'ensemble.

1.2.1 Description du système hydrique de la rivière Nechako

Le système hydrique de la rivière Nechako est géré par l'entreprise Rio Tinto. Son réservoir principal sert d'apport à la centrale hydroélectrique de Kemano qui possède une capacité d'environ 1000 MW. La centrale de production alimente en électricité l'aluminerie Kitimat, appartenant aussi à Rio Tinto. La Figure 1 illustre les principales composantes du système hydrique.

Le bassin versant de la rivière Nechako couvre une superficie totale de 26 500 km², que l'on peut séparer en trois sous-bassins différents. Le territoire alimentant le réservoir Nechako en apports hydriques en est le premier en amont (14 000 km²). Ce réservoir alimente à son tour la centrale Kemano par une conduite d'amenée (à partir de la prise d'eau Tahtsa Intake) et sert aussi de source d'apports contrôlés pour alimenter la rivière Nechako (à partir du déversoir de Skins Lake). L'eau déversée à Skins Lake chemine par la rivière Nechako vers Cheslatta Lake qui possède un déversoir non contrôlé à son exutoire (à Cheslatta Fall). Le territoire alimentant en apports le réservoir Cheslatta constitue le second sous-bassin du système hydrique (1 500 km²). L'eau déversée à Cheslatta Fall transite par la rivière Nechako jusqu'à Fort Fraser, où la rivière Nautley se joint à elle. La rivière Nechako s'écoule ensuite vers la ville de Vanderhoof, dernier point de contrainte sur le système géré par Rio Tinto. Le territoire alimentant en apports la rivière Nautley et la portion de rivière jusqu'à Vanderhoof constitue le troisième et dernier sous-bassin (11 000 km²).

Le système hydrique de la rivière Nechako comporte donc deux exutoires : la conduite d'amenée servant à alimenter la centrale Kemano, située à l'extrême ouest; et la rivière Nechako à la hauteur de la ville de Vanderhoof, située à l'extrême Est. Les volumes d'eau turbinés par la centrale de production sont rejetés dans une vaste baie située au sud de la ville de Kitimat et raccordée à l'océan Pacifique. La rivière Nechako est, pour sa part, un affluent du fleuve Fraser et le rejoint à la hauteur de la ville de Prince George à une centaine de kilomètres à l'est de Vanderhoof.

La région est sujette à d'importants volumes de précipitations solides (jusqu'à 1200 mm d'équivalent en eau de la neige annuellement) et la principale source d'apports sur le système hydrique provient de la fonte printanière. Les précipitations annuelles sont de l'ordre de

400 mm/année sur le secteur est du bassin versant (constitué de terrains relativement plats à une élévation d'environ 850 m) et 2000 mm/année sur le secteur ouest plus montagneux (élévation jusqu'à 1500 m d'altitude). Le temps de parcours, entre le déversoir de Skins Lake et Vanderhoof, qui est amorti par le temps de parcours dans le Lake Cheslatta, peut prendre jusqu'à 6 jours.

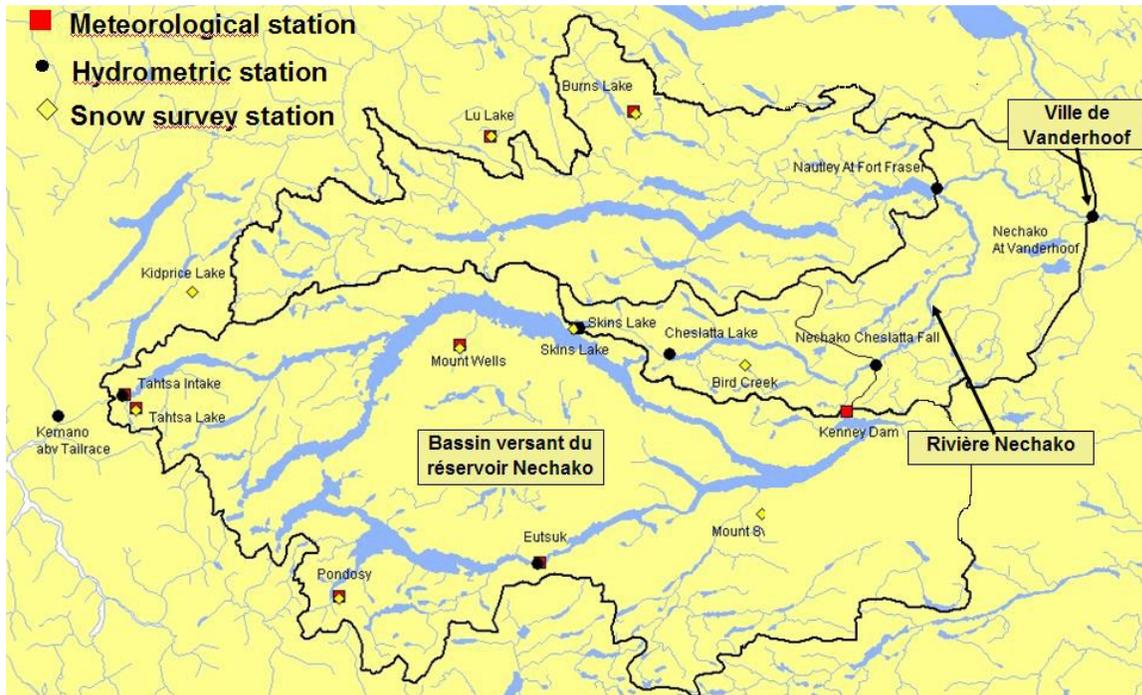


Figure 1 - Présentation générale du système hydrique de la rivière Nechako (Source : Rio Tinto)

1.2.2 Gestion du système hydrique de la rivière Nechako

La gestion du système hydrique de la rivière Nechako vise à répondre à trois objectifs principaux, soit soutenir la puissance minimum requise par l'aluminerie, réduire les risques d'inondation et assurer les débits environnementaux requis, et ce, tout en maximisant l'efficacité de la centrale Kemano. Ces objectifs sont cependant de nature compétitrice. La gestion de la puissance minimale tire avantage d'une gestion du niveau du réservoir Nechako à des élévations élevées. À l'inverse, la réduction des risques d'inondation tire avantage d'une gestion favorisant un niveau bas pour contenir, en période de crue, les volumes d'apports causés par la fonte printanière et ainsi limiter les risques de déversements d'envergure.

Le seuil d'inondation de la rivière Nechako à Vanderhoof est défini à un débit de 550 m³/s, débit à partir duquel les installations municipales et les habitations risquent d'être endommagées. Au-

delà de ce seuil, des équipements de protection doivent être déployés pour ne pas risquer d'endommager le site.

D'autre part, le barrage et la prise d'eau au réservoir Nechako nécessitent le respect d'un niveau minimal et d'un niveau maximal pour répondre aux limites de fonctionnement et assurer l'intégrité physique de ces structures. À partir d'une élévation de 849.6 m, la hauteur d'eau dans le réservoir ne permet plus d'alimenter adéquatement la prise d'eau pour la conduite d'amenée vers la centrale hydroélectrique. Le niveau du réservoir Nechako doit donc rester supérieur à ce seuil en tout temps afin d'assurer la production électrique. De même, l'élévation maximale de 853.4 m doit être respectée pour des raisons de sécurité (sous dérogation exceptionnelle, le niveau du réservoir peut atteindre une élévation allant jusqu'à 853.7 m). La capacité maximale de la conduite d'amenée reliant Tahtsa Intake à la centrale de Kemano est de 150 m³/s. De même, la capacité du déversoir de Skins Lake vers la rivière Nechako est de 760 m³/s.

En plus des limites de la capacité physique des ouvrages en place, la gestion de la rivière Nechako doit répondre durant toute l'année aux exigences environnementales fixées par le *Nechako Fisheries Conservation Program*. Les débits déversés minimaux et maximaux présentés au Tableau 1 doivent être respectés au déversoir de Skins Lake. Ces chiffres sont des valeurs moyennes qui sont imposées dans les simulations à long terme. Les valeurs réelles peuvent être différentes et les déversements dépendent de la température.

L'alimentation de l'aluminerie de Kitimat par le biais de la centrale de Kemano nécessite une production minimale de 700 MW. De plus, un contrat d'approvisionnement en énergie entre Rio Tinto et une société tierce nécessite une production supplémentaire.

Il faut noter cependant que, par le passé, l'ensemble des contraintes n'ont pas pu toutes être respectées à la fois. À titre d'exemple, les limites d'inondation à Vanderhoof ont été largement dépassées lors de la période de crue printanière de l'année 2007. De même, la limite de production minimale de 700 MW n'a pas pu être respectée lors des années 1984 et 1985.

Afin d'optimiser la gestion des débits turbinés et déversés en fonction de ces contraintes, Rio Tinto a développé un outil utilisant la programmation dynamique stochastique (PDS). Cet outil d'optimisation permet d'établir, à chaque période de trois jours, les soutirages optimaux à

considérer à la sortie du réservoir Nechako en fonction de l'état du système. L'outil de PDS caractérise l'état du système à l'aide d'une variable hydrologique. Lorsque les règles de gestion sont établies à partir d'une séquence historique d'apports, celles-ci permettent d'améliorer la gestion du système hydrique de la rivière Nechako. L'étude de Desreumaux et coll. (2014) a cependant démontré que la performance des règles de gestion sur le système Nechako dépend du type de variable hydrologique utilisée avec l'outil de PDS.

Tableau 1 – Limites imposées par le NCP sur les débits déversés à Skins Lake

	Débit minimal (m ³ /s)	Débit maximal (m ³ /s)
1 ^{er} janv. – 31 mar.	32.4	85.0
1 ^{er} avr. – 30 avr.	35.9	85.0
1 ^{er} mai – 9 juil.	49.0	283.0
10 juil. – 30 juil.	212.0	283.0
1 ^{er} août – 20 août	150.5	283.0
21 août – 31 août	14.2	283.0
1 ^{er} sep. – 31 oct.	32.4	125.0
1 ^{er} nov. – 31 déc.	32.4	85.0

1.3 Objectifs du projet de recherche

Les trois objectifs spécifiques du projet Climhydro-2 sont de développer des modèles d'optimisation stochastiques adaptés à la non-stationnarité des débits, de mettre au point des méthodes de prévision hydrologique reflétant la non-stationnarité du climat et de valider ces approches en les appliquant à des problématiques de gestion réelles chez les producteurs hydroélectriques canadiens.

Sur la base de ces trois objectifs, le présent projet de recherche est orienté sur l'utilisation de prévisions d'ensemble à même l'outil d'optimisation stochastique développé par Rio Tinto pour le système Nechako. Pour faciliter l'analyse et la comparaison des performances des différentes données utilisées, l'ensemble des simulations est effectué dans un environnement virtuel où le comportement du bassin versant a été simulé à l'aide d'un modèle hydrologique. Un banc d'essai automatisant la mise à jour des règles de gestion en mode prévisionnel a été mis en œuvre dans le cadre de ce projet afin de répondre à l'objectif principal suivant :

i) Évaluer la performance des règles de gestion du réservoir Nechako lorsque celles-ci sont mises à jour avant chaque décision à l'aide de l'outil de PDS de Rio Tinto et de prévisions d'ensemble construites à l'aide de la modélisation hydrologique.

Pour répondre à cet objectif, les séquences d'apports naturels et les propriétés hydrologiques du système hydrique de la rivière Nechako ont été simulées à l'aide du modèle hydrologique CEQUEAU. Le banc d'essai a été mis en œuvre afin qu'à chaque pas de temps un ensemble de scénarios d'apports soit généré en fonction de l'état du système. À chaque période, l'algorithme d'optimisation de PDS met à jour les règles de gestion à partir de ces scénarios d'ensemble. L'opération du système est ensuite simulée en tenant compte des consignes de soutirage mises à jour et des apports simulés sur le bassin versant. La performance des règles de gestion mises à jour en utilisant différentes variables hydrologiques est comparée à des simulations de référence sans mise à jour.

Les objectifs secondaires du projet de recherche sont les suivants :

ii) Comparer la performance des règles de gestion issues du modèle d'optimisation avec et sans la mise à jour utilisant différentes variables hydrologiques.

iii) Évaluer la performance des règles de gestion sans mise à jour lorsque la variable hydrologique est identifiée à l'aide de prévisions d'ensemble.

Trois variables hydrologiques différentes ont été testées à la fois dans les modes avec et sans mises à jour des règles de gestion. La première variable est un modèle autorégressif d'ordre 5 (appelée dans cet ouvrage « AR5 ») émettant une prévision des apports de la période à venir. La seconde variable est l'équivalent en eau maximal de la saison (appelée « ÉENM » dans le présent rapport et « MSWE » dans l'article scientifique) et la troisième est une combinaison de ces deux variables (appelée « Combo »).

Pour répondre à l'objectif *iii*), une prévision du volume d'apport médian (appelée « PVAM ») établie à partir des prévisions d'ensemble sur un horizon de huit (8) mois a été utilisée à titre de variable hydrologique.

1.4 Contributions originales

Ce projet de recherche contribue à l'avancement des connaissances dans le domaine de la recherche opérationnelle et de la gestion de barrage en temps réel.

La mise à jour des règles de gestion à partir de prévisions d'ensemble construites en temps réel avec un modèle hydrologique a été peu explorée jusqu'à ce jour (Pianosi et Soncini-Sessa, 2009). Ce projet de recherche vise à identifier les avantages et les inconvénients d'une telle méthode, lorsqu'appliquée sur un bassin versant sujet à d'importants volumes annuels de neige. Les connaissances acquises dans le cadre de ce projet seront utiles à d'autres modèles d'optimisation de réservoir pour des systèmes hydriques dans des régions climatiques similaires, au Canada ou dans d'autres régions nordiques.

Le recours à des probabilités de transition construites à partir d'une variable hydrologique utilisant des données issues d'un modèle hydrologique (comme les stocks de neige par exemple) dans un modèle d'optimisation avec mise à jour a été peu étudié jusqu'à ce jour. Ce projet permet donc de tracer une première référence en la matière. Les résultats et analyses pourront ainsi servir d'assises pour des développements ultérieurs.

1.5 Plan du document

Le mémoire est structuré en six chapitres, soit l'introduction, l'état de l'art, la méthodologie détaillée du projet de recherche, les résultats et analyses de l'objectif principal sous forme d'un article scientifique, les résultats et analyses des essais complémentaires et la conclusion.

L'état de l'art sur les différents aspects du projet de recherche est présenté au chapitre 2. Cette section du rapport présente une revue des notions de modélisation hydrologique, des méthodes de calcul du modèle CEQUEAU, des méthodes de prévisions d'ensemble, de la programmation dynamique stochastique et de l'optimisation de réservoirs avec mise à jour.

Le chapitre 3 présente quant à lui la méthodologie détaillée utilisée pour le projet de recherche. Les procédures de calcul pour modéliser les apports, les variables hydrologiques et les probabilités de transitions y sont décrites, de même que les détails du modèle d'optimisation de

Rio Tinto, la procédure de mise à jour des règles du banc d'essai et la méthode utilisée pour effectuer le calage des paramètres de la fonction-objectif.

L'article scientifique soumis au *Journal of Water Resources Planning and Management* de l'*American Society of Civil Engineers* (ASCE) résumant les résultats principaux obtenus avec le banc d'essai est présenté au chapitre 4.

Le chapitre 5 résume l'ensemble des résultats complémentaires à l'article scientifique. Une analyse détaillée des résultats obtenus avec la variable hydrologique basée sur les volumes médians y est présentée, de même qu'une évaluation du modèle hydrologique CEQUEAU en comparaison avec les données observées sur le terrain.

Le chapitre 6 présente les conclusions principales du projet de même que des recommandations pour les gestionnaires.

Afin d'alléger la lecture du rapport et donner accès à l'ensemble des données et/ou analyses utilisées dans le cadre du projet, des éléments complémentaires à la compréhension de la démarche générale ainsi que les données et résultats détaillés des simulations ont été placés en annexe.

CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART

2.1 Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique constitue l'un des outils les plus utilisés pour répondre aux enjeux associés à la simulation et la prévision des variables hydrologiques. La modélisation hydrologique est aussi utilisée en complément à l'observation et à l'expérimentation afin de parfaire ou peaufiner la connaissance de l'état du bassin versant et des processus hydrologiques qui ont lieu (Hingray et coll., 2009).

Le choix du modèle hydrologique se fait généralement en fonction des objectifs spécifiques de simulation, des données disponibles pour répondre à ces objectifs et des capacités numériques disponibles. En hydrologie opérationnelle, une fois le modèle calé et validé en fonction des observations, la représentation des processus ou de la géométrie pourra évoluer et être affinée en fonction des nouvelles données disponibles (Hingray et coll., 2009).

2.1.1 Représentation des processus hydrologique

La pratique dans le domaine suppose que les processus hydrologiques à l'intérieur du modèle soient représentés selon des approches empiriques, conceptuelles ou à bases physiques (Hingray et coll., 2009).

Les modèles empiriques, comme le modèle SCS-CN développé par le *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) du *United States Department of Agriculture* (USDA), et les modèles statistiques autorégressifs, tels qu'introduits par Box et Jenkins (1970) par exemple, permettent d'établir une prévision du débit à partir des données observées sur le terrain. Ces modèles ne visent généralement pas à décrire de façon explicite le fonctionnement des processus hydriques à l'intérieur d'un système, mais plutôt à simuler une variable de sortie (comme les débits).

Les modèles conceptuels visent à évaluer ces processus en se basant sur la perception que l'hydrologue a des comportements hydrologiques sur le système (Hingray et coll., 2009). Bien que plusieurs soient surparamétrés, les approches conceptuelles visent généralement à représenter les processus physiques en action tout en limitant le nombre de paramètres à

considérer dans le modèle. La plupart des modèles conceptuels, comme les modèles GR4J (Perrin et coll., 2003), HEC-HMS (USACE, 1956) ou CEQUEAU (Girard et coll., 1972), représentent les processus hydrologiques à partir d'une combinaison de réservoirs possédant diverses lois de vidange. D'autres, comme le modèle TOPMODEL (Beven et coll., 1984) basé sur le concept de « zones contributives variables » et du déficit de saturation du sol, utilisent des représentations conceptuelles plus élaborées.

Les modèles à bases physiques, pour leur part, tentent de représenter les processus physiques à l'intérieur du système hydrique le plus fidèlement possible. Ces modèles nécessitent une discrétisation spatiale fine du milieu, un ensemble de paramètres spatialisés et la résolution d'équations fondamentales souvent coûteuses en temps de calcul. Le Système Hydrologique Européen, SHE (Abbott et coll., 1986a,b), est reconnu comme étant l'un des plus connus et utilisés à ce titre.

2.1.2 Représentation des propriétés du milieu

La manière de représenter les propriétés du milieu et la nature de l'unité spatiale sur laquelle sont résolues les équations pour décrire les processus hydrologiques peuvent varier d'un modèle à un autre. Hingray et coll. (2009) évoquent quatre grandes catégories de classification à cet égard : les modèles globaux, les modèles spatialisés, les modèles semi-spatialisés et les modèles distribués.

Les modèles hydrologiques globaux résument l'ensemble des propriétés hydrologiques du milieu sur une seule et même unité spatiale. Ces modèles ne visent donc pas à décrire et représenter la variabilité spatiale des propriétés du milieu comme l'occupation du sol, la capacité d'infiltration et le relief par exemple. Le modèle conceptuel GR4J développé par Perrin et coll. (2003) et la plupart des modèles autorégressifs entrent dans cette catégorie.

À l'opposé, les modèles spatialisés, comme le modèle à bases physiques SHE (Abbott et coll., 1986a,b), visent à représenter le milieu en considérant une discrétisation fine de l'ensemble des propriétés sur le bassin versant considéré. Chaque élément de la discrétisation de l'espace possède donc ses propres paramètres. L'utilisation d'un modèle numérique d'altitude (MNA) décrivant la topographie du milieu sert généralement d'information de base pour discrétiser les propriétés incorporées au modèle. Plusieurs modèles spatialisés sont combinés à un logiciel à

interface de SIG (système d'information géographique) permettant l'attribution et la visualisation des propriétés et variables d'états dans l'espace.

Les modèles semi-spatialisés, pour leur part, visent à considérer une certaine variabilité des propriétés du milieu de manière simplifiée en délimitant des unités hydrologiques dont le comportement peut être décrit par un modèle hydrologique propre (Hingray et coll., 2009). La plupart des modèles de ce type considèrent que les unités hydrologiques fonctionnent de façon indépendante et peuvent se vider vers ou échanger des flux avec les autres unités adjacentes. L'utilisation d'unités hydrologiques relativement homogènes (UHRHs), zones sur lesquelles les propriétés hydrologiques (capacité d'infiltration, coefficient de ruissellement, etc.) sont comparables, est l'une des approches souvent considérées pour ce type de modèles, comme le fait le modèle Hydrotel (Fortin et coll., 2001). D'autres modèles, comme HEC-HMS (*U.S. Army Corps of Engineers*, USACE), permettent de séparer les unités hydrologiques en considérant des sous-bassins complets. Le découpage de tels sous-bassins est alors intimement lié à la position des stations de mesures disponibles pour caler et valider le modèle hydrologique. L'identification de points de contrôle, comme les ouvrages hydrauliques en milieu urbain, peut aussi grandement influencer la délimitation des sous-bassins. Certains modèles, comme le modèle SWAT (United States Geological Survey, USGS), combinent aussi les deux types de discrétisation du milieu.

Les modèles distribués permettent finalement de décrire le comportement du bassin versant en considérant un nombre restreint d'unités hydrologiques différentes. Gurtz et coll. (1999) utilisent la terminologie « unités hydrologiques représentatives » (ou UHRs) pour décrire ce type de discrétisation spatiale. La réponse hydrologique globale du système est alors obtenue en effectuant une somme pondérée des réponses hydrologiques de chaque UHRs et la pondération est généralement proportionnelle à la superficie de chaque unité. Élaborée pour limiter le nombre de calculs à effectuer, cette méthode de découpage du territoire est entre autres utilisée pour les modèles HBV (Bergström, 1976) et TOPMODEL (Beven et coll., 1984).

2.2 Modèle hydrologique CEQUEAU

Dans le cadre du présent projet de recherche, le modèle hydrologique CEQUEAU est utilisé afin d'élaborer les prévisions d'ensemble et de calculer les propriétés et variables d'états du système hydrique de la rivière Nechako.

Le modèle CEQUEAU est considéré comme étant un modèle déterministe spatialisé à bilan, développé pour simuler la quantité et la qualité de l'eau dans un cours d'eau alimenté par un bassin versant. Le modèle découpe le bassin versant en carreaux à propriétés hydrologiques similaires (carreaux entiers), eux-mêmes subdivisés par des lignes de partage des eaux (carreaux partiels). La Figure 2 illustre un exemple d'identification des carreaux entiers et partiels dans le modèle. Sur chaque carreau entier, une fonction de production calcule, à chaque pas de temps, l'écoulement vertical de l'eau qui tient compte de différents phénomènes comme la pluie, la fonte de la neige, l'évapotranspiration, l'infiltration et le jeu des réserves superficielles et profondes. À partir des volumes calculés par la fonction de production, une fonction de transfert qui tient compte de l'influence des lacs, des marécages et des ouvrages de divers types, modélise l'écoulement dans le réseau de drainage sur les carreaux partiels (Morin et Paquet, 2007).

Contrairement à d'autres modèles spatialisés du même genre, le modèle CEQUEAU permet aussi d'étudier l'évolution des aires de contribution ainsi que celles des réservoirs futurs à planifier. Le modèle a par ailleurs été appliqué à plusieurs bassins versants variant de 1 à 100 000 km² au Québec, dans d'autres provinces canadiennes et ailleurs en Amériques du Nord et du Sud, en Europe et en Afrique (Singh et Frevert, 2002). Le modèle CEQUEAU jouit donc de plusieurs projets de références.

Les sections suivantes décrivent en détail le fonctionnement de chacune des fonctions de base du modèle CEQUEAU.

2.2.1 Principes de base du modèle

Le modèle CEQUEAU conceptualise les quantités d'eau emmagasinées sur chaque subdivision principale du bassin versant (les « carreaux entiers ») en les considérant comme une combinaison de trois différents réservoirs (les étendues d'eau à aire ouverte, la couche de sol de surface non saturée et la couche de sol profonde saturée). La fonction de production permet alors

de calculer le volume d'apport en eau produit sur chaque carreau entier par la vidange de chacun des réservoirs. Les subdivisions des carreaux entiers en « carreaux partiels » définissent la ligne de partage des eaux et tracent le parcours de l'eau lors du calcul de transfert des volumes d'eau d'un carreau à l'autre.

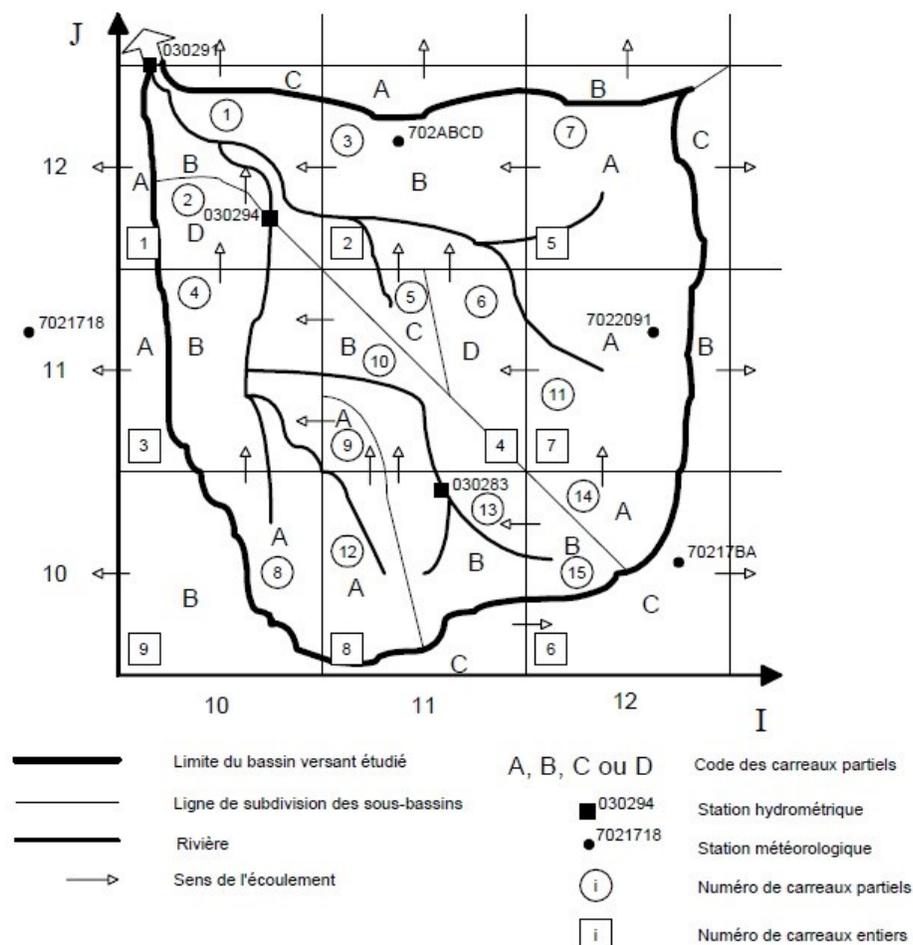


Figure 2 - Schématisation des carreaux entiers et partiels du modèle CEQUEAU

Les calculs du modèle s'effectuent sur des pas de temps journaliers, horaires ou de quelques heures. À chaque pas de temps, les données nécessaires aux calculs sont les suivantes :

- la température minimale de l'air;
- la température maximale de l'air; et
- les précipitations liquides et solides (facultatives).

Le modèle CEQUEAU calcule une température moyenne à partir des valeurs maximales et minimales à chaque pas de temps. À partir des séries temporelles de températures et de précipitations aux stations, deux options sont possibles pour interpoler les données hydrométéorologiques sur chaque carreau entier :

- par polygones de Thiessen; et
- par pondération en fonction des trois stations météorologiques les plus proches (le facteur de pondération dépend des distances entre le carreau entier et les stations).

Une pondération en fonction de l'altitude et de la précipitation moyenne peut aussi être appliquée aux données météorologiques.

2.2.2 Description de la fonction de production

La fonction de production sert à calculer le volume d'eau « produit » par un carreau entier pendant le pas de temps considéré. En considérant les données météorologiques, la fonction de production évalue d'abord l'accumulation et l'évolution du manteau neigeux sur le carreau entier. La fonction calcule ensuite la lame d'eau disponible en surface en faisant un bilan d'évaporation (sur les lacs et marécages) et d'évapotranspiration. En fonction des superficies de chaque type de terrain sur le carreau entier, la lame d'eau est convertie en volume d'eau disponible au sol ainsi que sur les lacs et les marécages de ce dernier. Des bilans hydriques sur les zones de sol non saturées et saturées ainsi que dans les lacs et marécages sont ensuite effectués afin de calculer la lame d'eau produite par le carreau entier et disponible pour la fonction de transfert.

La Figure 3 illustre le fonctionnement général des différents réservoirs considérés dans la fonction de production du modèle CEQUEAU. Les paragraphes suivants décrivent plus en détails comment ces différents processus sont conceptualisés dans le modèle.

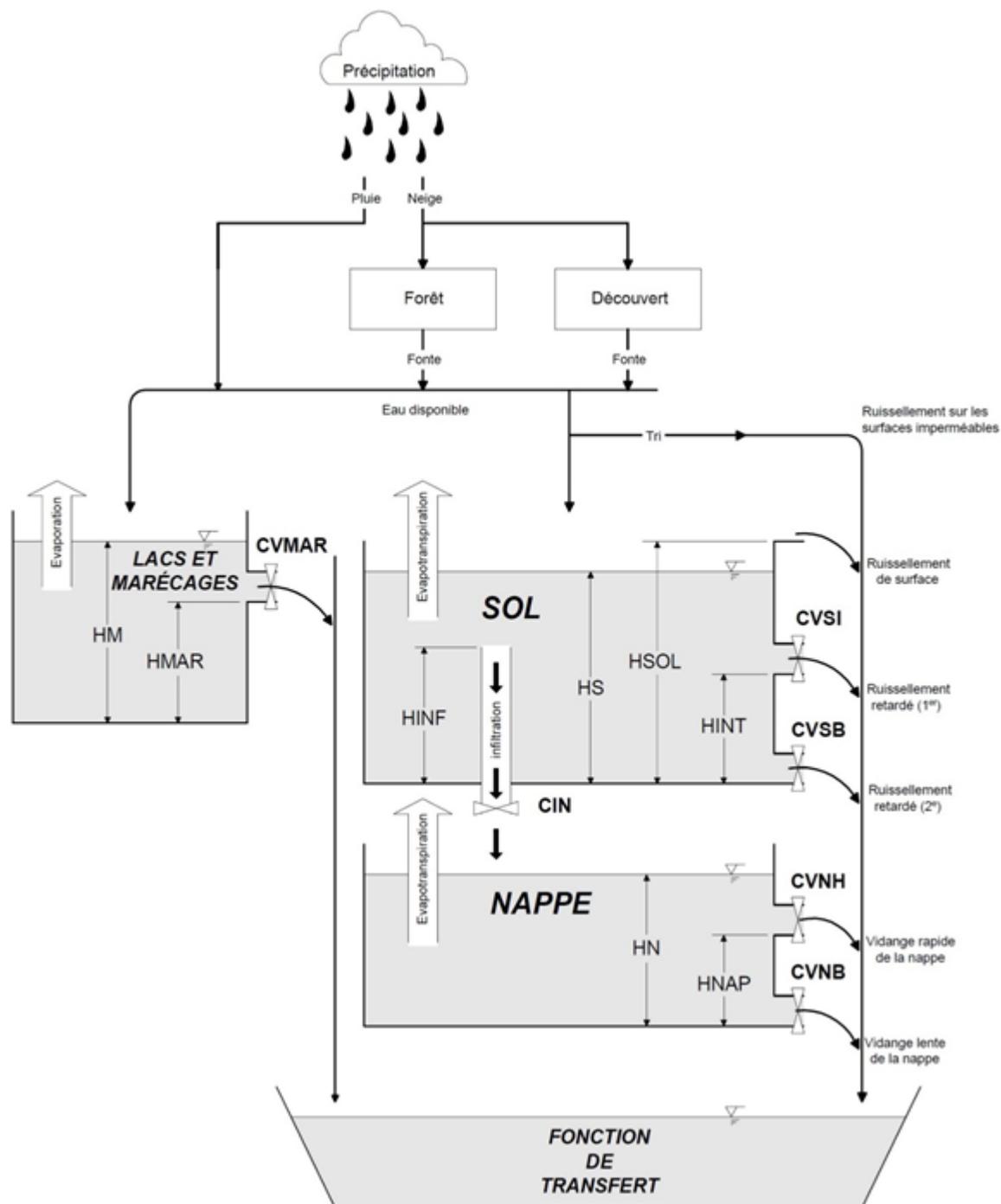


Figure 3 - Schématisation de la fonction de production du modèle CEQUEAU

Accumulation et fonte du manteau neigeux

Le modèle d'accumulation et de fonte de la neige incorporé au modèle CEQUEAU est basé sur les principes du rapport *Snow hydrology; summary report of the snow investigations* du *Corps of Engineering* de l'armée américaine (USACE, 1965).

Un seuil de transformation pluie-neige sert à départager les précipitations solides et liquides, selon la température moyenne du jour considéré. L'accumulation et la fonte sont considérées de façon séparée sur les zones forestières et sur les terrains découverts. Les accumulations se calculent en additionnant l'équivalent en eau de la neige du pas de temps précédant aux précipitations solides du jour considéré et en soustrayant la lame d'eau de fonte réelle.

Une lame d'eau de fonte « potentielle » est d'abord calculée en fonction du taux de fonte, d'un seuil de température de fonte et d'un facteur de modulation qui tient compte du rayonnement solaire potentiel en fonction du jour de l'année et de la latitude moyenne du bassin versant. Des taux de fonte et des seuils de température de fonte différents doivent être attribués pour les zones forestières et les zones découvertes.

La lame d'eau de fonte réelle disponible sur le carreau entier consiste en une valeur pondérée ou égale à la lame d'eau de fonte potentielle. Le facteur de pondération de la fonte potentielle consiste en un rapport entre l'équivalent en eau de la neige et un indice de mûrissement du stock de neige multiplié par le taux de fonte (forêt ou découvert). L'indice de mûrissement de la neige est un indice de type degré-jour qui additionne la différence (lorsque positive) entre la température moyenne de l'air du jour et un seuil de température de mûrissement de la neige fixé à l'aide d'un paramètre spécifique.

L'absorption de précipitation liquide par le manteau neigeux se calcule pour sa part en considérant un indice de température moyenne du stock de neige. Cet indice se calcule en additionnant la température du jour à la température du stock de neige du pas de temps précédent, pondéré par un coefficient de déficit calorifique fixé par un paramètre spécifique. Si la température du stock de neige n'a pas atteint les seuils de température de fonte en forêt ou en zone découverte, la précipitation liquide peut être absorbée. Les quantités d'eau qui peuvent être absorbées sont calculées en fonction de l'indice de température moyenne du stock de neige.

Les précipitations liquides excédentaires qui ne peuvent pas être absorbées deviennent disponibles au sol et s'additionnent aux lames d'eau de fonte réelles disponibles en zones forestières et découvertes. La lame d'eau disponible au sol est calculée en multipliant ces dernières valeurs par la proportion de chacun des types de terrain (forêt ou découvert) sur le carreau entier et est introduite dans les réservoirs de sol non saturé (SOL) et des étendues à aire ouverte (LACS et MARÉCAGES).

Évaporation et évapotranspiration

La méthode de calcul utilisée dans CEQUEAU pour évaluer l'évaporation et l'évapotranspiration est basée sur la méthode de Thornthwaite (1948) modifiée pour tenir compte de la durée potentielle d'ensoleillement (fonction de la latitude et du jour de l'année) et pour tenir compte de l'eau disponible dans les couches superficielles du sol.

La formule de Thornthwaite permet d'évaluer l'évapotranspiration potentielle moyenne sur une base mensuelle. Le calcul des valeurs mensuelles s'effectue à partir de la température moyenne mensuelle, du nombre d'heures d'ensoleillement moyen mensuel et d'un indice de température (qui dépend des moyennes de températures pour les douze mois de l'année).

L'évapotranspiration potentielle mensuelle calculée avec la méthode de Thornthwaite est modifiée dans CEQUEAU afin de tenir compte du rayonnement solaire potentiel. Le coefficient de pondération, qui varie de manière sinusoïdale en fonction du jour de l'année, tient compte de la latitude moyenne du bassin. Au-dessus des surfaces d'eau libre (lacs et marécages), l'évapotranspiration réelle est estimée à une valeur égale à 80 % de la valeur potentielle.

Au-dessus de la partie terrestre, l'évapotranspiration potentielle est d'abord multipliée par un facteur qui varie en fonction de la superficie boisée sur le carreau entier. L'évapotranspiration réelle est ensuite calculée en fonction de la hauteur de l'eau dans le réservoir représentant le sol non saturé (SOL). Au-dessus d'un certain seuil dans le réservoir, l'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle. En dessous de ce seuil, l'évapotranspiration réelle varie de façon linéaire jusqu'à une valeur de zéro lorsque la réserve est vide. Le modèle CEQUEAU permet aussi de puiser une partie de l'évapotranspiration à même la couche de sol saturé (réservoir NAPPE).

Bilan de la zone non saturée

Sur chaque carreau entier, le bilan des écoulements verticaux dans la zone non saturée du sol est représenté de façon schématique par un réservoir (SOL) muni de multiples seuils et orifices afin de représenter les différents ruissellements retardés dans le temps.

Lorsque la lame d'eau disponible en surface dépasse un certain seuil, un tri est effectué et le ruissellement sur les surfaces imperméables contribue directement à la production du carreau entier. Le ruissellement sur les surfaces imperméables se calcule en multipliant la lame d'eau excédentaire par le pourcentage de surface du sol imperméable du carreau entier. La partie non utilisée de la lame d'eau pour le ruissellement sur les surfaces imperméables est ajoutée au contenu (HS) du réservoir représentant le sol non saturé (réservoir SOL).

Lorsque la hauteur d'eau dans le réservoir (HS) dépasse le seuil d'infiltration (HINF), la lame d'eau qui s'infiltré du sol non saturé (SOL) vers la zone saturée (NAPPE) est égale à la hauteur excédentaire multipliée par un coefficient d'infiltration propre au carreau entier (CIN).

Après avoir considéré l'infiltration et l'évapotranspiration, si la hauteur d'eau dans le réservoir (HS) dépasse toujours la hauteur maximale du réservoir (HSOL), la lame d'eau excédentaire est évacuée du réservoir et représentée par le ruissellement de surface.

D'une façon similaire à celle du calcul de l'infiltration, le premier ruissellement retardé est calculé en multipliant la hauteur d'eau excédentaire par rapport à un seuil de vidange intermédiaire (HINT) et le coefficient de vidange intermédiaire (CVSI) du réservoir. Le deuxième ruissellement retardé est quant à lui calculé en multipliant le niveau d'eau disponible restant dans le réservoir (HS) par le coefficient de vidange basse du réservoir (CVSB).

Les lames d'eau produites par les différents ruissellements (sur les surfaces imperméables, de surface, retardé 1er et 2e) sont ensuite multipliées par le pourcentage de la partie terrestre sur le carreau entier et transférées vers la fonction de production.

Bilan de la zone saturée

Le bilan du réservoir de la zone saturée (réservoir NAPPE) tente de reproduire l'écoulement de base. Les paramètres y étant associés peuvent être estimés, par exemple, en fonction des débits observés lors des tarissements d'hiver.

Les vidanges rapide et lente de la zone saturée (réservoir NAPPE) sont calculées d'une façon similaire à celles du ruissellement issu de la zone non saturée (réservoir SOL). La lame d'eau excédentaire du niveau d'eau dans le réservoir (HN) par rapport à la hauteur du seuil de vidange haute du réservoir (HNAP) est multipliée par le coefficient de vidange haute (CVNH) afin d'évaluer la lame d'eau issue de la vidange rapide de la nappe. Similairement, la hauteur d'eau restante (HN) est multipliée par le coefficient de vidange basse (CVNB) afin de calculer l'écoulement issu de la vidange lente de la nappe.

La hauteur d'eau disponible dans le réservoir (HN) est ensuite mise à jour en considérant la lame d'eau provenant de l'infiltration depuis la zone non saturée (réservoir SOL) et l'évapotranspiration soutirée de la zone saturée (réservoir NAPPE).

La lame d'eau produite par les vidanges de la nappe (rapide et lente) est finalement multipliée par le pourcentage de la partie terrestre sur le carreau entier et transférée vers la fonction de production.

Bilan des zones en eau libre

Le bilan du réservoir LACS et MARÉCAGES tente de reproduire de façon simplifiée les processus associés aux parties en eau libre, comme les lacs, le réseau hydrographique et les marais.

Le niveau de l'eau (HM) dans le réservoir des zones en eau libre est d'abord mis à jour en y ajoutant la lame d'eau disponible qui provient de la pluie et de la fonte de la neige et en y soustrayant l'évaporation réelle calculée sur les plans d'eau. L'écoulement produit par les zones en eau libre (réservoir LACS et MARÉCAGES) est ensuite calculé en multipliant la lame d'eau excédentaire au-dessus du seuil de vidange du réservoir (HMAR) par le coefficient de vidange (CVMAR) propre à ce réservoir.

2.2.3 Description de la fonction de transfert

La lame d'eau produite par un carreau entier devient disponible pour calculer le transfert d'un carreau partiel à l'autre. Le volume d'eau disponible sur un carreau partiel spécifique se calcule en considérant le volume restant du carreau partiel au pas de temps précédant et en lui ajoutant les volumes transférés des carreaux partiels en amont ainsi que la lame d'eau produite au pas de temps actuel par son carreau entier multipliée par la superficie du carreau partiel (voir Figure 4).

L'écoulement d'un carreau partiel à l'autre dépend du volume dans le réservoir du carreau partiel et d'un coefficient de transfert associé à la capacité d'amortissement spécifique du cours d'eau principal sur ce carreau partiel. Le coefficient de transfert dépend d'un paramètre propre à chaque carreau partiel, de la superficie des carreaux partiels en amont ainsi que celle de leurs plans d'eau, de la superficie propre au carreau partiel et de la proportion de ses plans d'eau.

Les calculs de transfert sont effectués de l'aval vers l'amont (Morin et Paquet, 2007). Le transfert est calculé sur un nombre de carreaux partiels en aval qui est égal au nombre de carreaux partiels se trouvant sur le parcours le plus long du bassin en entier divisé par le temps de concentration du bassin en entier. Lorsque le nombre de transferts est supérieur à 1, les coefficients de transfert sont ajustés avec une équation spécifique.

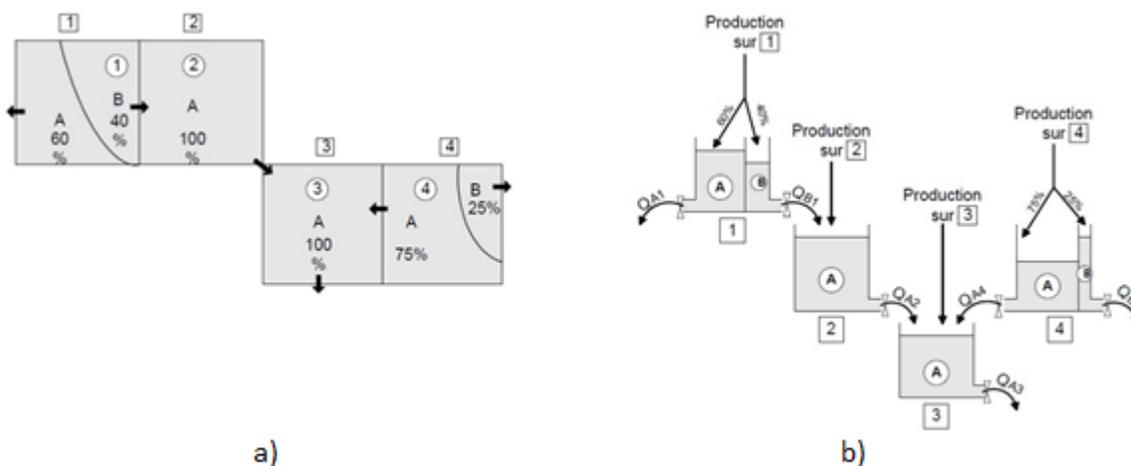


Figure 4 - Schématisation de la fonction de transfert du modèle CEQUEAU

Le modèle permet de reproduire le comportement de grands lacs qui chevauchent plusieurs carreaux partiels en calculant le coefficient de transfert des carreaux partiels touchés en considérant sa superficie égale à celle du grand lac complet.

2.3 Prévisions hydrologiques d'ensemble

L'utilisation d'une prévision déterministe (où une seule réalisation possible est considérée) pour une variable hydrologique particulière est souvent insuffisante pour assurer une gestion adéquate sur un système hydrique particulier. Une prévision déterministe peut donner l'illusion de certitude et entraîner des prises de décision inadéquates ou dangereuses (Hingray et coll., 2009). Une connaissance adéquate de l'incertitude de la prévision permet au gestionnaire de considérer le risque associé à la décision qu'il doit prendre. L'incertitude associée aux processus ou à la variable étudiée est principalement liée aux données et aux outils utilisés pour émettre la prévision (l'état initial du système hydrique, l'estimation des prévisions météorologiques, l'imperfection du modèle utilisé, etc.) (Hingray et coll., 2009).

L'estimation de l'incertitude d'une prévision hydrologique peut être évaluée et caractérisée en utilisant des prévisions d'ensemble. Évaluée pour une variable hydrologique d'intérêt (comme la valeur d'apports quotidiens ou le stock de neige sur un bassin versant), cette méthode consiste à considérer la réponse hydrologique d'un système pour différents scénarios de prévisions météorologiques combinés ou non à différents scénarios d'états initiaux. La prévision hydrologique d'ensemble produit ainsi différentes séries temporelles de l'évolution possible de la variable étudiée (Figure 5). La distribution statistique des scénarios peut ensuite être utilisée pour quantifier l'incertitude associée à cette variable (Hingray et coll., 2009).

Plusieurs centres d'étude en hydrologie et en prévision de crue utilisent dorénavant les prévisions d'ensemble de façon opérationnelle et cette approche est souvent considérée comme étant à la fine pointe du développement en prévision hydrologique (Cloke et Pappenberger, 2009). L'ampleur d'un programme comme celui du HEPEX (*Hydrologic Ensemble Prediction Experiment*), qui vise à étudier comment mieux produire, mieux communiquer et mieux utiliser les prévisions hydrologiques d'ensemble (Schaake, 2006), illustre d'ailleurs l'intérêt voué au développement des méthodes de calculs dans ce domaine.

Pour identifier différents scénarios météorologiques sur un horizon à court et moyen terme (quelques jours), la prévision météorologique d'ensemble est classiquement effectuée à l'aide de modèles numériques de l'atmosphère (ou modèles météorologiques). Ces modèles permettent généralement une prévision d'une qualité « raisonnable » jusqu'à un horizon de 2 à 15 jours (Hingray et coll., 2009; Cloke et Pappenberger, 2009). Une erreur importante est cependant fréquemment rencontrée sur certaines variables météorologiques d'intérêt, comme les précipitations qui possèdent une variabilité dans l'espace souvent difficile à représenter. Ces données sont par ailleurs fréquemment entachées d'un biais non négligeable qui doit être corrigé afin de pouvoir les utiliser dans des études quantitatives. Des méthodes d'adaptation statistique (Antolik, 2000; Gangopadhyay et coll., 2004) ou de scénarios analogues (Duband, 1970) peuvent alors être appliquées sur les séries de données avant d'être utilisées à même les modèles hydrologiques.

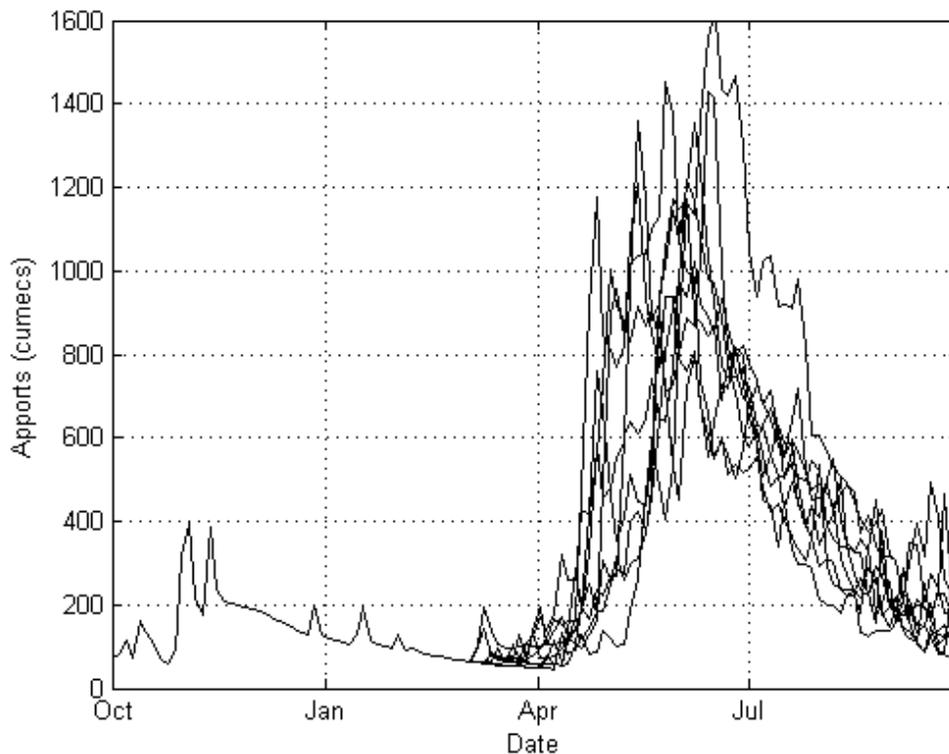


Figure 5 - Exemple de prévision hydrologique d'ensemble

Pour un site choisi, les prévisions météorologiques d'ensemble à long terme (au-delà de la saison en cours) sont souvent évaluées à l'aide de deux méthodes. La première regroupe les générateurs stochastiques de climat qui considèrent les observations des variables météorologiques comme le résultat d'un processus aléatoire. À partir de méthodes de Monte-Carlo par chaînes de Markov (modèles autorégressifs d'ordre 1) différentes réalisations de la variable étudiée (précipitation, température, etc.) peuvent être générées en considérant une description statistique, mais toujours simplifiée, de celle-ci. Les paramètres de ces générateurs de climat sont alors optimisés afin de reproduire le mieux possible les propriétés statistiques de la variable étudiée (Hingray et coll., 2009). La seconde méthode de prévisions météorologiques consiste en un rééchantillonnage des scénarios météorologiques passés.

Les prévisions hydrologiques d'ensemble peuvent aussi être établies en considérant différentes conditions initiales au modèle hydrologique utilisé. À partir des mêmes séquences météorologiques, la modification des conditions initiales du modèle par différentes techniques (modification des variables d'état du modèle, modification des paramètres de calage du modèle, etc.) permet de construire des membres de prévisions qui ajoutent à la description de l'incertitude de la prévision (Hingray et coll., 2009). De même, l'utilisation de différents modèles hydrologiques, qui décrivent différemment les processus hydrologiques impliqués, pour produire les prévisions d'ensemble est une pratique de plus en plus répandue (Fortin et coll., 2006; Seiller et coll., 2012). Dans le cas de combinaisons de différents modèles tout comme dans l'ajustement des conditions initiales, il est important de vérifier la redondance des modèles et les méthodes utilisées afin de décrire de façon adéquate l'incertitude appliquée aux prévisions (Hingray et coll., 2009).

2.4 Programmation dynamique stochastique

2.4.1 Principes de base de la programmation dynamique stochastique

La PD permet d'identifier la « meilleure séquence de décisions » pour passer d'un stade t à un autre jusqu'à la fin de l'horizon de gestion T . Pour identifier les décisions à chaque stade, le bénéfice B_t associé à la décision prise pour passer d'un stade t à un autre ainsi qu'aux stades subséquents doit être calculé. Comme l'illustrent les équations (1a) – (1d), la fonction $f_t(\cdot)$

représentant le bénéfice global de la séquence de décisions du stade t jusqu'à la fin de l'horizon de gestion T dépend donc du bénéfice associé aux décisions à chacun des stades sur cet horizon.

$$f_t(\cdot) = B_t + f_{t+1}(\cdot) \quad (1a)$$

$$f_{t+1}(\cdot) = B_{t+1} + f_{t+2}(\cdot) \quad (1b)$$

(...)

$$f_{T-1}(\cdot) = B_{T-1} + f_T(\cdot) \quad (1c)$$

$$f_T(\cdot) = B_T \quad (1d)$$

Dans le cas simplifié de la gestion d'un réservoir unique, chaque stade t représente une période de temps définie, un pas de temps variant de quelques heures à plusieurs mois, dépendamment du système modélisé. L'état du système à une période t peut être caractérisé par le volume s_t contenu dans celui-ci et la variable décisionnelle peut être caractérisée par le soutirage v_t (voir Figure 6). De plus, à cause des aléas météorologiques, les volumes d'apport naturels q_t pour les périodes futures ne peuvent pas être prévus avec certitude. Cette particularité complexifie l'identification de règles de gestion optimales.

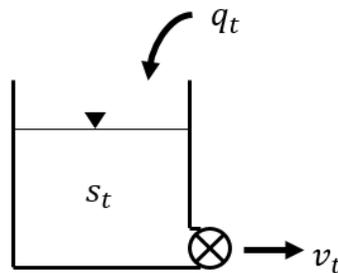


Figure 6 - Représentation schématique d'un réservoir simple

Lorsque les apports sont aléatoires d'une période à l'autre et qu'ils répondent à un processus stochastique, le problème d'optimisation peut être résolu à l'aide de la programmation dynamique stochastique (PDS). La PDS appliquée à la gestion de réservoirs considère de multiples valeurs discrètes de volume d'apport (q_t), de multiples valeurs discrètes de volume

dans la réserve (s_t) ainsi que leurs probabilités d'occurrence à chaque pas de temps t (Loucks et coll., 2005). L'état du système est donc caractérisé par deux variables distinctes, s_t et q_t .

Comme la valeur du volume d'apport à chaque stade q_t est incertaine, la résolution du problème d'optimisation dans son ensemble implique l'utilisation de probabilités. Si le volume d'apport q_t peut prendre jusqu'à I valeurs discrètes différentes lors d'un stade t , alors la probabilité que la variable q_t soit égale à la valeur discrète $q_{t,i}$ (où $i = [1, 2, \dots, I]$) s'exprime de la façon suivante :

$$Pr_{t,i} = Pr(q_t = q_{t,i}) \quad (2)$$

Sachant que, pour un stade t donné :

$$\sum_{i=1}^I Pr_{t,i} = 1 \quad (3)$$

Or, si la valeur du volume d'apport q_t est incertaine à chaque stade, la valeur du bénéfice global maximal ne peut elle non plus être connue avec certitude. La fonction-objectif que l'on cherche à optimiser doit alors s'exprimer en fonction de l'espérance du bénéfice maximal. On cherche ainsi à identifier, à chaque stade, la décision sur le soutirage v_t qui permet d'obtenir la valeur la plus élevée du bénéfice probable. Dans le cas d'un réservoir simple, la fonction-objectif s'exprimera de la façon suivante :

$$Max E \left[\sum_{t=1}^T B_t(s_t, v_t) \right] \quad (4)$$

Pour résoudre ce problème d'optimisation dans son ensemble à l'aide de la PDS, la méthode de résolution récursive détaillée précédemment doit être adaptée afin de répondre à l'utilisation de probabilités. Les sous-problèmes d'optimisation à chaque stade t peuvent alors s'exprimer de la façon suivante :

$$f_t(s_t) = E_{q_t}[g_t(s_t, q_t)] = \sum_{i=1}^I Pr_{t,i} g_{t,i}(s_t, q_{t,i}) \quad (5)$$

où :

$$g_{t,i}(s_t, q_{t,i}) = \max\{B_t(s_t, v_t) + f_{t+1}(s_{t+1})\} \quad (6)$$

De façon générale, la résolution du problème d'optimisation dans son ensemble s'effectue donc en résolvant l'équation récursive suivante :

$$f_t(s_t) = E[\max\{B_t(s_t, v_t) + f_{t+1}(s_{t+1})\}] \quad (7)$$

Les apports suivant le dernier pas de temps de l'horizon de gestion (pour $t > T$) ne sont pas connus avec certitude. Il est donc souvent difficile d'évaluer le volume souhaité dans le réservoir au dernier pas de temps de l'horizon de gestion (s_T). Or, la résolution récursive du problème d'optimisation de PDS nécessite malgré tout la connaissance de la fonction de valeur de l'eau $f_{T+1}(s_{T+1})$ après le dernier stade. Un nombre X d'itérations récursives peut alors être exécuté pour permettre d'identifier des règles de soutirage qui assurent un volume adéquat dans le réservoir pour un horizon $t > T$. Avec cette technique, une première itération est exécutée en utilisant un volume (s_{T+1}) fixé par l'utilisateur en fin d'horizon. Les valeurs de l'eau au premier pas de temps ($f_{t=1}$) obtenues après la résolution de la première itération récursive sont alors appliquées au dernier pas de temps de la seconde itération :

$$f_{T+1}(s_{T+1}) = f_1(s_1) \quad (8)$$

Une fois la seconde itération récursive effectuée, les valeurs de l'eau au premier pas de temps f_1 sont appliqués au dernier pas de temps de la troisième itération et ainsi de suite jusqu'à ce que, après un nombre X d'itérations, la différence entre deux itérations soit inférieure au critère défini par l'utilisateur.

2.4.2 Utilisation d'une variable hydrologique

Pour améliorer le modèle d'apports (en diminuant les incertitudes sur ceux-ci), une information complémentaire permettant de définir l'état du système peut être intégrée au système d'équations. Dans un problème de PDS appliqué à la gestion de barrage, cette seconde variable d'état permet d'émettre une hypothèse sur la distribution de la valeur probable du volume d'apport q au pas de temps subséquent. Comme la valeur du volume d'apport à un pas de temps donné dépend de facteurs à la fois météorologiques et hydrologiques associés au système étudié, l'état du système peut donc être caractérisé à l'aide d'une « variable hydrologique ».

À un pas de temps t donné, la probabilité $Pr_{t,i}$ que le volume d'apport q_t prenne l'une des valeurs discrètes $q_{t,i}$ s'évalue à partir de la valeur de la variable hydrologique h_t au début du pas de temps considéré. À chaque stade t , la variable hydrologique h_t peut prendre jusqu'à J valeurs discrètes différentes. Pour une valeur discrète donnée de la variable hydrologique $h_{t,j}$, on évalue la probabilité conditionnelle que le volume d'apport prenne une valeur discrète $q_{t,i}$ de la façon suivante :

$$Pr_{t,i|j} = Pr(q_t = q_{t,i} | h_t = h_{t,j}) \quad (9)$$

De plus, la transition de h_t à h_{t+1} est généralement stochastique aussi. Dans te tels cas, pour chaque combinaison possible $(q_{t,i}, h_{t,j})$, des probabilités conditionnelles pour la valeur de la variable hydrologique $h_{t+1,k}$ au pas de temps suivant sont évaluées :

$$Pr_{k|q_t, h_t} = Pr(h_{t+1} = h_{t+1,k} | q_t, h_t) \quad (10)$$

Cette relation ne s'applique cependant pas lorsque la transition de h_t vers h_{t+1} est déterministe.

Dans le cas de l'équation 10, notons que, pour chaque combinaison possible de variable hydrologique et de volume d'apport $(h_{t,j}, q_{t,i})$ au stade étudié, les probabilités $Pr_{k|h_t, q_t}$ d'obtenir une valeur discrète particulière de la variable hydrologique h_{t+1} au stade suivant peuvent être différentes. La combinaison des équations 5 et 6 en tenant compte de ces probabilités conditionnelles devient donc :

$$f_t(s_t, h_t) = \sum_{j=1}^J \max \left\{ B_t + \underset{h_{t+1}|h_t, q_t}{E} [f_{t+1}(s_{t+1}, h_{t+1})] \right\} \times \Pr(q_t = q_{j,t}|h_t) \quad (11)$$

De façon générale, lorsque les apports de la période t sont supposés connus, la résolution du problème d'optimisation dans son ensemble s'effectue donc en résolvant l'équation réursive suivante :

$$f_t(s_t, h_t) = \underset{q_t|h_t}{E} \left(\max_{u_t, v_t} \left\{ B_t + \underset{h_{t+1}|h_t, q_t}{E} [f_{t+1}(s_{t+1}, h_{t+1})] \right\} \right) \quad (12)$$

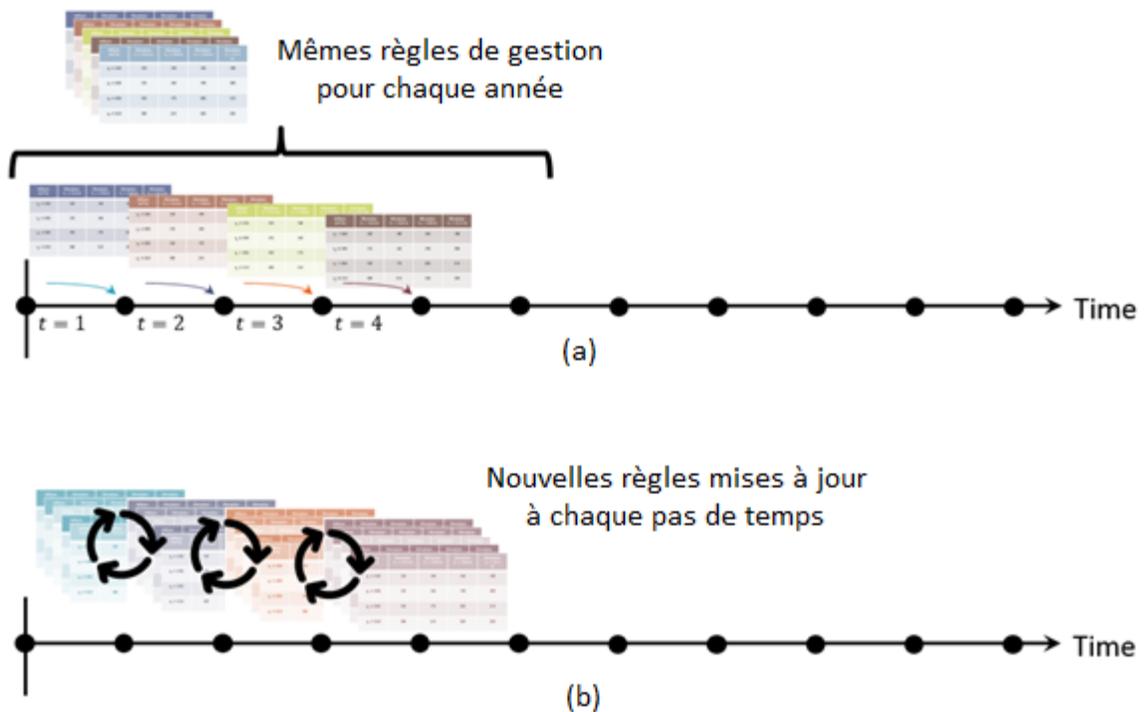
Le soutirage optimal v_t identifié pour chaque combinaison discrète possible $(s_t, h_{t,j}, q_{t,i})$, à chaque pas de temps t , définit la politique de gestion décrite sous forme de tableaux liant les soutirages aux volumes, apports et variables hydrologiques caractérisant le système à résoudre.

2.5 Mise à jour des règles de gestion en mode prévisionnel

Les modèles d'optimisation prévisionnels visent à effectuer, à chaque pas de temps t , la mise à jour des règles de gestion en fonction de probabilités établies à partir de prévisions qui tiennent compte de nouvelles informations qui n'étaient pas disponibles lors d'une optimisation préalable (voir Figure 7). Le mode prévisionnel utilise une procédure dite « en temps réel » – ou « *on-line* » en anglais – qui permet la mise à jour des probabilités à partir de nouvelles informations disponibles à l'extérieur du problème d'optimisation (comme des observations sur le terrain ou les sorties d'un modèle hydrologique par exemple). En conditions réelles, il faut rappeler que dans le cadre de leurs opérations courantes, les gestionnaires de système hydrique utilisant le mode historique ont aussi pour habitude de rafraîchir les règles en fonction des informations connues (conditions hydrologiques, retraits d'équipements, conditions de température influençant la demande, etc.). Cependant, l'intérêt du mode prévisionnel réside dans la possibilité d'utiliser des scénarios de prévision d'apports qui tiennent aussi compte de l'état actuel du bassin versant. En dissociant la caractérisation détaillée du système hydrologique et le problème d'optimisation, la qualité des prévisions hydrologiques peut être améliorée sans augmenter la complexité du problème d'optimisation (Castelletti et coll., 2008b).

Pour se faire, plutôt que d'utiliser des séquences d'apports q_t^{histo} basées sur les scénarios d'apports historiques du passé, le mode prévisionnel utilise des prévisions d'ensemble q_t^{ESP} (où ESP désigne *Ensemble Streamflow Prediction*). Les prévisions d'ensemble fournissent alors des scénarios « mis à jour » qui illustrent les apports possibles jusqu'à la fin de l'horizon de gestion ($t = T$). Afin de tenir compte des conséquences possibles pour l'horizon lointain ($t > T$), l'optimisation des règles mises à jour en mode prévisionnel doit considérer les valeurs de l'eau $f_{t>T}$. Pour se faire, l'une des approches possibles est d'utiliser les valeurs de l'eau optimisées *a priori* en mode historique pour la première période (f_1^{histo}) et de l'appliquer au-delà du dernier pas de temps considéré par l'itération en mode prévisionnel :

$$f_{T+1}^{prév.}(s_{T+1}) = f_1^{histo}(s_1) \quad (13)$$



2.5.1 Performance des modèles prévisionnels en optimisation de réservoir

De façon générale, l'utilisation de règles de gestion établies à l'aide d'un modèle d'optimisation utilisant la PDS en mode prévisionnel a montré une amélioration de la gestion des systèmes hydriques sur lesquels elles ont été appliquées (parmi d'autres études : Martinez et Soares, 2002; Castelletti et coll., 2008a; Pianosi et Soncini-Sessa, 2009; Côté et Leconte, 2015). Les améliorations du mode prévisionnel (en comparaison à son corollaire « classique » utilisant des données historiques) sont variées et touchent, dépendamment des systèmes, aux objectifs de production électrique, de limitation des inondations ou de limitation des coupures d'alimentation en eau pour différents usages. Les améliorations en termes de gestion sont notamment évidentes lors d'événements cycliques sur une base annuelle comme les sécheresses estivales en territoire aride (Martinez et Soares, 2002) ou les crues printanières en territoires nordiques ou subalpins (Pianosi et Soncini-Sessa, 2009). Cependant, Castelletti et coll. (2008a) et Pianosi et Soncini-Sessa (2009) ont démontré que les améliorations pouvaient être encore plus marquées lorsque l'événement extrême survenait à une période plus inattendue dans l'année.

Parallèlement, l'utilisation d'une approche prévisionnelle utilisant la PDS par scénarios (PDSS) sur des applications multiobjectifs a démontré des améliorations similaires en termes de respects de niveaux cibles en fin d'année (Kim et coll., 2007) et de production (Kim et coll., 2007; Côté et Leconte, 2015). Plus récemment, d'autres approches « par scénarios », comme les modèles de contrôle prévisionnel par arbres à scénarios (TB-MPC, pour *Tree-Based Model Predictive Control*) ont démontré une amélioration marquée des performances des règles de gestion, notamment par l'amélioration de la production en comparaison aux autres méthodes prévisionnelles testées dans chacune des études (Raso et coll., 2014; Côté et Leconte, 2015).

Dans leur étude comparative, Côté et Leconte (2015) ont de plus évalué la performance de trois types de modèles prévisionnels (PDS, PDSS et « arbre à scénarios ») en les appliquant sur un même système hydrique. Lorsque comparés à une approche déterministe, les trois modèles stochastiques ont permis d'obtenir de meilleurs résultats en termes de production. Les méthodes utilisant des scénarios (PDSS et « arbre à scénarios ») ont montré de façon générale de meilleures performances que le modèle PDS. Cependant, ce dernier s'est montré moins

vulnérable à un manque de dispersion (*underdispersion*) dans les scénarios d'ensemble utilisés pour mettre à jour les règles de gestion.

2.5.2 Prévisions hydrologiques d'ensemble en mode prévisionnel

En tenant compte des conditions hydrologiques « actuelles » du système hydrique, les prévisions d'ensemble permettent d'établir des probabilités qui réduisent les incertitudes associées aux apports à venir. L'utilisation de l'étendue des incertitudes établies à partir de prévisions d'ensemble permet d'optimiser des règles de gestion qui prennent mieux en compte les risques spécifiques inhérents aux périodes à venir. Cependant, Pianosi et Soncini-Sessa (2009) ont démontré que l'utilisation d'une prévision parfaite à même l'algorithme d'optimisation n'améliore pas nécessairement l'optimalité de la solution pendant une crue importante lorsque celle-ci survient après une séquence d'apports faibles. De même, Zhao et coll. (2011) ont démontré que l'efficacité des règles de gestion établies en mode prévisionnel diminuait lorsque l'incertitude des prévisions utilisées était grande. Leurs conclusions démontraient aussi que, parce que le risque d'événements extrêmes est plus important, les prévisions d'ensemble sont plus utiles lors des périodes où la variabilité des apports est importante. La pertinence des prévisions d'ensemble réside donc dans leur capacité à produire une incertitude (utile pour considérer la présence de risque), tout en s'assurant que celle-ci soit plus « conséquente » avec les risques inhérents à l'état actuel du système hydrique.

Pour conclure quant à l'influence des prévisions d'ensemble sur l'optimisation des règles de gestion, Zhao et coll. (2011) ont démontré, par une analyse sur un système hydrique virtuel modifiable d'une simulation à une autre (nombre et capacité des réservoirs interchangeables), que les réservoirs possédant une petite capacité de stockage en comparaison aux volumes d'apports annuels sont plus vulnérables aux erreurs sur les prévisions, faisant d'eux de meilleurs candidats pour l'utilisation d'une distribution sur l'incertitude des prévisions d'apports.

Le type de prévisions d'ensemble utilisé influence la qualité des règles (Zhao et coll., 2011) et plusieurs méthodes différentes ont été utilisées à travers la recherche dans le domaine. Une approche couramment utilisée, de par sa facilité de mise en œuvre à partir de séquences historiques d'apports, consiste en l'élaboration de prévisions construites à partir d'un modèle statistique de type ARMA (parmi ceux-ci : Pianosi et Soncini-Sessa, 2009; Prasad et al., 2013).

D'autres modèles empiriques peuvent aussi être utilisés. À partir des relations adaptatives identifiées à l'aide d'un réseau de neurones entre les observations de différentes variables d'état et des valeurs d'apports au réservoir, Zambelli et coll. (2012) ont, par exemple, développé un modèle prévisionnel d'optimisation efficace pour améliorer l'allocation hydroélectrique de différents systèmes hydriques à un réservoir.

L'utilisation de la modélisation hydrologique pour établir les prévisions d'ensemble est aussi une méthode prometteuse pour les applications en mode prévisionnel (Pianosi et Ravazzani, 2010). La capacité de ces modèles à décrire de façon détaillée l'état du système hydrique tout en tenant compte d'une grande variété de processus hydrologiques peut permettre d'établir des prévisions d'ensemble qui diminuent l'incertitude sur les périodes à venir. Récemment, ce type de prévisions s'est avéré particulièrement efficace sur des applications utilisant des modèles prévisionnels « à scénarios » (Goedbloed et coll., 2011; Raso et coll., 2014; Côté et Leconte, 2015).

2.5.3 Influence de l'horizon de prévision

L'horizon de prévision T utilisé à même le problème d'optimisation est variable d'un système à l'autre, car les objectifs et les facteurs influents sur l'optimalité des solutions varient d'un problème à un autre. Certains auteurs ont cependant retracé quelques tendances qui peuvent être pertinentes à étudier.

Braga et Barbosa (2001) ont démontré, à partir d'un modèle d'optimisation prévisionnel sur un système à plusieurs réservoirs, que l'augmentation des facteurs de pénalisation sur les objectifs à plus long terme (comme la conservation d'un niveau bas dans le réservoir pour prévenir des risques d'inondations au déversoir dans les périodes au-delà de l'horizon de gestion) rendait les règles de gestion moins sensibles à l'horizon de prévision. Ces conclusions ont d'ailleurs été renforcées plus récemment par Zhao et coll. (2012) à partir des résultats issus d'un banc d'essai d'optimisation prévisionnelle appliqué à un système hydrique virtuel à un réservoir utilisant des prévisions variant entre 5 et 50 jours. Leur étude visait à comparer l'influence de deux facteurs (l'horizon des prévisions et l'incertitude des prévisions) sur la qualité des règles de gestion mises à jour. Leurs conclusions mentionnent qu'en utilisant des horizons de prévision à court terme,

le facteur le plus dominant était l'horizon de prévision, alors qu'en utilisant des horizons de prévision à long terme, le facteur dominant était plutôt l'incertitude associée aux prévisions.

Par ailleurs, certains auteurs ont utilisé des modèles prévisionnels qui combinaient un algorithme voué à l'optimisation des objectifs à court terme avec un autre algorithme optimisant les objectifs à long terme. À titre d'exemple, la combinaison d'un modèle journalier d'optimisation déterministe combiné à un modèle mensuel d'optimisation stochastique a permis à Celeste et coll. (2008) d'obtenir des règles de gestion similaires à celle utilisant une prévision parfaite des apports futurs sur un système multiobjectif à un réservoir. Zambelli et coll. (2012) ont, quant à eux, utilisé un modèle prévisionnel d'optimisation utilisant un horizon de prévision hybride combinant des prévisions mensuelles et des prévisions annuelles, leur permettant d'établir des règles de gestion efficaces pour la gestion à long terme de la production hydroélectrique. L'utilisation du modèle « annuel » permettait d'obtenir de meilleurs résultats que le modèle « mensuel » en production et en gestion des inondations. Sur les quatre systèmes simulés, le modèle hybride a permis d'obtenir des résultats similaires ou supérieurs au modèle « annuel ».

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer la performance des règles de gestion du réservoir Nechako lorsque celles-ci sont mises à jour avant chaque décision à l'aide d'un l'outil de PDS et de prévisions d'ensemble construites à l'aide de la modélisation hydrologique. Pour atteindre cet objectif, Rio Tinto a rendu disponibles différents outils de modélisation. Ces outils incluent le modèle hydrologique du sous-bassin Nechako et l'algorithme d'optimisation PDS en mode historique et en mode prévisionnel. Le modèle hydrologique qui a été utilisé est CEQUEAU, dont une description est présentée à la section 2.2. La théorie de l'algorithme d'optimisation développé et fourni par Rio Tinto est introduite à la section 2.4. À partir de ces modèles, un banc d'essai a été développé dans le cadre de cette recherche afin de simuler, dans un environnement virtuel, la gestion du système hydrique de la rivière Nechako et d'optimiser les règles en mode prévisionnel à l'aide de prévisions hydrologiques d'ensemble.

Les sections qui suivent présentent les éléments méthodologiques qui ont servi pour :

- 1- modéliser des apports hydriques nécessaires pour construire les prévisions d'ensemble et pour simuler le comportement du bassin versant;
- 2- déterminer les différentes variables hydrologiques employées dans l'optimisation du système hydrique;
- 3- établir les probabilités conditionnelles requises par la PDS (équations 9 et 10);
- 4- mettre en œuvre l'optimisation des règles de gestion en mode historique;
- 5- calibrer l'équation décrivant les pénalités qui sont incluses dans la fonction de bénéfice à maximiser; et mettre en œuvre le banc d'essai prévisionnel.

3.1 Modélisation des apports

Les simulations effectuées en mode historique et en mode prévisionnel utilisent une simulation virtuelle des apports sur le bassin versant. Le modèle hydrologique CEQUEAU a été utilisé pour simuler le comportement du sous-bassin Nechako. Des « coefficients de bassin », variables à chaque période de l'année et établissant une relation entre les débits observés sur le sous-bassin Nechako et les débits observés sur les sous-bassins Cheslatta et Nautley, ont été utilisés pour simuler les apports sur ces deux derniers sous-bassins. Les sous-sections qui suivent détaillent les méthodes utilisées.

Les simulations utilisées pour l'analyse comparative des règles de gestion se font sur la base du comportement « simulé » du bassin versant. Les apports observés sur le bassin versant ne sont utilisés que pour valider le calage du modèle hydrologique du sous-bassin Nechako et établir les coefficients pour simuler les apports sur les deux autres sous-bassins. Bien que les erreurs de modélisation ne soient pas étudiées de façon détaillée dans le cadre de ce projet, une analyse sommaire de celles-ci est présentée lors de l'analyse des résultats présentée au chapitre 5.

3.1.1 Apports sur le sous-bassin Nechako

Les séquences d'apports du sous-bassin Nechako utilisées pour les simulations en mode historique et en banc d'essai prévisionnel sont simulées à l'aide du modèle hydrologique CEQUEAU. Les données météorologiques (températures et précipitations) utilisées pour construire les séquences d'apports réalisés et les scénarios d'ensemble sont issues des observations faites à partir des stations météorologiques de Rio Tinto. La caractérisation et le calage du modèle hydrologique du sous-bassin Nechako ont aussi été effectués par Rio Tinto, qui utilise le modèle dans la gestion courante du système hydrique. Les vecteurs d'apports « historiques » et des prévisions d'ensemble utilisés pour alimenter le modèle d'optimisation ont, quant à eux, été élaborés de façon spécifique pour ce projet de recherche.

Données hydrométéorologiques disponibles

Pour être en mesure d'évaluer le comportement hydrologique sur l'ensemble du sous-bassin, le modèle CEQUEAU a besoin de séries temporelles de précipitation et de température.

L'entreprise Rio Tinto possède des observations du sous-bassin Nechako obtenues à partir du réseau de stations de mesures suivant (voir la Figure 1 pour leur localisation sur le sous-bassin) :

- 7 stations météorologiques (données journalières de précipitations et de températures maximum et minimum de 1957 à 2012);
- 3 stations de mesure de l'équivalent en eau de la neige (données journalières établies à partir de coussins à neige de 1984 à 2012);
- 2 stations de mesure de débits et/ou de niveaux (données journalières de 1957 à 2012).

Les mesures de températures et de précipitations journalières ont été utilisées pour établir les conditions météorologiques sur les carreaux entiers du modèle CEQUEAU où se trouvent les

stations. Les données ont ensuite été interpolées sur l'ensemble du sous-bassin à l'aide de la méthode de pondération à partir des trois stations les plus proches et de corrections en fonction de l'altitude.

Les mesures d'équivalent en eau de la neige ont été utilisées pour valider le calage des paramètres du modèle d'accumulation et de fonte de la neige. Les trois stations de mesure de neige (Tahtsa Lake, Mount Pondsosy et Mount Wells, voir la Figure 1) sont localisées sur la portion ouest du sous-bassin, en terrain montagneux. Cependant, il n'existe pas d'observations de coussins à neige sur la portion est du sous-bassin, qui est de plus basse altitude et possède des écarts de dénivellation de moindre envergure. Les simulations de l'équivalent en eau de la neige à l'aide du modèle peuvent donc être validées seulement pour le secteur montagneux.

Les apports au réservoir Nechako ont été reconstitués par bilan hydrique à l'aide des niveaux du réservoir et des débits turbinés à la centrale et déversés à Skins Lake (voir la Figure 1). Une fois reconstituées, les séquences d'apport ont été utilisées afin de caler le modèle hydrologique CEQUEAU à partir des volumes journaliers à la sortie du carreau partiel sur lequel se trouve le déversoir de Skins Lake.

Modèle CEQUEAU du sous-bassin Nechako

La modélisation du sous-bassin Nechako dans CEQUEAU a été effectuée par l'équipe des ressources hydriques de Rio Tinto. La caractérisation des propriétés physiques du terrain (modèle numérique d'élévation, occupation du sol, superficie des lacs et marécages, superficie des zones imperméables, coefficient d'infiltration de la zone non saturée, etc.) a été effectuée à partir de différentes bases de données. La Figure 8 illustre l'élévation au coin supérieur gauche de chaque carreau entier défini dans le modèle.

Afin de respecter l'échelle de temps des séries temporelles météorologiques, le modèle du sous-bassin Nechako utilise un pas de temps journalier. La fonction de production calcule des volumes d'apports sur 644 carreaux entiers d'une surface de 25 km² chacun (voir la Figure 8). En considérant les lignes de partage des eaux délimitées sur chaque carreau entier, les transferts des volumes produits sur les carreaux entiers sont calculés sur un total de 1082 carreaux partiels.

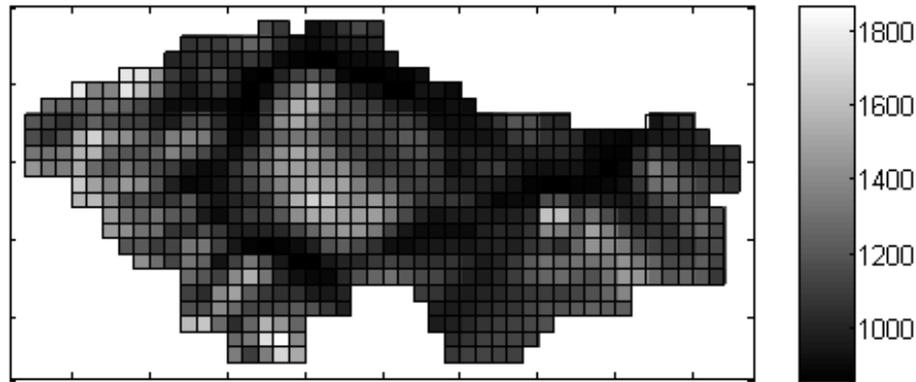


Figure 8 - Représentation graphique de l'élevation des carreaux entiers du modèle CEQUEAU du sous-bassin Nechako

Calage manuel du modèle CEQUEAU

Le calage du modèle CEQUEAU du sous-bassin Nechako a été effectué de façon manuelle par l'équipe de Rio Tinto. L'objectif était de respecter au mieux possible le bilan hydrique observé sur une base annuelle tout en reproduisant les pointes de crues saisonnières de façon adéquate pour les gestionnaires. L'ajustement des paramètres du modèle, en principe ajustable pour chaque carreau entier, a été effectué en regroupant les carreaux pour des zones similaires. De même, sans offrir un portrait détaillé de la méthodologie utilisée, Rio Tinto souligne que seulement certains des paramètres distribués ont été corrigés, afin de favoriser la conservation du sens physique de certains de ceux-ci.

Un ajustement manuel important des séquences observées de précipitation et de température a aussi été apporté de façon à ne pas devoir compenser de façon disproportionnée les paramètres du modèle de neige. En effet, lors du calage manuel du modèle CEQUEAU, une sous-estimation fréquente du bilan hydrique a été observée. L'entreprise a attribué cette erreur à un problème possible de sous-captage de leurs appareils, particulièrement avec les données de neige. Les corrections aux précipitations journalières ont été effectuées manuellement en utilisant une pondération différente d'une journée à une autre. Une analyse plus détaillée des corrections apportées aux données météorologiques est présentée au chapitre 5.

Préparation du vecteur des apports historiques

Pour être en mesure d'optimiser les règles de gestion basées sur les séquences d'apports historiques, l'algorithme d'optimisation basé sur la PDS développé par Rio Tinto et utilisé dans le cadre de cette recherche a besoin d'un vecteur dans lequel il peut lire les volumes

d'apports naturels simulés pour chaque période entre le début et la fin de la durée considérée pour l'optimisation.

La gestion du système hydrique Nechako s'effectue sur un horizon de 1 an. La période du 1^{er} octobre est celle où les conditions initiales du modèle hydrologique CEQUEAU ont le moins d'impact sur les apports projetés. La gestion du système hydrique est donc effectuée du 1^{er} octobre d'une année jusqu'au 30 septembre de l'année suivante. Comme le temps de cheminement de l'eau entre le réservoir Nechako et Cheslatta Lake et entre Cheslatta Lake et Vanderhoof est d'environ 3 jours, l'algorithme de Rio Tinto optimise les règles de gestion sur un pas de temps de 3 jours. Sur un horizon d'un an, l'algorithme considère donc 122 périodes différentes (horizon de gestion $T = 122$). La date de début de chaque période est présentée au tableau de l'annexe A.

En utilisant les séquences de données météorologiques journalières observées entre le 1^{er} octobre 1957 et le 1^{er} octobre 2012, le modèle CEQUEAU a permis d'établir le débit moyen journalier des apports naturels du sous-bassin Nechako sur 55 ans. Afin de limiter l'influence des valeurs initiales du modèle hydrologique, deux années de chauffe ont été considérées. En considérant la durée de chacune des 122 périodes dans une année, le volume d'apport total d'une période a été calculé à partir des débits journaliers des jours inclus dans cette période. Le vecteur d'apports naturels historiques s'étend donc sur une durée de 6446 périodes, soit 122 périodes/année pour chacune des 53 années de simulation, couvrant le 1^{er} octobre 1959 au 29 septembre 2012.

Préparation des prévisions d'ensemble du banc d'essai

La prévision de l'apport sur le premier pas de temps est considérée parfaite. Tous les scénarios prévisionnels d'apports considèrent donc la même prévision pour le premier pas de temps de 3 jours, soit la valeur historique de l'apport pour cette période. Par exemple, en date du 7 octobre 1959, la prévision d'apport pour la période $t = 3$ (du 7 au 9 octobre 1959) sera, pour l'ensemble des scénarios, la valeur d'apports historiques de cette même période.

À chaque pas de temps subséquent (de $t = 4$ à $t = T$), le modèle CEQUEAU est utilisé pour lancer 53 scénarios d'apports pour la suite de l'année, en considérant les 53 scénarios météorologiques historiques. Les 53 scénarios d'apports produits considèrent alors tous le même

état initial au début du deuxième pas de temps (soit le 10 octobre pour l'exemple). Sur chaque carreau entier (CE) de CEQUEAU, la valeur des variables d'état suivantes est lue dans le vecteur d'état de la simulation historique et appliquée dans le vecteur d'état initial de CEQUEAU :

- Stock de neige en forêt (mm)
- Stock de neige en clairière (mm)
- Index de mûrissement de la neige
- Index de température de la neige
- Niveau du réservoir SOL
- Niveau du réservoir NAPPE
- Niveau du réservoir LACS ET MARÉCAGES
- Évapotranspiration potentielle journalière
- Production d'apports du pas de temps précédent

Les apports, les volumes actuels des « réservoirs partiels » et les débits sur les carreaux partiels (CP) de ce pas de temps sont aussi utilisés afin de calculer le bilan initial sur chacun des carreaux partiels.

La Figure 9 présente un exemple des prévisions d'ensembles obtenues pour le 1^{er} mars 1976, années où les réserves de neige sont beaucoup plus importantes que la normale à cette période de l'année. En date du 1^{er} mars, tous les scénarios des prévisions d'ensemble (graphique de droite) considèrent les mêmes conditions initiales et l'ensemble des scénarios prévoit un pic de crue d'envergure (entre 700 m³/s et 1800 m³/s en juin). À titre de comparaison, les scénarios historiques (graphique de gauche), considérant des conditions météorologiques différentes du 1^{er} octobre 1975 au 1^{er} mars 1976, offrent une gamme de débits pour le pic de crue qui oscillent entre 300 m³/s et 1400 m³/s.

L'horizon des prévisions d'ensemble s'étend toujours jusqu'au 1^{er} octobre de la fin de l'année de gestion en cours ($T = 122$). Par exemple, les prévisions d'apports pour le 7 octobre 1959 ($t = 3$) s'étendent du 10 octobre 1959 ($t = 4$) jusqu'au 29 septembre 1960 ($t = T = 122$), mais celles pour le 1^{er} septembre 1959 ($t = 112$) s'étendent aussi jusqu'au 29 septembre 1959. L'horizon de prévision est donc variable selon la période sur laquelle les scénarios sont calculés.

Ce choix a été effectué afin de limiter le temps de calcul des prévisions d'ensemble et de mise à jour des règles dans le banc d'essai prévisionnel. Cette alternative a été choisie parce que, sur le système du réservoir Nechako, l'état hydrologique du bassin versant à l'automne (en octobre) a peu d'influence sur le volume de la crue printanière suivante et sur le volume d'apport annuel pour l'année à venir.

Choix de l'horizon des prévisions d'ensemble

À titre d'exemple, la Figure 10 illustre la simulation des apports pour l'année 1960 en utilisant les conditions initiales du 1er octobre des 53 scénarios historiques. La Figure 11 présente l'écart-type de ces 53 simulations d'apports à chaque période de l'année. Les fortes variations ($> 20 \text{ m}^3/\text{s}$) entre les scénarios lors des périodes 1 à 20 s'estompent ($< 10 \text{ m}^3/\text{s}$) lors de l'hiver et de la période de la crue, entre début décembre ($t = 20$) et fin juillet ($t = 100$), causant peu d'impact sur le volume de la crue.

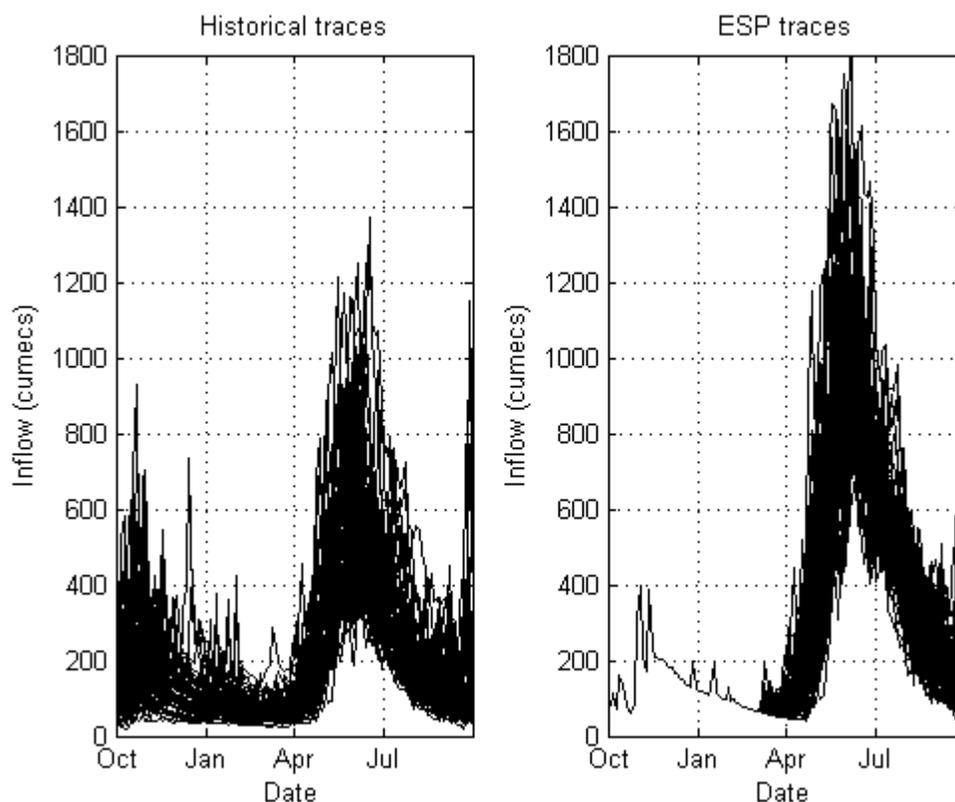


Figure 9 - Exemple de comparaison entre les scénarios historiques et les prévisions d'ensemble pour le 1^{er} mars 1976

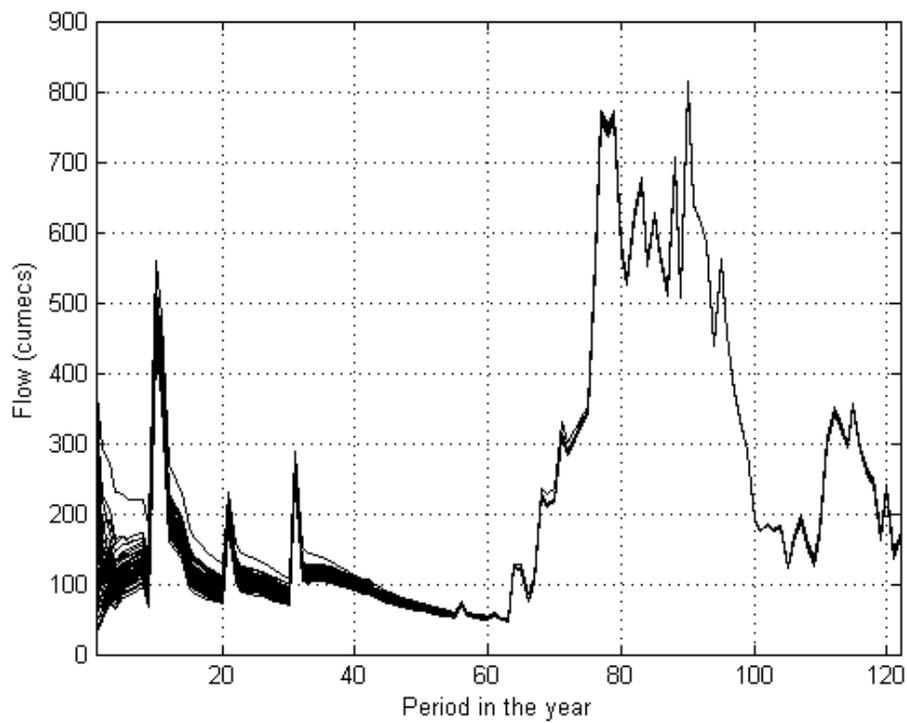


Figure 10 - Simulation des apports pour l'année 1960 en utilisant les conditions initiales de 53 scénarios

(chaque courbe représente un scénario avec des conditions initiales différentes)

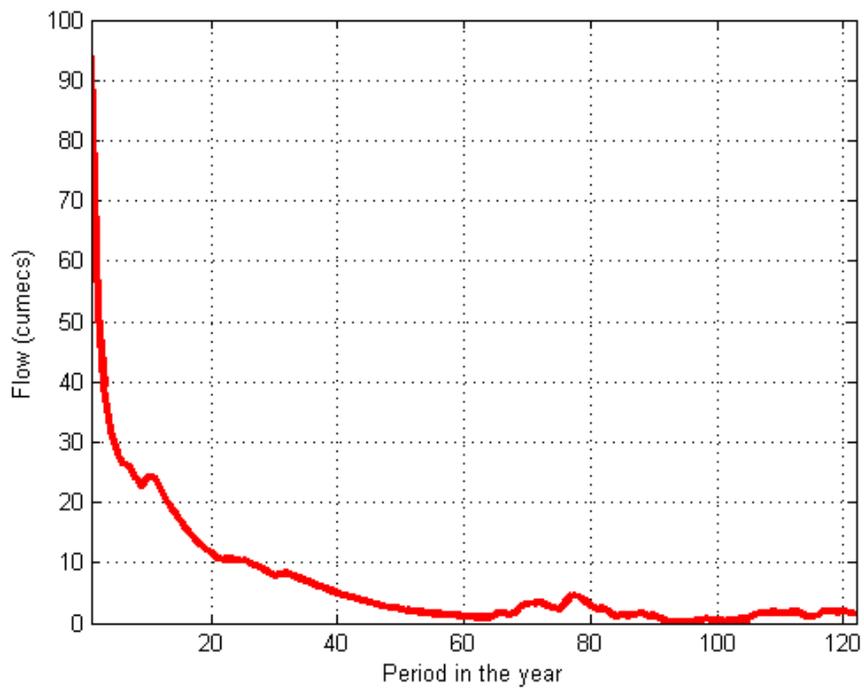


Figure 11 - Écart-type des 53 scénarios simulés pour l'année 1960

3.1.2 Apports sur les sous-bassins Cheslatta et Nautley

La contribution du sous-bassin Nechako aux apports de la rivière Nechako à Vanderhoof représente environ 67 % du bilan hydrique. L'influence du sous-bassin Nechako à lui seul est donc plus grande que celle des sous-bassins Cheslatta et Nautley.

Comme le modèle CEQUEAU n'a pas été configuré et calibré pour simuler le comportement de ces sous-bassins, la valeur des apports naturels pour ceux-ci a été calculée à l'aide de « coefficients de bassin » $\vartheta_{i,t}$ (où l'indice i représente la numérotation du sous-bassin : 1- Nechako, 2- Cheslatta et 3- Nautley) établis à partir de la moyenne des apports observés sur chaque période. La valeur journalière des apports sur les sous-bassins Cheslatta et Nautley a donc été calculée en considérant des conditions météorologiques et hydrologiques similaires à celle sur le sous-bassin Nechako. L'équation 29 (voir le chapitre 4) montre la façon dont ont été calculés les apports sur chacune des périodes de l'année ($t = 1:122$).

Les coefficients $\vartheta_{i,t}$ ont été évalués à partir des valeurs d'apports reconstitués pour les trois sous-bassins sur chacune des périodes. Un rapport entre les apports reconstitués de Cheslatta et Nechako (q_2/q_1) et entre Nautley et Nechako (q_3/q_1) a d'abord été calculé pour chacune des 122 périodes sur les 55 années considérées. La moyenne des 55 rapports à chaque période a ensuite été calculée pour obtenir les coefficients $\vartheta_{i,t}$. Les valeurs négatives issues des bilans reconstitués ont été remplacées par des valeurs de $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ avant le calcul des rapports. Le remplacement des valeurs négatives n'impliquait pas de biais significatif (valeur p de 0.8922 selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney). Les valeurs des coefficients $\vartheta_{2,t}$ et $\vartheta_{3,t}$ sont données à l'annexe B.

3.2 Calcul des variables hydrologiques

Conformément aux objectifs de cette recherche (voir section 1.3), quatre variables hydrologiques ont été utilisées pour évaluer leur potentiel dans une gestion du système hydrique du bassin versant Nechako. Ces quatre variables hydrologiques sont :

1. un modèle autorégressif d'ordre 5 sur les apports normalisés (AR-5);
2. l'équivalent en eau de la neige maximum de la saison actuelle (ÉENM);

3. une combinaison des modèles AR-5 et ÉENM (Combo); et
4. une prévision du volume d'apport médian (PVAM) (seulement en mode historique).

3.2.1 Modèle autorégressif d'ordre 5 (AR-5)

L'une des variables hydrologiques les plus couramment utilisées afin d'améliorer le modèle d'apport lors de l'optimisation des règles de gestion de réservoir est le modèle autorégressif d'ordre 1. Turgeon (2005) a développé une méthode permettant d'utiliser la corrélation entre les apports d'une période t et ceux de la période $t - 1$ et d'autres périodes antérieures ($t - 2$, $t - 3$, etc.) et plusieurs auteurs ont depuis utilisés des modèles autorégressifs d'ordre supérieur à 1 (ex. : Saad et coll., 1996; Côté et coll., 2011; Ethkin et coll., 2015).

Dans le cas du système du réservoir Nechako, Desreumaux et coll. (2014) ont démontré que la corrélation entre le volume de crue et un modèle autorégressif d'ordre 5 (AR-5) était supérieure à celle d'un modèle d'ordre 1 (AR-1). En considérant des périodes de 3 jours, le modèle autorégressif d'ordre 5 sur le système Nechako permet d'utiliser les apports passés des 15 derniers jours.

À titre de modèle de référence, la variable hydrologique AR-5 a donc été utilisée dans le cadre de cette étude. L'équation 39 (voir chapitre 4) présente le modèle utilisé pour calculer la variable hydrologique. Les coefficients autorégressifs du modèle φ_i (où $i = [0:5]$) ont été évalués à l'aide de régressions à variables multiples avec une erreur résiduelle modélisée par une loi normale (*multivariate normal regression*).

Afin de respecter le critère d'erreur résiduelle normale, les apports ont été normalisés de la façon suivante avant de calculer les régressions :

$$q_t^{norm} = \log(q_t - q_{min} + 0.1) \quad (14)$$

3.2.2 Équivalent en eau maximum de la neige (ÉEMN)

Desreumaux et coll. (2014) ont aussi démontré que le volume de la crue jusqu'à la fin de la fonte était corrélé avec l'équivalent en eau de la neige (ÉEN) (voir la courbe « Neige » sur la Figure 12). L'ÉEN s'exprime en mm et représente l'équivalent en eau liquide contenue dans la neige. Cependant, une fois la valeur maximale de l'ÉEN atteinte en mai, les auteurs ont démontré que

la corrélation entre cette variable et le volume de crue diminuait à mesure que le stock de neige diminuait aussi. Leur étude démontrait de plus que l'utilisation de la valeur maximale de l'ÉEN de l'année en cours restait corrélée avec le volume de crue même après la fonte. L'utilisation de l'équivalent en eau de neige maximal (ÉENM) a d'ailleurs permis d'obtenir de meilleurs résultats de gestion en mode historique sur le système du réservoir Nechako qu'avec le modèle AR-5 (Desreumaux et coll., 2014).

Les valeurs d'ÉENM utilisées dans le cadre de ce projet sont basées sur les valeurs d'ÉEN simulées par le modèle hydrologique CEQUEAU sur la partie « forêt » du carreau entier (CE) équivalent à la localisation de la station Mount Wells. Cette station a été choisie comme référence pour l'ÉENM, car elle permettait d'obtenir des résultats qui représentaient mieux les observations sur le coussin à neige équivalent. La Figure 13 illustre la comparaison entre les valeurs d'ÉEN observées et d'ÉEN et d'ÉENM simulées pour l'année 1996.

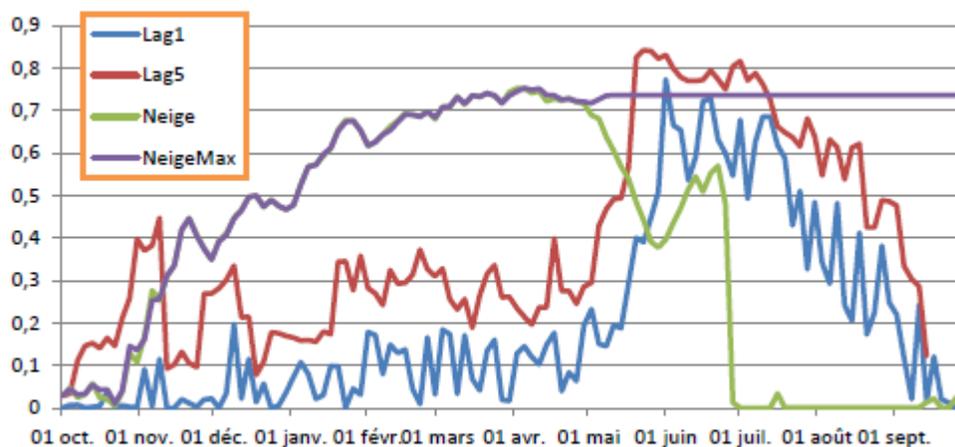


Figure 12 - Corrélation entre le volume de crue et différentes variables hydrologiques (source : Desreumaux, Q., 2012)

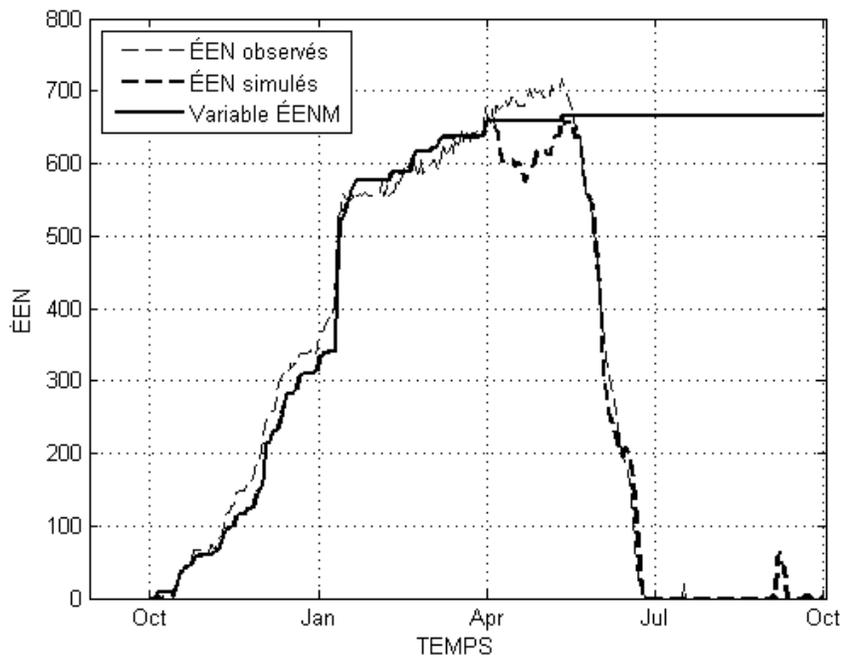


Figure 13 - Exemple de l'équivalent en eau de la neige (ÉEN) observé et simulé pour l'année 1996

3.2.3 Combinaison des modèles autorégressifs et de neige (Combo)

En mode prévisionnel, l'estimation des scénarios futurs d'ÉENM sur l'ensemble des périodes d'une année entraîne des complications. En effet l'ensemble des scénarios considérés pour effectuer la mise à jour des règles en mode prévisionnel considère des conditions hydrologiques antécédentes identiques. À partir du moment dans la saison où la neige commence à fondre, la valeur d'équivalent en eau maximal (ÉENM) pour la période $t - 1$ est donc la même pour l'ensemble des scénarios. Lorsque les scénarios météorologiques ne prévoient plus d'accumulation de neige pour le restant de la saison, la variable hydrologique $h_t^{MSWE} = \max(SWE_1, \dots, SWE_t)$ sera donc la même pour tous les scénarios considérés.

L'observation des prévisions d'ensemble d'ÉENM révèle ce phénomène à chaque année, à partir du moment où l'équivalent en eau de la neige a atteint sa valeur maximale pour la saison. La Figure 14 illustre un exemple de ce phénomène pour l'année 1969. La figure 14a) montre les prévisions de la variable ÉENM à la période $t = 1$ (1^{er} octobre 1968), la figure 14b) les prévisions à la période $t = 26$ (15 décembre 1968), la figure 14c) celles à la période $t = 50$

(25 février 1969) et la figure 14d) celles à la période $t = 76$ (14 mai 1969). À mesure que la saison hivernale progresse, l'étendue des valeurs possibles d'ÉENM pour le reste de la saison diminue. À partir du pic d'ÉEN d'une année donnée (à $t = 76$ pour l'exemple illustré), l'ensemble des scénarios projetés d'ÉENM possèdent la même valeur pour le reste de l'année.

Or, la variable hydrologique ÉENM est une variable intéressante en mode historique, car, à une période t donnée, la valeur actuelle de h_t peut être comparée aux valeurs d'ÉENM de l'ensemble des scénarios historiques pour le reste de la saison. Ainsi, l'évaluation des probabilités $Pr(q_t = q_{t,i} | h_t = h_{t,j})$ (voir équation 9) peut s'effectuer en considérant différentes valeurs $h_{t,j}$ possibles.

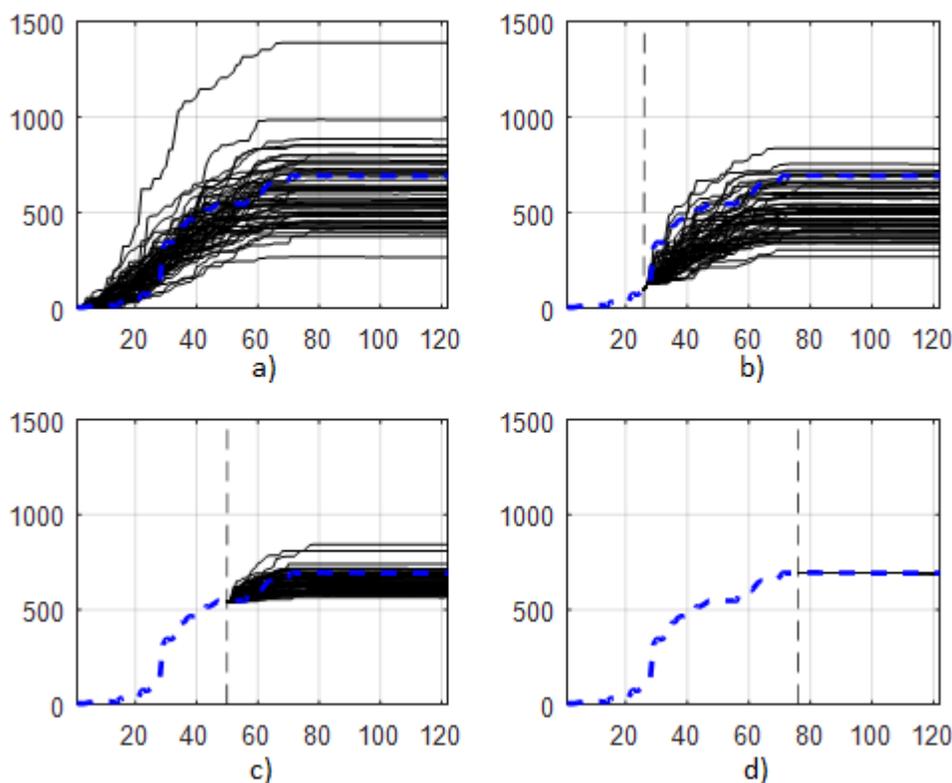


Figure 14 - Exemple de l'évolution des scénarios d'ÉENM (mm) en fonction de la période t pour l'année 1969

En mode prévisionnel cependant, à partir du moment où l'ensemble des scénarios de prévision d'ÉENM prévoit des valeurs $h_{t,j}$ identiques pour le reste de la saison (c.à.d. des valeurs d'ÉENM identiques pour chaque scénario et identiques pour chaque pas de temps d'ici la fin de

l'horizon de prévision), l'évaluation des probabilités $Pr(q_t = q_{t,i} | h_t = h_{t,j})$ devient inutile, car elle n'ajoute aucune information au modèle d'optimisation.

Afin de contrer le manque de distribution des scénarios de la variable hydrologique ÉENM en mode prévisionnel, une combinaison simple du modèle ÉENM et du modèle AR5 a été élaborée. En additionnant la valeur du modèle pondéré AR5 à celle des prévisions de l'ÉENM (voir équation 41 au chapitre 4), la variable combinée permet de conserver les bénéfices de la variable ÉENM lors de la période d'accumulation de la neige, tout en utilisant le pouvoir de prévision des apports de la variable AR5 pour le reste de l'année. De plus, cette combinaison assure une distribution des scénarios de la variable hydrologique sur l'ensemble des périodes de l'année. La Figure 15 présente un exemple pour l'année 2000.

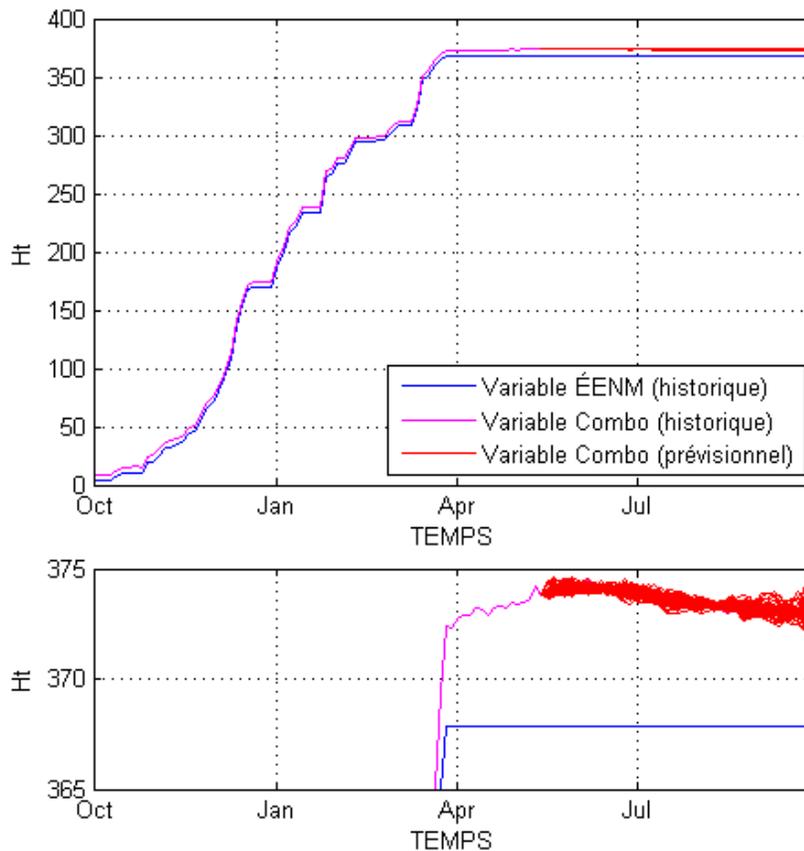


Figure 15 - Comparaison des variables hydrologiques ÉENM et Combo (14 mai 2000 en mode prévisionnel)

(la figure du bas représente un agrandissement d'une partie de la figure du haut)

3.2.4 Prédiction du volume d'apport médian (PVAM)

L'une des forces de la variable hydrologique ÉENM sur les bassins avec d'importantes variations du couvert de neige est que celle-ci permet de relativiser l'ampleur du volume d'apport de l'année actuelle par rapport aux autres années. En offrant dès les premières accumulations de neige en début d'hiver une idée de l'envergure de la crue printanière, la variable ÉENM permet de mettre l'emphase sur les scénarios conséquents avec la crue à venir.

Or, l'utilisation d'un modèle hydrologique pour construire des prévisions d'ensemble tenant compte des conditions hydrologiques actuelles du bassin versant peut aussi permettre d'évaluer l'ampleur du volume de la crue à venir. Dans cette optique, même en mode historique, les prévisions d'ensemble peuvent être utilisées pour établir une variable hydrologique qui sert de prédiction du volume de crue à venir. Cette démarche présuppose, cependant, qu'à chaque pas de temps de chacun des scénarios historiques, des prévisions d'ensemble aient été établies pour calculer le volume de crue à venir.

Afin d'explorer l'intérêt de ce genre de variable hydrologique sur le système du réservoir Nechako, une variable hydrologique représentant une prédiction du volume d'apport médian sur un horizon de 8 mois a été étudiée.

De cette manière, dès les premières périodes de l'année de gestion ($t = 1$ au 1^{er} octobre), la variable hydrologique caractérise l'envergure du volume d'apport médian à prévoir d'ici la première partie de la crue printanière ($t = 80$ en début juin). De même, à partir de la mi-novembre (à $t = 15$), la variable représente la prédiction médiane du volume d'apport à venir d'ici la mi-juillet (à $t = 95$), ce qui couvre la majeure partie de la crue printanière. La Figure 16 illustre un exemple de l'évolution de la variable hydrologique lors d'années d'apports élevés, modérés et faibles.

Notons que l'utilisation de la variable PVAM n'a pas été testée en mode prévisionnel dans le cadre de cette étude, car la construction des valeurs de la variable hydrologique à chaque pas de temps de chacun des scénarios prévisionnels pour chaque période aurait demandé des efforts computationnels qui dépassaient les ressources disponibles pour le projet de recherche.

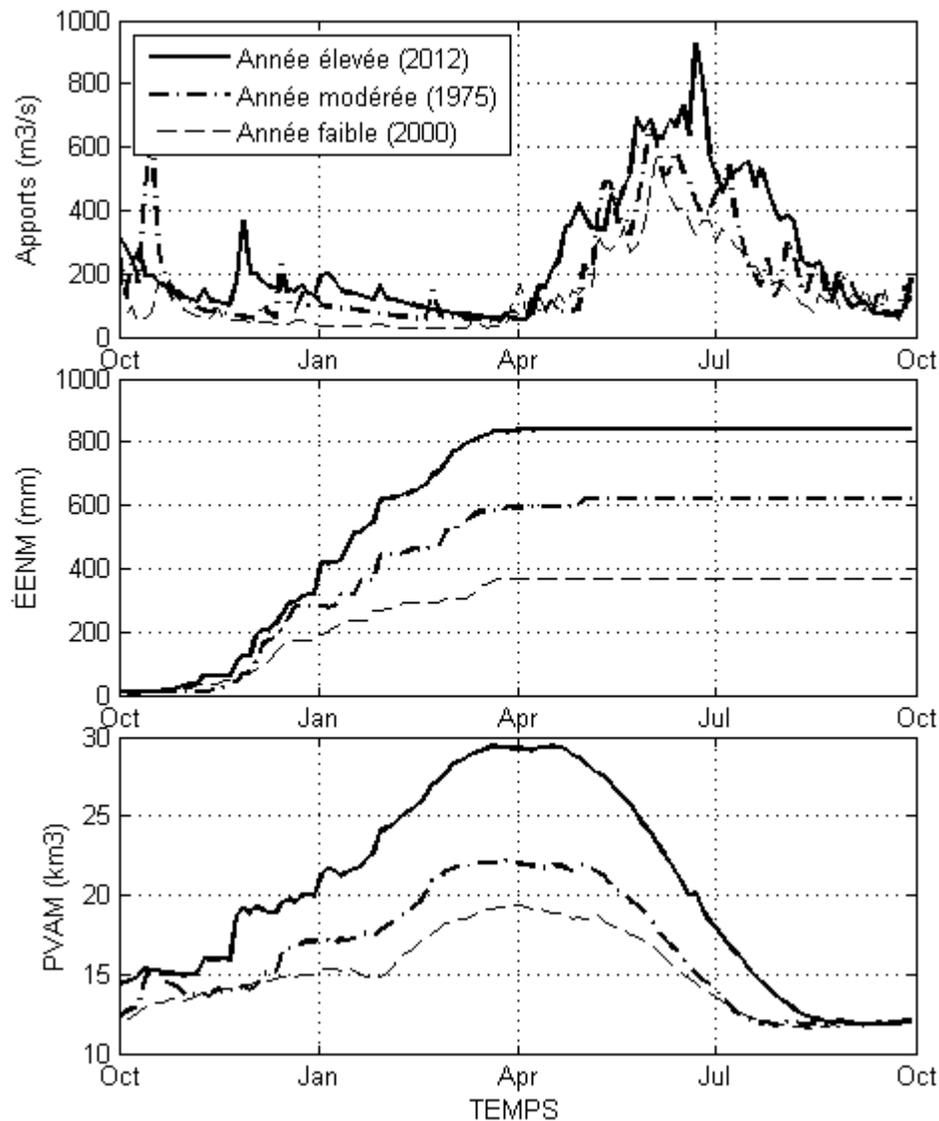


Figure 16 - Comparaison des variables PVAM et ÉENM en mode historique pour une année d'apports élevés, modérés et faibles

3.3 Calcul des probabilités de transitions

Les probabilités de transition permettent d'évaluer, à une période donnée t , les probabilités conditionnelles de voir apparaître une valeur de débit $q_{t,i}$, discrétisée en fonction de l'état actuel du système (voir l'équation 9). Dans le cas de la PDS de Rio Tinto, ces probabilités sont imposées par l'utilisateur et des valeurs discrétisées des variables d'état q_t et h_t correspondant à ces probabilités sont établies à partir de la distribution de ces variables à chaque période.

Avant d'évaluer les valeurs discrétisées des variables d'état, celles-ci ont été normalisées afin de répondre aux critères attribuables aux distributions choisies. Les valeurs d'apports sont normalisées de la façon suivante :

$$q_t^{norm} = \log(q_t - q_{min}) \quad (15)$$

L'hypothèse est que la distribution des apports suit une loi log-normale. Suivant la même hypothèse, les valeurs de la variable hydrologique sont normalisées de la façon suivante :

$$h_t^{norm} = \log(h_t + 1) \quad (16)$$

3.3.1 Discrétisation de la variable hydrologique au stade actuel (t)

Desreumaux (2012) a démontré que le modèle d'optimisation de Nechako offrait de meilleurs résultats de gestion lorsque la variable hydrologique était décrite par une loi empirique plutôt qu'une loi normale. Cette méthode, combinée avec des queues de distribution respectant la loi de Pareto lorsque $Pr < 5\%$ et $Pr > 95\%$, a été préférée pour ce projet-ci afin d'identifier les valeurs discrètes de la variable hydrologique à utiliser à chaque stade t . Les valeurs discrètes $j = [1, 2, \dots, 7]$ de la variable hydrologique ont été obtenues pour les probabilités cumulatives suivantes de distribution :

$$Pr(h_t = h_{t,j}) = [2.5\% \quad 10\% \quad 25\% \quad 50\% \quad 75\% \quad 90\% \quad 97.5\%] \quad (17)$$

3.3.2 Discrétisation de la prévision des apports au stade actuel (t)

Le modèle de prévision des apports au stade actuel consiste en une relation linéaire avec la valeur de la variable hydrologique au stade actuel. Pour chaque stade t évalué, les coefficients θ_0 et θ_1 permettant d'établir la relation suivante ont été évalués à l'aide de la méthode des moindres carrés :

$$q_t = \theta_{t,0} + \theta_{t,1}h_t + \epsilon_t \quad (18)$$

En supposant que les valeurs résiduelles ϵ_t de cette relation suivent une loi normale, l'erreur attribuable à chaque valeur discrète $q_{t,i}$ considérant une variable hydrologique $h_{t,j}$ est alors

évaluée en fonction des probabilités $Pr_{i|j}$ de voir apparaître un apport $q_{t,i}$ considérant la variable hydrologique $h_{t,j}$:

$$\epsilon_{t,i|j} = \sigma_{\epsilon_t} \cdot Pr_{i|j} \quad (19)$$

Les valeurs discrètes $q_{t,i|j}$ du débit au stade t actuel conditionnelles à la valeur $h_{t,j}$ de la variable hydrologique actuelle peuvent être évaluées selon l'équation suivante :

$$q_{t,i|j} = \theta_{t,0} + \theta_{t,1}h_{t,j} + \epsilon_{t,i|j} \quad (20)$$

Les valeurs discrètes $i = [1,2, \dots, 7]$ de débit ont été obtenues pour les plages de probabilités suivantes de la distribution :

$$Pr_{i=1|j} = [0 - 5\%] \quad (21a)$$

$$Pr_{i=2|j} = [5 - 15\%] \quad (21b)$$

$$Pr_{i=3|j} = [15 - 35\%] \quad (21c)$$

$$Pr_{i=4|j} = [35 - 65\%] \quad (21d)$$

$$Pr_{i=5|j} = [65 - 85\%] \quad (21e)$$

$$Pr_{i=6|j} = [85 - 95\%] \quad (21f)$$

$$Pr_{i=7|j} = [95 - 100\%] \quad (21g)$$

La Figure 17 présente un exemple de calcul pour l'évaluation des valeurs discrétisées des apports (q_t) et de la variable hydrologique (h_t) pour la période du 7 juin ($t = 84$) avec la variable hydrologique MSWE. La figure du bas montre sur l'histogramme en bleu, la distribution des valeurs de h_t pour l'ensemble des scénarios à la période $t = 84$ à intervalles égaux, ainsi que, sur la courbe en rouge, le nombre d'occurrences entre les intervalles [0-0.05; 0.05-0.15; 0.15-0.35; 0.35-0.65; 0.65-0.85; 0.85-0.95; 0.95-1.00] qui répondent au modèle de la distribution. La figure du haut illustre, pour sa part, la comparaison entre les valeurs (h_t, q_t) des scénarios (points bleus), la régression linéaire établie à partir de ces données (droite en rouge) et les valeurs discrétisées du modèle linéaire qui correspondent aux probabilités imposées sur le modèle de distribution de la variable hydrologique h_t (points rouges).

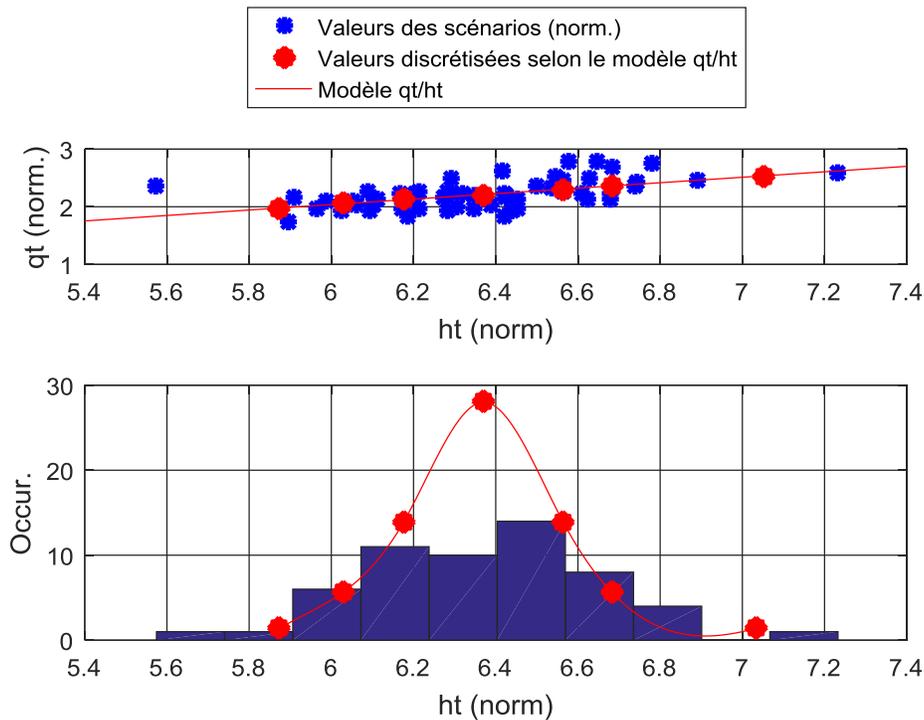


Figure 17 - Exemple d'évaluation des probabilités de transition pour la valeur d'apport (q_t) en fonction de la valeur de la variable hydrologique ÉENM (h_t) pour la période du 7 juin

3.3.3 Discrétisation de la variable hydrologique au stade suivant ($t+1$)

La prévision de la valeur discrète de la variable hydrologique au stade suivant (h_{t+1}) est effectuée à partir d'une régression linéaire multiple qui est fonction du débit actuel q_t et de la variable hydrologique actuelle h_t . Pour chaque stade t évalué, les coefficients φ_0 , φ_1 et φ_2 permettant d'établir la relation suivante sont évalués :

$$h_{t+1} = \varphi_{t,0} + \varphi_{t,1}q_t + \varphi_{t,2}h_t + \varepsilon_t \quad (22)$$

Bien que respectant la loi normale, la distribution des valeurs résiduelles ε_t du modèle linéaire de la variable h_{t+1} est représentée à l'aide d'une loi empirique avec des queues de la distribution ($Pr < 10\%$ et $Pr > 90\%$) représentées par une loi de Pareto. Les valeurs discrètes ($k = [1, 2, \dots, 7]$) de la variable hydrologique au stade $t + 1$ ont été établies à partir des probabilités cumulatives suivantes de la distribution :

$$Pr(h_{t+1} = h_{t+1,k}) = [2.5\% \quad 10\% \quad 25\% \quad 50\% \quad 75\% \quad 90\% \quad 97.5\%] \quad (23)$$

Les valeurs discrètes $h_{t+1,k|i,j}$ de la variable hydrologique au stade $t + 1$ conditionnelle aux valeurs discrètes $q_{t,i|j}$ du débit actuel considérant la valeur discrète actuelle $h_{t,j}$ de la variable hydrologique peuvent être évaluées selon l'équation suivante :

$$h_{t+1,k|i,j} = \varphi_{t,0} + \varphi_{t,1}q_{t,i|j} + \varphi_{t,2}h_{t,j} + \epsilon_{t,k} \quad (24)$$

3.4 Optimisation des règles de gestion

3.4.1 Objectif d'optimisation de Rio Tinto

L'objectif général de l'algorithme d'optimisation de Rio Tinto est de maximiser la production hydroélectrique tout en respectant les différentes contraintes (voir Chapitre 4). Considérant une matrice $\mathbf{s}_t = (s_{1,t}, s_{2,t})$ représentant les volumes d'eau accumulés dans les réservoirs Nechako ($s_{1,t}$) et Cheslatta ($s_{2,t}$), un vecteur u_t représentant le volume d'eau turbiné à la centrale Kemano, une matrice $\mathbf{v}_t = (v_{1,t}, v_{2,t}, v_{3,t})$ représentant les volumes d'eau soutirés des trois réservoirs et une matrice $\mathbf{q}_t = (q_{1,t}, q_{2,t}, q_{3,t})$ représentant les volumes d'apports naturels sur chaque sous-bassin, l'objectif d'optimisation s'exprime à partir de la fonction suivante :

$$\text{Max E} \left[\sum_{t=1}^T B_t(\mathbf{s}_t, u_t, \mathbf{v}_t, \mathbf{q}_t) \right] \quad (25)$$

La fonction de bénéfice B_t exprime quant à elle la valeur de la production électrique P_t à laquelle on soustrait une fonction de pénalité β_t associée au respect des contraintes de gestion du réservoir. La fonction de bénéfice du problème peut s'exprimer ainsi :

$$B_t(\mathbf{s}_t, u_t, \mathbf{v}_t, \mathbf{q}_t) = P_t(s_{1,t}, u_t) - \beta_t(\mathbf{s}_t, u_t, \mathbf{v}_t, \mathbf{q}_t) \quad (26)$$

3.4.2 Modélisation des contraintes de gestion du système Nechako

Afin de s'assurer que le modèle d'optimisation représente adéquatement le comportement du système hydrique et ses différentes contraintes de gestion, celles-ci sont représentées à l'aide d'équations dans le modèle d'optimisation. Ces équations sont exprimées en détails dans l'article scientifique publié au chapitre 4.

3.4.3 Fonction de pénalités pour les contraintes non respectées

Toutes les contraintes ne peuvent pas être respectées en tout temps sur le système Nechako. Afin de minimiser l'ampleur et la durée de ces dépassements, la fonction de pénalité suivante (équation 27), pénalisant le dépassement de 5 critères de gestion, a été intégrée à la fonction-objectif de (équation 26).

$$\begin{aligned} \beta_t = & \theta_1(\max[\omega_1 - P_t, 0])^{\alpha_1} + \theta_2(\max[\omega_2 - s_{1,t}, 0])^{\alpha_2} \\ & + \theta_3(\max[s_{1,t} - \omega_3, 0])^{\alpha_3} + \theta_4(\max[v_{2,t} - \omega_4, 0])^{\alpha_4} \\ & + \theta_5(\max[v_{3,t} - \omega_5, 0])^{\alpha_5} \end{aligned} \quad (27)$$

Les valeurs ω_x représentent les seuils à ne pas dépasser :

- ω_1 = La production minimale à respecter à la centrale Kemano;
- ω_2 = Le niveau minimal à respecter au réservoir Nechako pour assurer l'alimentation en eau de la centrale Kemano;
- ω_3 = Le niveau maximal à respecter au réservoir Nechako avant d'être en situation critique;
- ω_4 = Le débit maximal à respecter à la sortie de Cheslatta Lake pour éviter une inondation du cimetière amérindien; et
- ω_5 = Le débit maximal à respecter à Vanderhoof pour éviter une inondation dans la ville.

Les coefficients θ_x et les exposants α_x sont des paramètres de pondération à calibrer.

3.4.4 Implémentation de l'algorithme d'optimisation

Développé en langage C++ sous l'environnement Linux©, l'outil d'optimisation de PDS de Rio Tinto nécessite les informations suivantes comme intrants pour pouvoir calculer les règles de gestion optimales :

- 1- Un ensemble de scénarios sous forme de séries temporelles contenant les apports non contrôlés des bassins versants Nechako, Cheslatta et Nautley;
- 2- Un ensemble de scénarios sous forme de séries temporelles contenant la valeur de la variable hydrologique utilisée pour établir les probabilités de transition;

- 3- Un fichier par période (122 périodes) contenant les probabilités conditionnelles d'occurrence d'un apport discret, connaissant la valeur de la variable hydrologique et un fichier par période (122 périodes) contenant les probabilités conditionnelles d'occurrence d'une valeur discrète de la variable hydrologique à la période suivante, connaissant la valeur de l'apport et de la variable hydrologique à la période actuelle;
- 4- Un fichier contenant les paramètres d'optimisation, dont la valeur des coefficients de pénalité associés à la fonction de bénéfice du modèle.

Lorsque ces intrants sont fournis, l'algorithme d'optimisation est lancé sous l'environnement Linux© et calcule le soutirage optimal à considérer à chaque période, pour chacune des combinaisons discrètes possibles de volume d'eau dans le réservoir, de variable hydrologique et de volume d'apport pour la période considérée. Un nombre d'itérations maximal de 10 est imposé si les règles ne convergent pas (voir équation 8).

Une fois les règles optimales identifiées pour chaque condition possible, l'algorithme effectue une simulation de l'opération du réservoir en utilisant une séquence d'apports sur plusieurs années consécutives. En mode historique, la séquence d'apports utilisée pour produire les simulations du système hydrique est la même que celle utilisée pour établir les règles de gestion.

3.5 Calage des paramètres de la fonction-objectif

Pour chaque variable hydrologique et pour chaque mode d'optimisation, quatre exposants α_x de la fonction de pénalité (voir équation 27) ont été ajustés pour répondre de façon similaire aux critères de gestion.

- α_2 = Exposant sur le dépassement du niveau minimal au réservoir (=nmin);
- α_3 = Exposant sur le dépassement du niveau maximal au réservoir (=nmax);
- α_4 = Exposant sur les inondations à la sortie de Cheslatta Lake (=q2max); et
- α_5 = Exposant sur les inondations à Vanderhoof (=q3max).

Afin de permettre une comparaison d'une simulation à une autre, ces paramètres ont été ajustés afin que la simulation de la gestion à l'aide des règles optimisées avec ceux-ci puisse respecter les quatre critères suivants :

- 1- Le niveau minimal du réservoir Nechako ne doit en aucun cas dépasser le seuil minimal de 2787.2 pieds;
- 2- Le niveau maximal du réservoir Nechako peut dépasser le seuil critique, mais ne doit en aucun cas dépasser le seuil maximal de 2800.98 pieds;
- 3- Le débit maximal à la sortie de Cheslatta Lake doit atteindre une valeur s'apparentant à 400 m³/s avec toutes les simulations.
- 4- Le débit maximal à Vanderhoof doit atteindre une valeur s'apparentant à 660 m³/s avec toutes les simulations.

Le calage des paramètres a été effectué de façon manuelle en explorant le domaine de chacun de ceux-ci avec des discrétisations variables pour les valeurs des paramètres α_x . Pour un mode d'optimisation donné et pour une variable hydrologique donnée, une première discrétisation de l'espace des quatre paramètres a d'abord été appliquée. La Figure 18 présente un exemple de la procédure de calage des paramètres de la fonction-objectif du mode historique avec la variable hydrologique AR5, pour le critère de débit maximal à Vanderhoof (critère 4 ci-dessus). Sur l'exemple présenté, trois valeurs de paramètres ont été explorées pour le respect du niveau minimal ($\alpha_2 = nMin = [1.2, 1.3, 1.4]$), cinq pour le niveau maximal ($\alpha_3 = nMax = [1.3, 1.5, 1.7, 1.9, 2.1]$), six pour le débit maximal à Cheslatta Lake ($\alpha_4 = q2Max = [0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8]$) et six pour le débit maximal à Vanderhoof ($\alpha_5 = q3Max = [0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2]$). Dans chacun des graphiques, la couleur des pixels indique la valeur de la variable étudiée pour le critère observé. Après chaque tentative avec un ensemble différent de paramètres, la discrétisation était raffinée et/ou l'espace était réajusté en fonction de l'évolution du critère observé de manière à identifier un jeu de paramètres respectant le critère analysé.

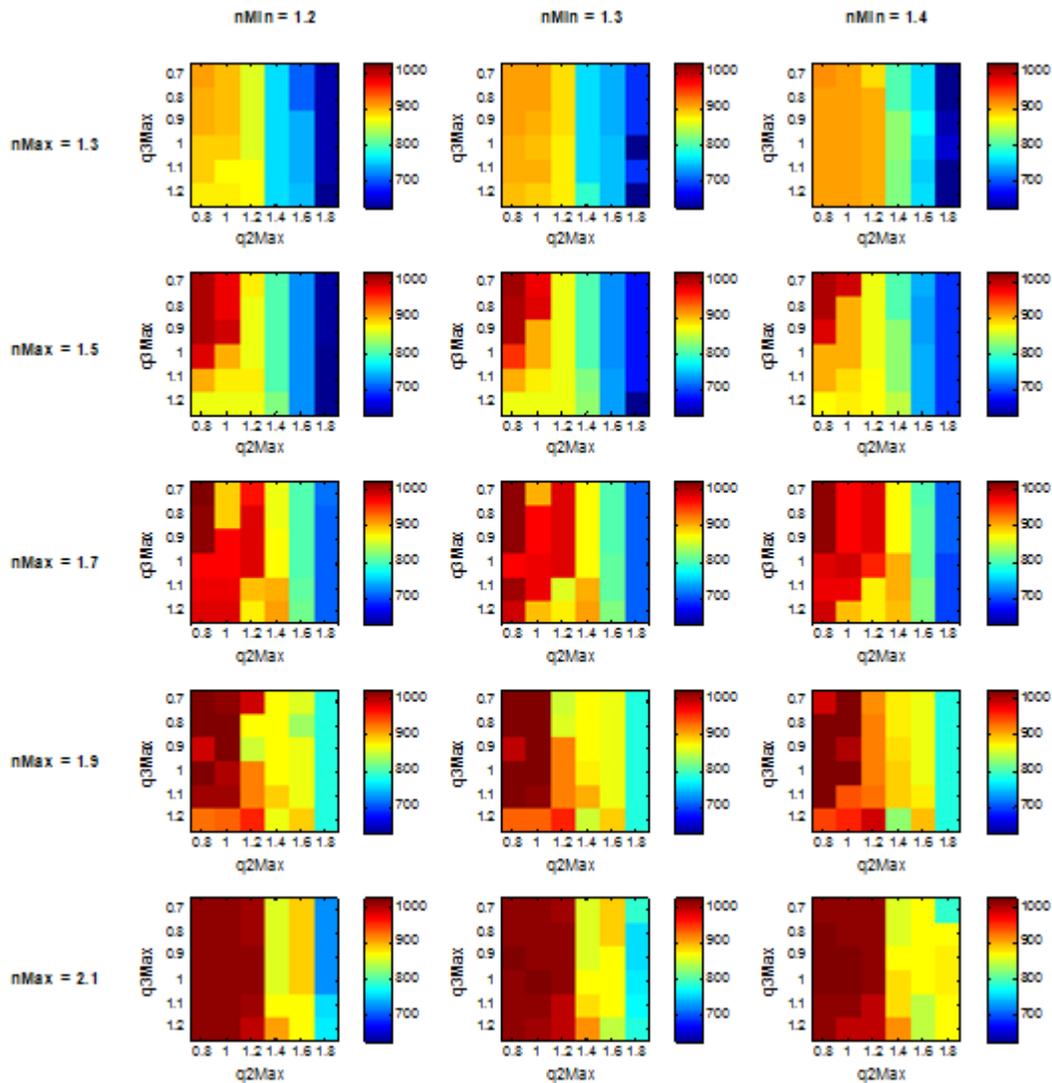


Figure 18 - Exemple de résultats de débit maximal à Vanderhoof obtenus en fonction de la discrétisation de l'espace des paramètres de la fonction objectif (mode historique et variable hydrologique AR5)

3.6 Banc d'essai pour la mise à jour des règles de gestion

La mise à jour des règles en mode prévisionnel s'effectue à partir de prévisions d'ensemble établies avec le modèle hydrologique CEQUEAU. Pour se faire, à chaque pas de temps où les règles sont mises à jour, la routine suivante est implémentée dans un banc d'essais numériques. La Figure 19 illustre une schématisation de chacune des étapes.

En considérant l'état actuel du modèle hydrologique CEQUEAU, les scénarios d'apports pour les périodes à venir sont élaborés à partir des séquences météorologiques historiques (voir

Figure 19a). Les séries temporelles de température journalière et de précipitation de chacun des 53 scénarios historiques sont utilisées et implémentées au modèle hydrologique CEQUEAU.

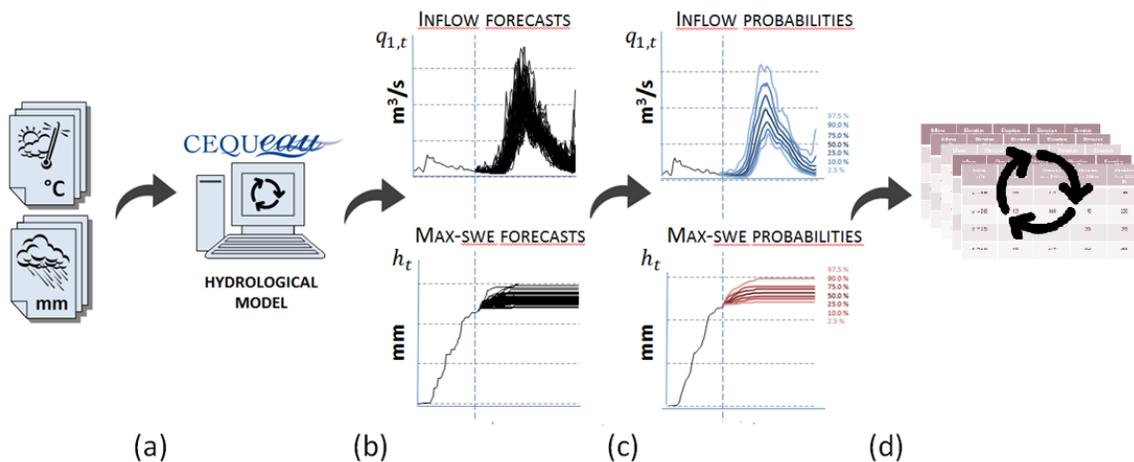


Figure 19 - Schématisation de la routine de calculs du banc d'essai prévisionnel

À partir de la simulation journalière des processus hydrologiques pour chacun des 53 scénarios, le banc d'essai numérique extrait ensuite un vecteur d'apports $q_{1,t}$ à l'exutoire du sous-bassin Nechako ainsi qu'un vecteur de la variable hydrologique h_t (la variable ÉENM sur la Figure 19b) et les transforme dans le format nécessaire à l'optimisation des règles. Les valeurs d'apports sur les sous-bassins Cheslatta et Nautley ($q_{2,t}$, $q_{3,t}$) sont ensuite évaluées à partir du vecteur $q_{1,t}$ selon l'équation 28.

$$q_{i,t} = \vartheta_{i,t} \times q_{1,t} \quad (28)$$

Une fois les scénarios d'apports et de la variable hydrologique préparés, le banc d'essai met à jour les valeurs discrétisées des variables q_t et h_t qui répondent aux probabilités de transition (Figure 19c) selon les équations présentées à la section 3.3.

Le banc d'essai effectue ensuite la mise à jour des règles de gestion en considérant les scénarios et les probabilités mis à jour précédemment (Figure 19d). L'optimisation s'effectue de façon rétroactive à partir du dernier pas de temps de l'horizon de gestion (T) en ne considérant qu'une seule itération pour l'année en cours. Malgré l'itération unique pour l'année en cours, l'optimisation implémentée en mode prévisionnel tient compte des bénéfices pour les années subséquentes. Ceci est effectuée en appliquant des valeurs de l'eau pour les pas de temps au-

delà de l'horizon de gestion ($t > T$) équivalentes à celles évaluées *a priori* (avant le démarrage du banc d'essais) à l'aide du mode historique.

Une fois les règles mises à jour, la décision $(u_t, v_{1,t})$ optimisée pour la période actuelle est implémentée. Des bilans hydriques dans le réservoir Nechako ($s_{1,t}$), à Chelsatta Lake ($s_{2,t}$ et $v_{2,t}$) et à Vanderhoof ($v_{3,t}$) sont ensuite calculés en fonction des apports « véritables » sur les trois sous-bassins ($q_{1,t}$, $q_{2,t}$ et $q_{3,t}$). Tout comme en mode historique, les apports « véritables » sont implémentés en utilisant la séquence historique des apports simulés par CEQUEAU.

Une fois les bilans hydriques calculés et l'état du réservoir Nechako et de Cheslatta Lake mis à jour, de nouvelles prévisions d'ensemble sont élaborées à partir de l'état hydrologique du modèle CEQUEAU et les étapes de la routine de calculs du banc d'essai sont exécutées à nouveau, conformément à la Figure 19.

CHAPITRE 4 ARTICLE SCIENTIFIQUE

4.1 Avant-propos

Auteurs et affiliation :

- Alexandre Martin : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil
- Pascal Côté : ingénieur en recherche opérationnel, Rio Tinto, Jonquière, QC (Canada)
- Robert Leconte : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil

Date de soumission : 18 mai 2016

État de l'acceptation : Après analyse auprès d'un comité de réviseurs experts, l'article a été refusé par le journal dans sa forme actuelle. Les éditeurs du journal invitent cependant les auteurs à resoumettre l'article en fonction de certains commentaires précis émis dans leur réponse.

Revue : *Journal of Water Resources Planning and Management* (ASCE)

Référence : WRENG-2657

Titre en français :

Optimisation de réservoir en mode prévisionnel utilisant la modélisation hydrologique : Étude de cas sur un système hydroélectrique nordique

Contribution au document :

Cet article contribue au mémoire en illustrant les résultats du banc d'essai en mode prévisionnel, lorsque comparés à ceux obtenus à l'aide de règles de gestion optimisées en mode historique avec les variables hydrologiques AR5, ÉENM (*MSWE*) et la combinaison des deux (*combined*).

Résumé français :

La programmation dynamique stochastique (SDP) en mode prévisionnel (*on-line*) est reconnue comme étant une méthode d'optimisation performante pour les systèmes hydriques à usages multiples à un seul réservoir. Cette méthode nécessite cependant de l'information appropriée sur l'état du système pour tirer profit des prévisions d'ensemble. Sujet à des apports en rivière importants dus à la fonte printanière de la neige, la gestion de réservoir en milieu nordique peut tirer avantage d'une meilleure compréhension de l'état du manteau neigeux. Cet article présente l'étude de cas du réservoir Nechako, en C.-B., Canada. Un banc d'essai numérique est implanté afin d'évaluer la performance de règles de gestion mises à jour à l'aide d'un algorithme SDP en mode prévisionnel et de prévisions d'ensemble construites à partir d'un modèle hydrologique semi-distribué représentant l'état du manteau neigeux à l'aide d'une approche semi-empirique de type degré-jour. Lorsque comparés aux règles optimisées à l'aide d'un algorithme SDP classique en mode historique, les résultats du mode prévisionnel montrent moins de sensibilité dans la calibration de la fonction-objectif, moins de déversements non productifs malgré des productions similaires et moins de risque d'inondation en aval lors des années d'apports élevés. Ces résultats illustrent que, parce qu'ils tiennent compte de plusieurs processus hydrologiques (comme l'accumulation et la fonte de la neige), la modélisation hydrologique est une approche intéressante pour l'optimisation de réservoir en temps réel en région nordique.

4.2 Abstract

Recognized to be well suited for optimization of a single reservoir multi-purpose system, on-line Stochastic Dynamic Programming (SDP) needs, however, appropriate information to take advantage of streamflow forecasts. Subject to large streamflow volumes in spring due to significant amount of snowmelt, reservoir management policies in northern areas can take advantage of a better understanding of the snowpack properties. This paper presents a case study of the Nechako Reservoir, B. C., Canada, on which an on-line SDP testbed is implemented using streamflow forecasts produced by a deterministic and semi-distributed hydrological model that represents the snow processes with a semi-empirical degree-day method. When compared with a classical off-line SDP policy, results show less sensibility in the calibration of the objective function, a reduction of unproductive spills while maintaining similar production, and a

reduction of the risk of downstream flood events during years of high inflow volumes. These results support the idea that, because it represents various hydrological processes (like snowmelt and snow accumulation), hydrological modeling is an interesting option for real-time management optimization in northern regions.

4.3 Introduction

Stochastic Dynamic Programming (SDP) is one of the most widely used techniques for hydropower reservoir optimization facing multi-criteria management (Turgeon, 2005; Anvari *et al.*, 2014; Desreumaux *et al.*, 2014; Davidsen *et al.*, 2015). However, complex water systems and/or fine discretization of the variables in the problem complicate the optimization problem and cause a “Curse of dimensionality” (Archibald *et al.* 1997; Turgeon 2007). In recent years, on-line optimization, by using “external” information to update incoming uncontrolled inflow scenarios, has been an interesting option to allow a reduction of the number of state variables to be considered in reservoir optimization problems (*e.g.* Faber and Stedinger, 2001; Castelletti *et al.*, 2008a; Zhao *et al.*, 2012; and Raso *et al.*, 2014). On-line optimization allows an update of the probability distributions based on a dynamic inflow predictor that is fed with real-time information (Castelletti *et al.*, 2008b). By doing so, the optimization process considers information that may include not only the current state of the water system (*e.g.* river flow, reservoir level, etc.), but any other hydrological variable that may be useful to make a prediction of future inflows (*i.e.* precipitation, snow-cover measurements, etc.). On-line methods also allow a simple update of an off-line policy with information that was not available when the policy was first solved, making it adaptable to any new and unexpected conditions the system could face, such as extreme flooding falling outside historical events.

A major issue in water management in northern regions is the inter-seasonal variation caused by the accumulation of snow in the winter season and substantial inflow volumes during the snowmelt season. Midterm management (such as a yearly management horizon with daily to weekly time steps) must take in account real-time information about the snow accumulation in order to improve production and reduce the risk of spilling water and/or cause flood events. This paper aims at evaluating the potential of using an on-line procedure to update in real-time the

management policy of a northern reservoir system based on its current hydrological state (including snow information).

A few studies investigated how updating reservoir rules, as new hydrometeorological information is provided, helped improve reservoir management. Faber and Stedinger (2001) first used ensemble streamflow predictions (ESP) updated on a weekly basis within a single reservoir optimization model using a Scenario based Stochastic Dynamic Program algorithm (SSDP) over a yearly management horizon. They applied their model over a mountainous tributary basin of the Colorado River and their results showed that management rules updated with ESP scenarios were better performing than a similar model using historical traces of the inflows with no forecasts. Their updated rules also showed better results for the critical snowmelt period, suggesting that the inflows described by the updated ESP were more consistent with the actual conditions of the watershed (including snowpack description), allowing a better trade-off between short-term benefits and future water values. Eum and Kim (2010) also showed that updating the ESP scenarios improved the flow forecast accuracy and that updating operation policies a few times within a month helped reduce water shortage by 4.6 % (when compared to operation policies based on historical scenarios) on a multi-reservoir application in Korea.

Some studies showed that detailed and distributed models can be effectively used to improve flood control in on-line optimization. However, because distributed hydrological models are generally difficult to implement and can be time consuming to run, only a handful of studies have explored the use of such models for long-term reservoir management, however, with encouraging results. For example, Kim *et al.* (2007) found that an on-line SSDP using forecasts built with the SSARR rainfall-runoff model was superior to an off-line SSDP with historical inflow time series for maximizing power production and minimizing downstream shortages. Pianosi and Soncini-Sessa (2009) later obtained an improvement in system performance (especially for flood control) by using a one-step-ahead heteroscedastic predictor in a partial open-loop feedback control policy (POLFC) fed by forecasts built with a physically based hydrological model. Since then, other on-line optimization methods have been used. Pianosi and Ravazzani (2010) compared hydrological forecasts built with a LOG-ARMAX model and a distributed physically based hydrological model (FEST-WB) on a short-term management

horizon (a few days). Using a non-linear Model Predictive Control (MPC) scheme fed by forecasts built with a data-driven rainfall-runoff model, Goedbloed *et al.* (2011) maintained the desired water level in a multi-use urban reservoir in Singapore while minimizing the pumps usage during high-tide events. Raso *et al.* (2014) also suggested that a Tree-Based Model Predictive Control (TB-MPC) using forecasts built with the semi-distributed HBV hydrological model was preferable over simple stochastic programming, allowing better results for both energy production and flood control in a multi-reservoir system in Uruguay. Finally, when comparing the performance of three on-line optimization methods (*i.e.* SDP, Sampling-SDP and Scenario Tree Reduction) using forecasts built with the HSAMI hydrological model (Fortin, 2000) over a Canadian multi-reservoir system, Côté and Leconte (2015) showed that under-dispersion of the ESPs affects the performance of scenario-based approaches more than SDP.

Based on the aforementioned studies, it appears that on-line optimization using streamflow forecasts based on a more detailed hydrological representation of the actual state of the water system should allow an improvement of the management during extreme events and, depending on the system formulation, a possible augmented power production. This is probably related to the fact that hydrological modeling with explicit and detailed representation of the current hydrological state of the system reduces the uncertainty of long-term volumes of streamflow forecasts (Faber and Stedinger, 2001). However, to our knowledge, no study investigated so far on the usefulness of hydrological modeling to directly compute a suitable hydrological variable for coping with uncertainties of future inflows in on-line optimization. Rules updated on-line using, for instance, snow information obtained from hydrological modeling with a detailed representation of snow processes, could allow a reduction of the uncertainty of the inflow forecasts and improve management results.

This paper presents a case study on which an on-line SDP testbed is implemented using streamflow forecasts produced with a deterministic and semi-distributed hydrological model that represents the snow processes with a semi-physical degree-day method. A general description of the case study reservoir system is detailed in the next section, including management constraints and problem formulation. A presentation of the off-line optimization model and the on-line testbed is then presented, with a description of the different hydrological

variables used to assess the comparison. Results are presented and analyzed in the last part of the paper, with some conclusions and recommendations to water resources managers.

4.4 Nechako Reservoir System and Management

To verify the performance of using snow information to update policies with SDP and ESP, we used the single reservoir system of the Nechako Reservoir in British Columbia, Canada. Managed by Rio Tinto, a multinational aluminum producer, this system is characterized by large streamflow volumes in spring due to snowmelt. The Nechako Reservoir is the water supply of the Kemano powerhouse, which has an installed capacity of 1000 MW and powers the Kitimat aluminum smelting facilities. The average reservoir surface area is 900 km², while the watershed covers 14 000 km². Climate of the watershed is characterized by contrasted precipitation regimes. The western part of the watershed, which is dominated by mountains and steep slopes, receives an average of 2000 mm/year of total (rain and snow) precipitation, while the eastern part, characterized by plateaus, receives 400 mm/year. Average inflows into the Nechako sub-basin is 200 m³/s (Desreumaux *et al.*, 2014). During extreme years, the Nechako system is facing tremendous amounts of snowfall. As an example in 2007, mountains on the western part of the watershed have recorded a peak of snow water equivalent (SWE) of more than 1200 mm, which caused, during the snowmelt period, major floods and significant damages in the town of Vanderhoof located about 200 km downstream on the Nechako River.

Hydropower generation and maintenance of suitable streamflow for wildlife and flood protection are the main objectives of the Nechako Reservoir system. Figure 20 illustrates a schematic representation of the components of the system to operate. Water used for production leaves the Nechako Reservoir (s_1) through a 16 km tunnel carved through a mountain before reaching the Kemano powerhouse (u_1). Water from the powerhouse leaves the system to the west until it reaches the Pacific Ocean. Unproductive spilled water (v_1) flows to the east through the Skins Lake spillway. It then reaches Cheslatta Lake (s_2), an uncontrolled lake that discharges into the Nechako River. Reaching the town of Vanderhoof, the Nechako River (v_3) receives uncontrolled water coming from Cheslatta Lake (v_2) and natural inflows from the Nautley River (q_3) before ultimately flowing into the Fraser River. Natural inflows therefore are separated on

three different sub-basins, the Nechako sub-basin (q_1), the Cheslatta sub-basin (q_2) and Nautley sub-basin (q_3).

As shown by Desreumaux *et al.* (2014), the storage capacity of Nechako Reservoir is limited. Optimizing hydropower production while reducing the risk of flooding events in Vanderhoof and meeting maximum and minimum streamflow for wildlife is a challenging issue. These constraints force the system's manager to try meeting two opposing objectives. As one objective tends to favor higher levels in the reservoir to increase production, another tends to favor lower reservoir levels to mitigate the environmental and socio-economic consequences from incoming snowmelt freshet. Management constraints cannot all be met at all time. Some events in the last 15 years have proven to be good examples of this challenge. For instance, as exposed by Desreumaux *et al.* (2014), in the year 2007 streamflow at Vanderhoof exceeded the flooding limit, and in 2001 and 2002 hydropower production fell under the minimum allowed value at many times.

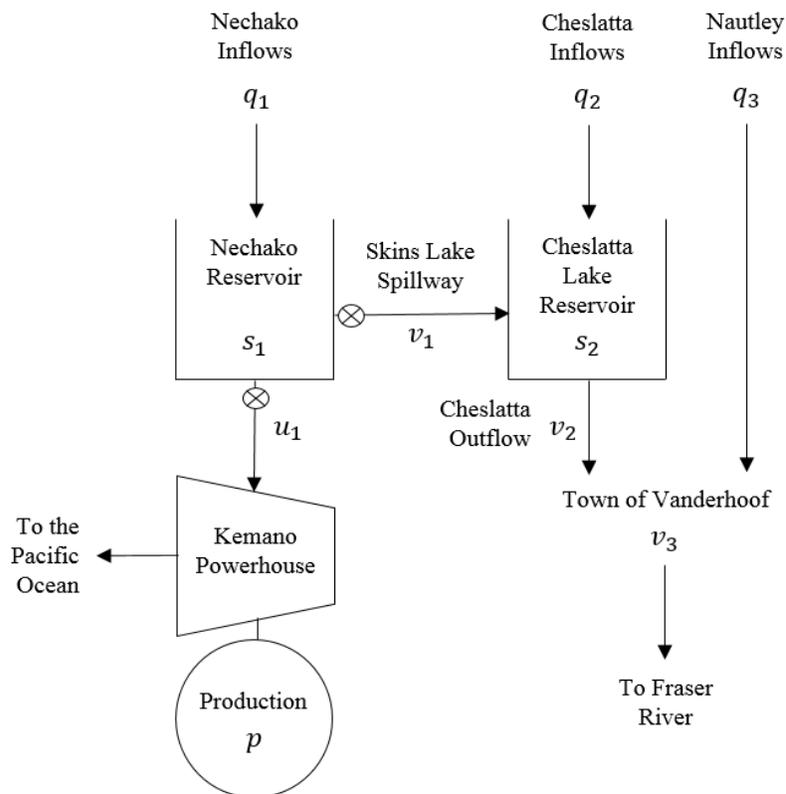


Figure 20 - Schematic diagram of the Nechako Reservoir system

4.5 Natural inflows modeling

Natural inflows on the main part of the watershed (Nechako sub-basin) were simulated with the hydrological model CEQUEAU 4.0 (Morin & Paquet, 2007). CEQUEAU is a conceptual and spatially distributed model which has been designed to take in account the temporal and geographic variations of the state variables of a watershed (such as snow water equivalent, soil moisture, water table, etc.). CEQUEAU has been used in Québec and elsewhere for many and varied water management studies (*e.g.* Couillard and Cluis, 1980; St-Hilaire *et al.*, 2000; Charbonneau *et al.*, 2009; and Hendrickx and Sauquet, 2013).

In CEQUEAU, a watershed is represented as an assemblage of square tiles, or cells. The model generates total runoff in each tile by running a water balance to interconnected ‘reservoirs’ which represent unsaturated soil, groundwater, lakes, and wetlands storages. Runoff produced is then routed to downstream tiles by considering water divides in the watershed until reaching the watershed outlet. Required meteorological inputs are time series of maximum and minimum temperatures, as well as solid and liquid precipitations. Snow melt is simulated using a degree-day index similar to the approach described in the Snow Hydrology Report of the US Army Corps of Engineers (USACE, 1956). Potential evapotranspiration is simulated by a modified Thornthwaite method (Thornthwaite, 1948). Infiltration is calculated using an infiltration rate that can be specified for each cell considering soil properties.

Natural inflows on Nechako sub-basin (q_1) were simulated using a daily time step. A total number of 644 tiles, each having 25 km², was used to represent the sub-watershed. Maximum and minimum daily temperatures and daily liquid precipitation from seven meteorological stations were used as input to the model. A total of 55 years of data (1957 to 2012) was used in this study. Three of these stations are also equipped with snow pillows, allowing observations of the snow water equivalent (SWE) of the snowpack. These observations gave additional information for calibrating the snow model in CEQUEAU. Interpolation based on relations with the three closest stations and the differences in altitude was performed to ensure a well-discretized representation of the meteorological data over the whole basin.

Manual calibration of the CEQUEAU parameters was done using reconstructed streamflow data, as there were no hydrometric stations. The reconstructed flows were obtained by carrying

a water mass balance at the outlet of Nechako Reservoir and Cheslatta Lake. Calibration was done over 55 years of reconstructed streamflow data and 20 years of SWE observations with the objective of maintaining yearly water volumes and major streamflow peaks.

The contribution of the Nechako sub-basin (spills from Skins Lake) to the Nechako River historically represented about 67 % of the total water budget in Vanderhoof. Because no hydrological model was calibrated yet on the two other sub-watersheds, daily natural inflows of Cheslatta sub-basin (q_2) and Nautley sub-basin (q_3) were computed as a fraction of the natural inflows of the Nechako sub-basin using basin coefficients, *i.e.* assuming perfect cross-correlation between sub-basin flows. In other words, it was assumed that the meteorological and hydrological conditions are similar from one site to another. The inflows at a given site were therefore calculated using Eq. (29), with the basin coefficients $\vartheta_{i,t}$ estimated from historical data.

$$q_{i,t} = \vartheta_{i,t} \times q_{1,t} \quad (29)$$

4.6 Optimization model

The objective of the reservoir management for the Nechako system was to maximize hydroelectricity production while respecting various management constraints. The objective function is written as:

$$Max E \left[\sum_{t=1}^T B_t(\mathbf{s}_t, u_t, \mathbf{v}_t, \mathbf{q}_t) \right] \quad (30)$$

where B_t is the benefit function that expresses the hydroelectricity production P_t , weighted by a penalty function β_t established for respecting the management constraints:

$$B_t(\mathbf{s}_t, u_t, \mathbf{v}_t, \mathbf{q}_t) = P_t(s_{1,t}, u_t) - \beta_t(\mathbf{s}_t, P_t, \mathbf{v}_t, \mathbf{q}_t) \quad (31)$$

In these equations, $\mathbf{s}_t = (s_{1,t}, s_{2,t})$ is the water volumes accumulated in Nechako Reservoir and Cheslatta Lake, u_t is the water used for production; $\mathbf{v}_t = (v_{1,t}, v_{2,t}, v_{3,t})$ is the water released at the outlet of Nechako Reservoir, exiting Cheslatta Lake and flowing in the Nautley River at

Vanderhoof, respectively; and $\mathbf{q}_t = (q_{1,t}, q_{2,t}, q_{3,t})$ is the volume of uncontrolled inflows in each sub-watershed.

Physical constraints on the system were modeled as follows:

$$s_{1,t+1} = s_{1,t} + q_{1,t} - u_{1,t} - v_{1,t} \quad (32a)$$

$$s_{2,t+1} = s_{2,t} + q_{2,t} + v_{1,t} - v_{2,t} \quad (32b)$$

$$v_{2,t} = G(s_{2,t}) \quad (32c)$$

$$v_{3,t} = v_{2,t} + q_{3,t} \quad (32d)$$

$$\omega_{P_t}^{min} \leq P_t(s_{1,t}, u_t) \leq \omega_{P_t}^{max} \quad (32e)$$

$$\omega_{s_{1,t}}^{min} \leq s_{1,t} \leq \omega_{s_{1,t}}^{max} \quad (32f)$$

$$\omega_{v_{1,t}}^{min} \leq v_{1,t} \leq \omega_{v_{1,t}}^{max} \quad (32g)$$

where $G(\cdot)$ is the function of the rating curve for the outflow of Cheslatta Lake, $\omega_{P_t}^{min}$ and $\omega_{P_t}^{max}$ are the limits in the production of the powerhouse (smelter minimum and surge shaft maximum charge), and $P_t(\cdot)$ is the Kemano powerhouse generating function. $\omega_{s_{1,t}}^{min}$ and $\omega_{s_{1,t}}^{max}$ are the minimum and maximum storage of Nechako Reservoir. $\omega_{v_{1,t}}^{min}$ and $\omega_{v_{1,t}}^{max}$ are the minimum and maximum releases to respect at the Skins Lake Spillway to ensure ecological integrity along the Nechako River by limiting ice jam formation during the winter and for protecting fish habitat during the rest of the season.

Because all of these constraints can actually not be met at all time, managers accept to violate some of these constraints during short periods of time. To insure minimizing of the exceedances, a penalty function β_t was applied to the benefit function in Eq. (33) when the constraints are violated. A total of five management limits ω_x were allowed to be exceeded: the minimum powerhouse production ($\omega_1 = \omega_{P_t}^{min}$), the minimum and maximum levels of the Nechako Reservoir ($\omega_2 = \omega_{s_{1,t}}^{min}$), ($\omega_3 = \omega_{s_{1,t}}^{max}$), the flood limit at the outlet of Cheslatta Lake ($\omega_4 = \omega_{v_{2,t}}^{max}$), and the flood limit in the Nechako River at Vanderhoof ($\omega_5 = \omega_{v_{3,t}}^{max}$). Any exceedance

of one of these five limits was multiplied by a coefficient θ_x and powered by an exponent α_x . The resulting penalty function β_t can be expressed as:

$$\begin{aligned} \beta_t = & \theta_1(\omega_1 - P_t)^{\alpha_1} + \theta_2(\omega_2 - s_{1,t})^{\alpha_2} + \theta_3(s_{1,t} - \omega_3)^{\alpha_3} \\ & + \theta_4(v_{2,t} - \omega_4)^{\alpha_4} + \theta_5(v_{3,t} - \omega_5)^{\alpha_5} \end{aligned} \quad (33)$$

The optimization problem was solved using SDP. This method provides a reservoir management policy, which is a feedback solution that gives a water release decision (u_t and v_t) at each stage (*i.e.* management time step t), based on the state of the reservoir system (for example, the reservoir water levels). A 3-day management time step was used in this study.

In single reservoir optimization, SDP is one of the most effective techniques because it is well suited for non-linear problems and allows finding a global optimal policy of a stochastic optimization problem by solving a sequence of smaller ones (Loucks *et al.*, 2005). However, because it uses state and input variables that must be discretized, this method suffers of the curse of dimensionality when applied to larger systems (Labadie, 2004). As the number of reservoirs of the Nechako system is small enough (one controlled reservoir and one uncontrolled lake), a classical SDP method can be applied. The state variables were the reservoir storages s_t and a hydrological variable h_t , that included additional information for tackling uncertainty of the future inflows (see the following section for more details on the hydrological variable used in our formulation). Assuming that the inflow on the first period was known, our algorithm evaluated the water value function by solving backward in time the following recursive equation:

$$f_t(s_t, h_t) = E_{q_t|h_t} \left(\max_{u_t, v_t} \left\{ B_t + E_{h_{t+1}|h_t, q_t} [f_{t+1}(s_{t+1}, h_{t+1})] \right\} \right) \quad (34)$$

subject to constraints in Eq. (32), where $B_t(\cdot)$ is the actual reward function, see Eq. (31); and f_{t+1} is the expected reward for all future periods. The operating policy was then given by:

$$[u_t, v_t] = \underset{u_t, v_t}{arg. max} \left\{ B_t + E_{h_{t+1}|h_t, q_t} [f_{t+1}(s_{t+1}, h_{t+1})] \right\} \quad (35)$$

To allow the policy to be solved for a finite number of discretization points, the expectation term $E_{q_t|h_t}$ in Eq. (34) was evaluated using a set of K discretization points, giving:

$$f_t(s_t, h_t) = \sum_{j=1}^K \max \left\{ B_t + E_{h_{t+1}|h_t, q_t} [f_{t+1}(s_{t+1}, h_{t+1})] \right\} \times Pr(q_t = q_{j,t} | h_t) \quad (36)$$

As proposed by Desreumaux *et al.* (2014), the model for the discretization of h_t was based on an empirical distribution of the values in the center (between the cumulative probabilities of 5% and 95%) and Pareto distributions in the lower- and upper-tails. Discretized values $h_{t,j}$ were calculated on seven ($J = 7$) specific points of the distribution for probabilities of [0.025; 0.100; 0.250; 0.500; 0.750; 0.900; 0.975]. Transition probabilities for the prediction of streamflow volume $q_{t,i}$, given a specific hydrological variable h_t , were evaluated based on a linear regression between both variables:

$$q_t = b_{t,0} + b_{t,1}h_t + \epsilon_t \quad (37)$$

Coefficients $b_{t,0}$ and $b_{t,1}$ were calculated with the least squares method. Assuming that the error term ϵ_t was normally distributed, discretized values of $q_{t,i|j}$ was set by using an error term for seven ranges of probabilities (i.e.: $I = 7$) [0-0.05; 0.05-0.15; 0.15-0.35; 0.35-0.65; 0.65-0.85, 0.85-0.95; 0.95-1.00]. Transition probabilities for the value of h_{t+1} given specific values of q_t and h_t were based on a multivariate linear regression with residual values \mathfrak{z}_t respecting a normal distribution criterion:

$$h_{t+1} = c_{t,0} + c_{t,1}q_t + c_{t,2}h_t + \mathfrak{z}_t \quad (38)$$

The distribution model of \mathfrak{z}_t was based on an empirical distribution with Pareto distributions for lower- and upper-tail cumulative probabilities of 10% and 90% respectively. For each $(q_{t,i}|h_{t,j})$ combination, discretized values $h_{t+1,k|i,j}$ were calculated with seven specific points ($K = 7$) of the distribution of \mathfrak{z}_t for probabilities of [0.025; 0.100; 0.250; 0.500; 0.750; 0.900; 0.975].

4.7 Hydrological variables

Three different hydrological variables were tested through the simulations with both off-line and on-line methods.

The first hydrological variable tested was an auto-regressive inflow prediction model. As it has been often used in various reservoir systems (Saad *et al.*, 1996; Côté *et al.*, 2011; Ethkin *et al.*, 2015), this model was used as a reference model. As shown by Turgeon (2005), when optimizing a reservoir system on a relatively short time step, inflows on the period t is not only correlated with inflows on the period $t - 1$, but also with those at $t - 2$, $t - 3$, ..., $t - k$. It was therefore possible to select a hydrological variable representing inflow prediction in an order- k autoregressive model (AR- k model) defined by the following equation:

$$h_t^{AR-k} = \varphi_0 + \sum_{i=1}^k \varphi_i q_{t-i}^{normalised} \quad (39)$$

where φ_i are the coefficients of the autoregressive model. In the case of the Nechako reservoir system, Desreumaux *et al.* (2014) showed that, because it is better to prevent flood events at Vanderhoof, an order-5 autoregressive model ($k = 5$, *i.e.*: 15 days) is preferred over a simple AR-1 model ($k = 1$, *i.e.*: 3 days).

The second tested variable was, based on the experience on the Nechako reservoir system (Desreumaux *et al.*, 2014), the maximum snow water equivalent value encountered so far in the season (MSWE). Even though the snow water equivalent (SWE) has a good correlation with the runoff during the snow accumulation period, it does not include enough temporal information. At a certain point in time, the snow is already melted but its effect on the runoff has not disappeared. Desreumaux *et al.* (2014) also showed that, to maintain the information on streamflow volume intensities through the melting period, a good alternative was to use the MSWE between the time snow started to accumulate and the current period t when the water release decision is made. Their results showed that keeping the information about the MSWE recorded yielded the best management policy for the Nechako system.

$$h_t^{MSWE} = \max(SWE_1, \dots, SWE_t) \quad (40)$$

To be a useful hydrological variable in the on-line method, the information used to evaluate the transition probabilities must have a distribution at each time step, in order to allow some correlation with the incoming inflow. In off-line optimization, the *a priori* discretization of the MSWE variable and the inflow variable, all based on historical traces, allows establishing a correlation between both variables. This approach gives the probability to see a specific inflow forecast realized, based on the current value of the MSWE. However, in the on-line method, all the scenarios projected start with the same actual state (including the same MSWE so far). Reaching a certain point in time (i.e.: right after the beginning of the snowmelt), each forecast of the incoming MSWE value for the rest of the year predicts the same value because each meteorological forecast will eventually result in a steady decrease in SWE. Hence the MSWE distribution collapses to a single value, which is the MSWE value at the beginning of the forecast period. Figure 21 shows the standard deviation of the MSWE forecast on each period in a year. Starting from mid-May, the standard deviation of the variable reaches zero, meaning that, starting from this point and until the end of every year, every inflow forecast has the same probability of occurrence. Rules are then simply optimized with the average expectation of the water value for the rest of the season, without giving any particular weight on the next time step inflow that is more probable to occur.

In order to take advantage of the current MSWE information while still having some distribution to feed in the optimization process, we also tested a third hydrological variable that combines the maximum snow information and the correlation with the past inflows.

$$h_t^{Combined} = h_t^{AR5} + h_t^{MSWE} \quad (41)$$

By doing so, adding inflow information from the AR5 model (that is based on already known information on the instant one would update the rules) to the MSWE value created some variability when the snow did not have any predictive power.

The choice of simply “adding” the value of both variables (h_t^{AR5} and h_t^{MSWE}) might be imperfect because they were not normalized in the same way and were not expressed with the same units. The MSWE variable was expressed in mm of water while the AR5 variable was obtained by a weighted sum of the logarithm values of the inflows in m³/sec. Note, however, that the magnitude of both variables added here are quite different. Normalized AR5 values vary from

3.9 to 7.2 while MSWE vary from 0 to 1200 mm. The impact of the AR5 value over the MSWE was then mostly effective at the beginning of the management year (when there is no or only small amount of snow) and after the MSWE peak has been reached (and therefore does not have any predictive power). Even if this simple combined variable does not have any particular physical sense, it has been applied here as a straightforward way to test if a variable that is suitable in off-line method (MSWE) is still convenient in on-line method, as long as its predictions have a distribution.

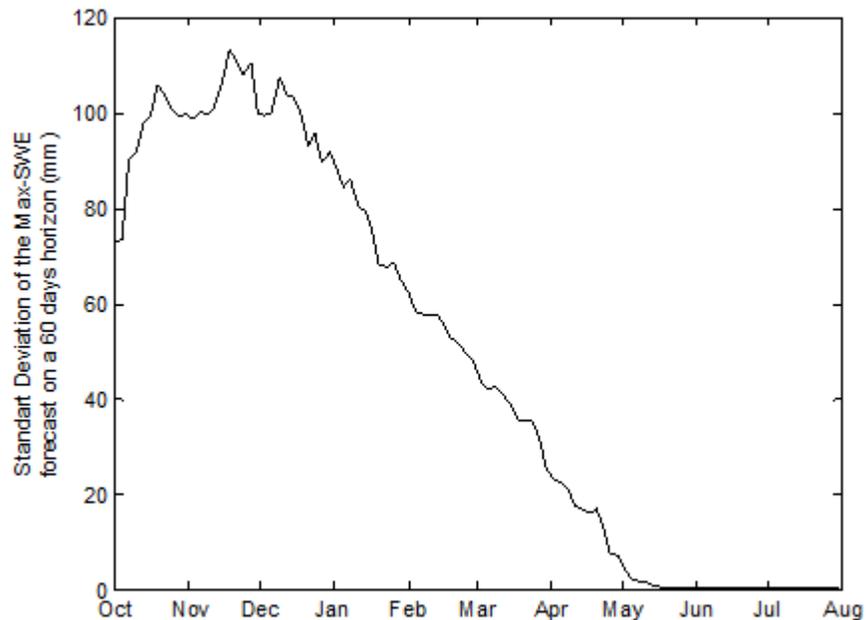


Figure 21 - Standard deviation of the MSWE variable through the year (forecast on a 60-day horizon)

4.8 On-line updating testbed

Instead of using historical data to optimize the policy only once, the on-line testbed updated the policy time-step, using forecasts of the future inflows (and future hydrological variable) that were based on the current hydrological state of the system. Following the update of the policy, the testbed applied only the decision for the next time step.

Before updating the management policy based on current information, a long-term water value dataset was calculated using the off-line method. The values of the parameters in the objective

function used in the calculation of the long-term water values were set at the same values used in the corresponding optimal off-line method.

On the Nechako reservoir system, initial conditions of the hydrological model on October 1st do not have a large impact on the overall volume of inflows of the remaining simulated year. Modifying the initial conditions on October 1st has influence on the inflow simulations mostly until early January ($t = 30$ with a 3-day time step). After this period, whatever the year considered, the standard deviation of the inflow simulations under various initial conditions on October 1st is lower than $10 \text{ m}^3/\text{s}$ until the end of June ($t = 100$). Figure 22 compares average yearly inflows on the Nechako sub-basin and the standard deviation traces of the inflow simulations based on different initial conditions on October 1st (solid lines, one trace for every simulated year). Hence, inter-annual inflow correlations were considered negligible on the Nechako reservoir system. In other words, the preceding year conditions are not related to the inflow volume on a specific year. For this reason, whatever the period in the year on which the management policy was updated, the long-term water value data set was always calculated for the upcoming October 1st. This means that the length of the forecast scenarios was not always the same. This was done as a way to simplify calculations in the on-line testbed.

On each 3-day management time-step, daily ensemble streamflow predictions were generated using the CEQUEAU hydrological model calibrated over the Nechako sub-basin. By considering the current hydrological state of the watershed as simulated by the model (*i.e.*, soil moisture, snow water equivalent, etc.), 53 scenarios of forecasted daily streamflow for the remaining year were calculated using 53 historical meteorological time series (from 1960 to 2012). Because the time step used to develop the management policy in this study differs from the hydrological modeling time step, daily streamflow were aggregated at a 3-day time step through an arithmetical averaging procedure to maintain compatibility with the time step used to generate the policy. The method used to calculate transition probabilities considered an equal probability of occurrence for each of the 53 scenarios forecasted. These transition probabilities were calculated using the same method as described earlier.

Inflow time series, hydrological time series and transition probabilities were then used within the SDP for optimizing and updating the management policy until the last period of the year ($t = T$). As mentioned above, only the first decision was actually implemented.

The "real" inflow of the current time step (simulated by the hydrological model on the Nechako sub-basin) was then applied. Based on the decision that was implemented using the updated policy, a water balance was calculated on the water system (Cheslatta Lake and water volume downstream in the Nechako River) and the testbed was ready for the next time-step.

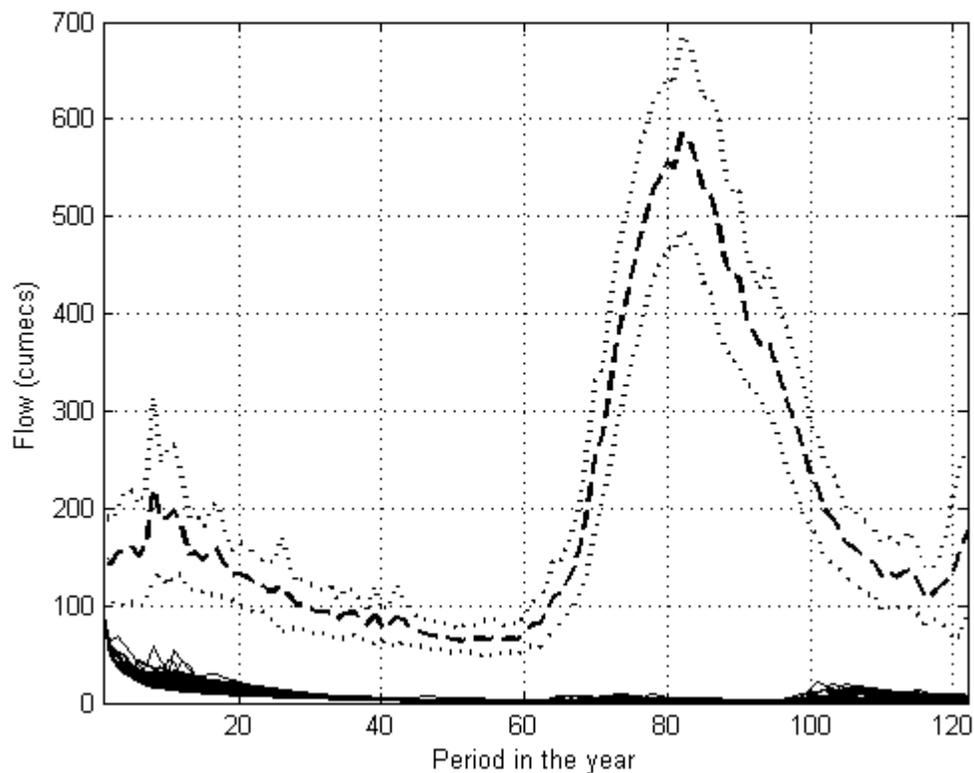


Figure 22 - Average yearly inflows (thick dashed line, with dotted lines for standard deviation) compared to the standard deviations of the impact of initial conditions of October 1st (period $t = 1$) over the simulated inflows for the rest of the year

4.9 Results and discussion

4.9.1 Calibration results

In order to compare the different approaches, a manual calibration was done to the penalty parameters of the objective function of each model. The set of parameters chosen for each model allowed meeting similar maximum and minimum values for reservoir levels and similar values for maximum flow at Vanderhoof and Cheslatta Lake. By doing so, even if the management behavior changes were model dependent, results were nevertheless constrained by the same boundaries, which allowed us to compare the methods on a similar basis.

Results of the calibration of the objective function with the off-line models have shown to be sensitive to the parameters value. Moreover, changes in the parameters value induced a larger impact on the management results with the off-line optimized rules than with the on-line updated ones. Sensitivity has been addressed by exploring a larger domain of parameters and by applying finer discretization of the parameter space for the off-line mode as compared to the on-line mode. This is because of the lower sensitivity to changes in parameters for the on-line, as compared to the off-line, method. This choice was also motivated by the fact that simulations within the on-line updating-testbed were more time consuming than the simple application of the off-line rules.

Tableau 2 presents the values of the parameters chosen for each approach. Parameters retained were those which resulted in reaching similar values for the four criteria used in the calibration process (*i.e.* minimum and maximum water level in the Nechako Reservoir and maximum river flow at the outlet of Cheslatta Lake and Vanderhoof). With regards to the calibration process exposed above, the on-line results presented here could probably be improved by exploring the parameters space with a finer discretization. However, and as explained above, it was found that the objective function in the on-line mode was less sensitive to changes in the parameter values of their penalty terms as compared to the off-line mode. Therefore, we believe that the results obtained in this paper provide a good account of the behavior and potential of the updating method proposed.

Parameters for off-line approaches were quite different depending on the hydrological variable introduced in the models. However, whatever the hydrological variable used in the on-line approach, the four management criteria (maximum and minimum levels in the reservoir and maximum river flow at Cheslatta Lake and Vanderhoof) were respected when using similar parameters values. Desmeuraux *et al.* (2014) already mentioned that parameters needed to be significantly adjusted when the hydrological variable used for optimization was changed in their off-line approach. Similarity of sets of parameters used here while using different hydrological variables in on-line approach support, however, the idea that optimization over well-constructed forecasts reduce the necessity of exploring a large domain for the parameters of a multi-objective management problem. This suggests that the parameters in the objective function tend to compensate for deficiencies in forecasting of the inflows.

Tableau 2 - Comparison of the chosen set of αx penalty parameters for each simulation

	Classical off-line approach			On-line updates approach		
	AR5	MSWE	Combi.	AR5	MSWE	Combi.
Exceeding the maximum level in Nechako reservoir (α_1)	1.50	1.80	1.80	0.80	0.80	0.80
Exceeding the minimum level in Nechako reservoir (α_2)	1.40	1.10	1.20	1.80	1.80	2.15
Exceeding the flood limit in Vanderhoof (α_3)	1.20	1.60	1.10	1.20	1.20	1.20
Exceeding the flood limit in Cheslatta Lake (α_4)	2.10	2.00	2.00	1.60	1.60	1.60

4.9.2 Testbed comparison with hydrological variables

Tableau 3 presents global results of the simulation for the three hydrological variables tested in off-line and on-line methods (order-5 auto-regressive model, maximum snow water equivalent encountered in the season and a combination of both variables).

As expected, MSWE performed better than AR5 hydrological variable with the classical off-line method. Off-line/MSWE rules produced more hydropower while reducing unproductive

spills and flood events, when compared to off-line/AR-5 rules. Results with the simulated inflows performed here support findings by Desreumaux *et al.* (2014) using real observed inflow traces. However, using the combined hydrological variable (*i.e.* AR5 + MSWE) in off-line mode does not improve the results (less production and more unproductive spills and flood events) when compared to the performance of the MSWE variable.

Tableau 3 - Simulation results when applying management rules for 1960-2012

	Off-line rules			On-line rules updated on ESP		
	(AR5)	(MSWE)	(Combi.)	(AR5)	(MSWE)	(Combi.)
Mean production ^a	0,907	0,919	0,918	0,917	0,916	0,919
Reservoir mean level (ft)	2794,0	2794,6	2794,9	2794,5	2794,3	2795,0
Unproductive spills (hm ³)	26 541	23 020	23 368	23 530	23 946	22 992
Critical events in reservoir ^b (days)	89	48	63	81	60	165
Flood at Cheslatta Lake (days)	42	9	12	6	15	9
Flood at Vanderhoof (days)	60	27	39	24	24	24
Total flood volume ^c	2.95	1.00	1.71	1.02	1.35	1.04

^aMean production values are presented in relative value from the maximum value.

^bCritical event in Nechako Reservoir is considered when the level is higher than the maximum limit

^cTotal flood volume is calculated by adding flood volumes in Vanderhoof and Cheslatta Lake and relative values are expressed as a fraction of the total flood volume with the off-line/MSWE method.

With respect to the sets of parameters chosen, results with on-line approach showed some improvements with the AR5 and the combined AR5-MSWE hydrological variable. On-line results with the AR5 model are better for mean production, unproductive spills and floods when compared to the off-line/AR5 model. These results correspond to the findings obtained in previous studies (*e.g.* Pianosi and Ravazzani, 2010; Galelli *et al.*, 2014) using other autoregressive models. The results obtained here with the on-line/AR5 method reached values close to the ones obtained with the off-line/MSWE method. Results obtained with the MSWE variable in on-line method were worse than in off-line. This is because the lack of distribution in the MSWE projections in on-line method reduced the effectiveness of this hydrological variable.

On the other hand, results with the combined hydrological variable (AR5 + MSWE) using the on-line method only showed marginal improvement when compared to results obtained with the off-line method using MSWE as the hydrological variable. On a global perspective, only unproductive spills were significantly lower with on-line/combined method than with the off-line/MSWE method (according to the Wilcoxon-Mann-Whitney test with p -value < 0.05). Mean productions were statistically similar (difference in neither distribution is significant according to the Wilcoxon-Mann-Whitney test with p -value = 0.125 and differences < 3 MW), while flood events in Vanderhoof were slightly reduced with the on-line/combined method, but total flood volumes were higher. The decrease in unproductive spills and flood events came, however, at the expense of a higher number of critical events. These critical events indicate the number of days when the level in the reservoir was over the maximum limit. Although we believe that our calibration strategy of the on-line model did not significantly affect these findings and therefore the comparison between the off-line and the on-line methods, it is recommended in future studies to develop a more systematic and thorough calibration method to fully explore the parameter space of the objective function. Such calibrated model could allow the updated rules to further improve results obtained in this study.

Observations on the timing of the unproductive spills and the flood events help explain where and why the on-line/combined method differ from the off-line/MSWE method. Figure 23 presents the difference of total unproductive spills and flood volumes between the on-line/combined and off-line/MSWE methods, for each of the 122 time periods (t) over the entire simulation (53 years). A value near zero on the y-axis means that the total amount of water for unproductive spills (upper graph) or flood volumes (lower graph) is similar in both methods on that specific period. Negative values indicate a higher amount of water for off-line/MSWE and positive values indicate a higher amount of water for on-line/combined. Higher unproductive spills in the on-line/combined method were located around three specific periods, $t = 65$ (April 11th), $t = 92$ (July 1st) and $t = 108$ (August 18th) while those with the off-line/MSWE method were located at the end of the winter season ($t = 28: 57$) and at various points during the warmer season.

The first peak of higher unproductive spills with the on-line/combined method, around April 11th ($t = 65$), happened in 12 years out of 53. Most of them are years in which there was a high snow accumulation combined with a high level in the reservoir at the beginning of the winter.

The second peak, around July 1st ($t = 92$), appeared mainly in 4 specific years where the snowmelt period lasted longer than usual because of extreme snow accumulations in the winter (1976) or particularly slow snowmelt period in May or June (1962, 1972 and 2002).

The last peak, around August 18th ($t = 108$), happened in three specific years with high-simulated inflows in the second part of August. High inflows on Nechako sub-basin in August were caused, on these three years, by the end of the particularly late snowmelt in the mountains. In the on-line/combined method, the hydrological model used for the elaboration of the ESPs on the Nechako sub-basin took in account a large accumulation of water in the subsurface reservoir storage of the CEQUEAU model. ESPs considered in the on-line optimization then predicted higher expected inflows for the incoming rain events, forcing more unproductive spills in order to keep low reservoir levels at the end of the year.

Finally, four of the five larger flood events with the off-line/MSWE method (negative bars on the lower graph on Figure 23) closely followed larger unproductive spill events generated with this method (negative bars on the upper graph) However, higher flood events for the on-line/combined method occurred around $t = 74$ (May 8th), almost 4 weeks after the peak of unproductive spills, and at $t = 87$ (June 16th) when unproductive spills in both methods were similar. These two flood events in on-line/combined method happened during 1976, the year with the highest inflow volume.

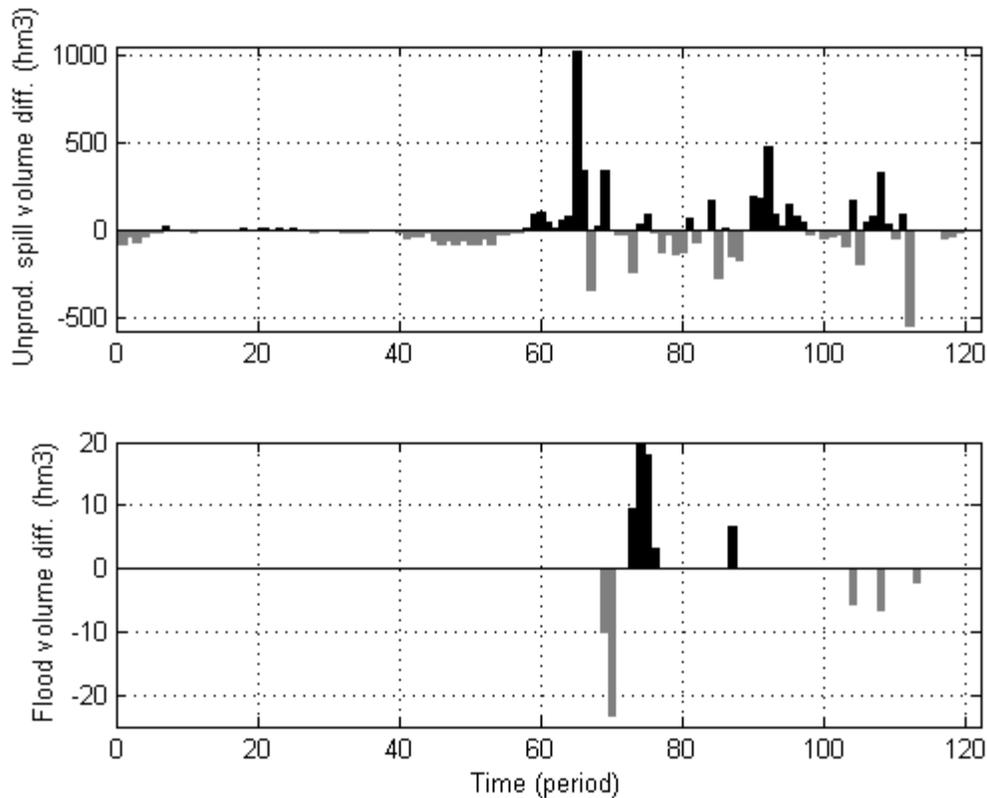


Figure 23 - Differential unproductive spill volumes (up) and flood volumes (down) on every period in the year between on-line (Combined) and off-line (MSWE) methods

4.9.3 Testbed analyses over the yearly inflow volumes

Tableau 4 compares models results over years of low, moderate, high, and extreme inflow volumes with the off-line/MSWE and on-line/combined methods. Based on the inflow volume of each of the 53 years simulated on the Nechako sub-basin, four set of years of equal dimensions have been chosen for the analysis (*i.e.* the difference between the higher and the lower inflow volume value of each class is the same). ‘Extreme’ years included 1976 and 2007, where particularly high inflows were simulated by the hydrological model. The set of yearly ‘high’ inflow volumes included 10 different years, while the ‘moderate’ set included 22 years, and the ‘low’ set included 19 years.

Tableau 4 - Comparison of the management results using the best hydrological variable in off-line and on-line methods based on the yearly inflows

Optimiz. method (Hydro. var.)	Yearly inflows	Mean production ^a	Reservoir		Critical events ^b (days)	Unprod. spills (hm3)	Flood volume (rel ^c)
			mean level (ft)				
Off-line (MSWE)	Extreme	0,966	2795,1		12	5 208	0,68
Off-line (MSWE)	High	0,972	2796,4		36	13 179	0,32
Off-line (MSWE)	Moderate	0,950	2795,0		0	4 562	0,00
Off-line (MSWE)	Low	0,851	2793,2		0	72	0,00
On-line (Combined)	Extreme	0,960 - 0.6 %	2795,1 + 0.0 %		36 + 200 %	5 885 + 13 %	1,04 + 53 %
On-line (Combined)	High	0,966 - 0.6 %	2796,5 + 0.0 %		51 + 42 %	12 998 - 1 %	0,01 - 98 %
On-line (Combined)	Moderate	0,945 - 0.5%	2795,5 + 0.0 %		78 N/A	4 109 - 10 %	0 N/A
On-line (Combined)	Low	0,859 + 0.9%	2793,7 + 0.0 %		0 N/A	0 - 100 %	0 N/A

^aMean production values are presented in relative value from the maximum value.

^bCritical event in Nechako Reservoir is considered when the level is higher than the maximum limit

^cFlood volume is calculated by adding flood volumes in Vanderhoof and Cheslatta Lake and relative values are expressed as a fraction of the total flood volume with the off-line/MSWE method.

During years of low inflow volumes (19/53 years), significant higher reservoir levels (p -value = 6.45×10^{-11} according to the Wilcoxon-Mann-Whitney test) with the on-line/combined method allowed a statistically non-significant improvement in production (+0.9%) when compared to the off-line/MSWE method. During years of low and moderate inflow volumes (41/53 years), updating rules using ESPs and the combined hydrological variable significantly reduced unproductive spills (p -value = 3.93×10^{-4}) despite significant higher reservoirs levels (p -value = 7.95×10^{-19}). The on-line/combined method also reduced the flood volumes (-98%) and of the unproductive spills (-1%, not statistically significant) during years of high inflow volumes (10/53 years), but causes 42% more critical events. However, during years of extreme inflow volumes (2/53 years), the rules updated with on-

line/combined method produced less energy (not significant), caused more unproductive spills (not significant), and more floods (not significant) than those optimized with the off-line/MSWE method.

Higher values with the on-line/combined method for unproductive spills and flood volumes in extreme years were mainly the result of a single year, 1976, where inflows during the snowmelt period are the highest of the entire simulation period. Figure 24 compares the management with the two models during this extreme year. The graphs show the evolution of the different variables spanning 2 years, from October 1st, 1975, to October 1st, 1977. The upper graph shows Nechako inflows and MSWE values, while the four lower ones show the evolution of the Nechako reservoir level (in feet), Skins Lake spills (m^3/s), production (in relative values from the maximum production), and river flow at Vanderhoof (m^3/s) for the off-line/MSWE method and the on-line/combined method.

Beginning in October 1975, the reservoir level was higher with the on-line/combined method than with the off-line/MSWE method. In December 1975, MSWE already reached values around 700 mm while the mean values are usually around 250 mm for this period of the year. Already anticipating a larger snowmelt volume than usual in the spring season, updated rules in on-line/combined method started unproductive spills ensuring enough reduction in the reservoir level. Later in February/March 1976, the rules optimized with the historical traces in off-line/MSWE started unproductive spills, causing similar river flows in Vanderhoof as with the online method. From April to June, negative bias on the predicted inflows with the historical traces used in the off-line/MSWE caused fewer spills and allowed lower floods in Vanderhoof. This choice, however, allowed the updated rules to end the management year (in October 1976) with a lower reservoir level, and therefore to cause fewer unproductive spills and less floods in the following year.

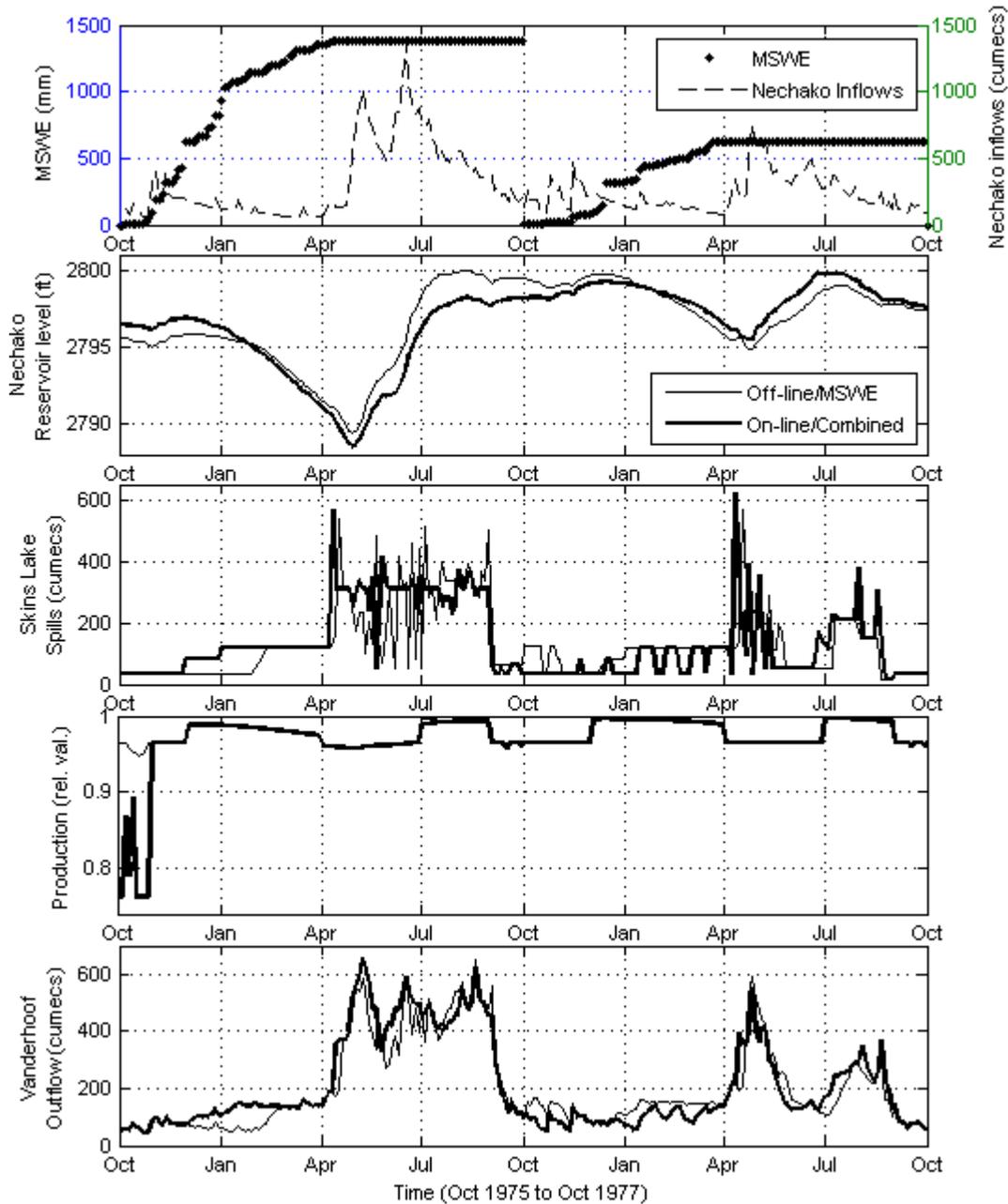


Figure 24 - Comparison of the management with off-line/MSWE and on-line/Combined methods over extreme year 1976

Note also that the 53 scenarios used in the off-line method corresponded to exactly the same 53 years of inflow implemented for the simulation of the management. Therefore, on specific years, such as in 1976 where the MSWE value is the highest of all of the scenarios considered in the off-line optimization, only one scenario corresponded to the actual value of the state variable. The expected value for the incoming inflows for the next periods then considered a perfect forecast. This was not the case in the on-line method, where the forecasts considered only a

perfect prediction for the next period and an estimation based on ESPs for the remaining year. On the extreme events of our simulation, as in 1976, the off-line method considered a perfect forecast, which would not be the case in a ‘real life’ situation. Note that the on-line/combined method reduced the unproductive spills and the flood events in all other cases where there was uncertainty on incoming inflows. Since no prediction system is perfect in a ‘real-life’ situation, updated rules with an on-line method similar to the one used in this testbed might allow better management on critical events as in 1976.

4.10 Conclusion

The objective of this study was to evaluate the potential of using an on-line procedure to update in real-time the management policy of a water resources system based on its actual hydrological state. The system analyzed was the Nechako system, located in Western Canada. This system is characterized by particularly large inflow volumes during the snowmelt season. Our results show that the use of an on-line policy updated with ensemble streamflow predictions (ESP) produced by the CEQUEAU hydrological model has potential to 1) reduce the necessity of exploring a large domain for the parameters of a multi-objective management; 2) reduce unproductive spills in general and particularly during years of low and moderate inflow volumes; and 3) reduce the risk of downstream flood events during years of high and extreme inflow volumes.

It may be argued that hydrological modeling does not represent in an exact way the real behavior of a watershed because some processes could be missed or not well represented, therefore impacting the results of the on-line (and also off-line) optimization method. It is true that hydrological modeling introduces additional uncertainties in inflow forecasts related to model structure and parameters. However, results of the testbed implemented in this study also show that a hydrological variable based on outputs of a hydrological model (like snow water equivalent) allows an improvement of the management when compared to a classical autoregressive model. These results provide evidence that hydrological modeling is a suitable tool for real-time reservoir management. Online optimization, by using forecasts related to the current hydrological state of the system, is able to consider an expected value of future decisions that is more related to the specific risks of the current decision. The use of hydrological modeling

with a detailed representation of the current hydrological state of the system (*e.g.* soil moisture, snow, etc.) allows to build, based on historical meteorological data, long-term forecasts that are related to the global current state of the water system and more likely to be closer to the probable future.

These conclusions also reinforce the importance of investing greater efforts in hydrological forecasting to improve reservoir system management. Better hydrological forecasts help reduce uncertainty of future inflows to the system and specific efforts need to be done to evaluate the impacts of the inflow model on the calibration of the objective function. Improvements in data assimilation, meteorological predictions and model calibration, as well as better knowledge about the current state of the system with remote sensing, are promising avenues for improving reservoir management.

4.11 Acknowledgements

The authors are thankful for the support offered by Rio Tinto in providing the data and the model used for this study and particularly Marco Latraverse for insightful analysis of the modeling approach. We also appreciate the cooperation of the *Centre Eau Terre Environnement* of the Québec *Institut national de la recherche scientifique* (INRS-ETE) in providing the CEQUEAU hydrological model and the Université de Sherbrooke in providing funding and material support. We also would like to thank the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for funding this research.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET ANALYSES COMPLÉMENTAIRES

5.1 Analyse de la variable hydrologique « PVAM »

Pour compléter les résultats du banc d'essai présentés dans l'article scientifique (voir Chapitre 4), les résultats de gestion obtenus avec la variable hydrologique de prévision du volume annuel médian (PVAM) sont présentés ici.

5.1.1 Comparaison de la variable hydrologique « PVAM » avec le banc d'essai

Le Tableau 5 présente une comparaison des résultats de gestion entre les simulations historique/ÉENM, prévisionnelle/Combo et historique/PVAM. De plus, les valeurs p entre les distributions de la simulation historique/ÉENM et les six autres simulations (historiques avec les variables AR5, Combo et PVAM et prévisionnelles avec les variables AR5, ÉENM et Combo) sont présentées au Tableau 6. En rouge et caractères gras, les valeurs $p < 0.05$ indiquent que la distribution du cas concerné est significativement différente de celle de la simulation de référence (historique/ÉENM).

Bien que différents en quelques points, les résultats avec la variable hydrologique PVAM ne montrent pas d'amélioration substantielle de façon globale. On remarque d'abord que les productions sont similaires entre les trois simulations et leurs distributions ne sont pas significativement différentes (valeur p de $0.695 > 0.05$ entre la distribution des productions en mode historique/ÉENM et historique/PVAM, selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney). Les niveaux d'eau du réservoir Nechako sont légèrement supérieurs en mode historique avec la variable PVAM qu'avec la variable ÉENM (différence non significative, valeur p de $0.492 > 0.05$ entre les deux distributions), mais légèrement inférieurs à ceux du mode prévisionnel/Combo. De plus, le volume des déversements non productifs est légèrement supérieur avec la variable PVAM qu'avec la variable ÉENM, mais pas de façon significative (valeur p de $0.766 > 0.05$). Les volumes d'inondation et le nombre de jours inondés avec la variable PVAM sont plus grands qu'avec les deux autres simulations. La variable PVAM occasionne cependant moins d'événements critiques (donc gère moins souvent au-dessus du niveau critique dans le réservoir Nechako) et ce, même si les niveaux du réservoir sont en

moyenne plus haut qu'avec le mode historique/ÉENM. Les volumes d'inondation plus substantiels avec la variable PVAM, malgré des durées d'événements critiques plus courts qu'avec la variable ÉENM en mode historique, indiquent des règles qui favorisent des inondations de plus courtes durées, mais de plus grandes intensités.

Tableau 5 - Comparaison des résultats de gestion du mode historique avec les variables ÉENM et PVAM ainsi qu'en mode prévisionnel avec la variable Combo

		Mode histo. Var. ÉENM	Mode prév. Var. combo	Mode histo. Var. PVAM
Production moyenne ^a		0,919	0,919	0,919
Niveau moyen du réservoir	(pi)	2794,6	2795,0	2794,7
Déversements non-productifs	(hm ³)	23 020	22 992	23 159
Événements critiques au réservoir ^b	(jours)	48	165	33
Inondations à Cheslatta Lake	(jours)	9	9	12
Inondations à Vanderhoof	(jours)	27	24	33
Volume total d'inondations ^c	(hm ³)	107	112	169

^aLa production moyenne est présentée en valeur relative par rapport à la production maximale.

^bLes événements critiques au réservoir Nechako sont considérés lorsque le niveau dépasse le seuil critique.

^cLe volume total d'inondations est calculé en additionnant les inondations à Cheslatta Lake et à Vanderhoof.

Tableau 6 - Valeur p entre les distributions de la simulation historique/ÉENM et les six autres simulations

	Mode historique			Mode prévisionnel		
	AR-5	Combo	PVAM	AR-5	ÉENM	Combo
Production	9,13E-22	9,46E-01	6,95E-01	4,41E-02	1,32E-04	1,25E-01
Niv. Nechako	8,39E-38	1,38E-05	4,92E-01	1,55E-02	4,80E-10	1,53E-15
Déversements	9,08E-01	5,70E-02	7,66E-01	2,54E-01	6,00E-02	4,26E-02

De façon globale, outre la réduction de la durée des événements critiques, l'utilisation d'une prévision du volume d'apport annuel médian ne résulte donc pas en une amélioration significative par rapport à la variable ÉENM. Ces résultats tendent à indiquer que la variable

ÉENM soit déjà bien habilitée à donner une prévision adéquate de la valeur de l'apport à venir. Il faut cependant rappeler que ces résultats sont conditionnels aux choix de paramètres qui ont été effectués pour optimiser les règles de gestion. Les paramètres ont été choisis, rappelons-le, afin de permettre une gestion qui rencontre les mêmes valeurs minimale et maximale de niveau d'eau dans le réservoir Nechako, les mêmes valeurs maximales de débit à Cheslatta Fall et les mêmes valeurs maximales de débit à Vanderhoof. Il demeure intéressant, malgré tout, de constater que pour l'atteinte des mêmes valeurs maximales et minimales à des moments ponctuels, les moyennes diffèrent de façon significative.

5.1.2 Analyse en fonction des volumes d'apports annuels

Le Tableau 7 présente une analyse en fonction des volumes d'apports annuels sur les résultats de gestion des règles optimisées en mode historique avec la variable hydrologique PVAM. Le Tableau 8 présente les valeurs p obtenues lorsque les distributions des trois variables observées (production, niveau du réservoir Nechako et déversement non productifs) dans cette dernière simulation sont comparées à celles des simulations historique/ÉENM et prévisionnelle/Combo. En rouge et caractères gras, les valeurs $p < 0.05$ indiquent que la distribution des résultats des simulations avec la variable PVAM est significativement différente de celle des simulations historique/ÉENM et prévisionnel/Combo.

Lorsque les résultats du mode historique/PVAM (Tableau 7) et du mode historique/ÉENM (Tableau 4) sont comparés, on constate que les productions sont similaires, peu importe l'envergure des volumes d'apports annuels (valeurs $p > 0.05$ dans tous les cas), sauf lors d'années d'apports élevés, où la variable PVAM permet une augmentation faible, mais statistiquement significative (valeur $p = 0.00941 < 0.05$). Cette augmentation de la production survient malgré que le niveau du réservoir soit significativement plus bas lors de ces années avec la variable PVAM qu'avec la variable ÉENM (valeur $p = 4.27 \times 10^{-8}$). L'utilisation d'une prévision du volume d'apport annuel médian comme variable hydrologique permet donc d'utiliser plus fréquemment l'ensemble des groupes turboalternateurs lors des années d'apports élevés.

Tableau 7 - Résultats de gestion des règles optimisées en mode historique avec la variable PVAM en fonction des années

Apports annuels	Production moyenne	Niveau moyen du réservoir (pi)	Événem. critiques (jours)	Dévers. n. prod. (hm ³)	Volume inonda. (hm ³)
Extrêmes	0,967	2795,1	0	5 537	0.90
Élevés	0,973	2795,9	0	13 112	0.32
Modérés	0,952	2795,1	33	4 395	0.35
Faibles	0,848	2793,4	0	115	0.00

Tableau 8 - Valeurs-p de la distribution des résultats avec la variable hydrologique PVAM et deux simulations de référence différentes

	(Simulation de référence)	Apports annuels			
		Extrêmes	Élevés	Modérés	Faibles
Production	(Histo./ÉENM)	8,30E-01	9,41E-03	1,26E-01	5,66E-02
Niveau du réservoir	(Histo./ÉENM)	8,35E-01	4,27E-08	3,14E-01	2,37E-04
Dévers. non prod.	(Histo./ÉENM)	5,68E-01	7,36E-01	7,24E-01	3,17E-01
Production	(Prév./Combo)	5,79E-01	1,39E-01	6,66E-01	5,06E-03
Niveau du réservoir	(Prév./Combo)	7,68E-01	2,24E-10	5,78E-09	1,94E-03
Dévers. non prod.	(Prév./Combo)	5,00E-02	8,56E-02	1,78E-04	1,43E-02

Tout comme avec les autres simulations en mode historique ou en mode prévisionnel, les productions moyennes sont plus grandes lors des années d'apports élevés que lors des années extrêmes. Ceci est principalement dû au fait que les années extrêmes n'incluent que deux années (1976 et 2007) alors que les années élevées en incluent 10. Or, lors de la gestion de l'année 2007, le niveau du réservoir en début d'année était bas dans toutes les simulations à cause de la gestion de l'année précédente. Plus de détails sont présentés à ce propos à la section 5.2.2. Malgré tout, les productions augmentent ensuite à partir de novembre. Cependant, l'impact de ces faibles productions sur le bilan de production moyenne lors des années extrêmes s'en fait ressentir. Quelques situations similaires surviennent lors des années d'apports élevés, mais un

plus grand nombre d'années avec un début à pleine production vient diminuer l'effet sur la production moyenne des années d'apports élevés.

Pour leur part, les déversements non productifs sont parfois légèrement supérieurs et parfois légèrement inférieurs à ceux occasionnés par la variable ÉENM, mais les différences ne sont pas significatives (valeur $p > 0.05$).

Finalement, la variable PVAM n'occasionne pas un dépassement du niveau critique dans le réservoir Nechako lors des mêmes épisodes. En effet, la variable PVAM dépasse le niveau critique lors des années d'apports modérés (33 jours, répartis sur 4 années différentes), ce qui permet de limiter les déversements lors de ces périodes ($4\,395 \text{ hm}^3 < 4\,562 \text{ hm}^3$ avec la variable ÉENM, voir Tableau 4). Au contraire, la variable ÉENM occasionne des événements critiques lors des années d'apports extrêmes (12 jours) et élevés (36 jours), mais ceux-ci n'occasionnent pas toujours une diminution des déversements non productifs (Tableau 4). De plus, la variable PVAM occasionne des inondations plus substantielles lors des années d'apports extrêmes et modérés.

Spécifiquement pour les années d'apports modérés, les résultats du Tableau 7 illustrent un grand nombre d'événements critiques avec la variable PVAM en mode historique alors que les volumes des déversements non productifs sont plus faibles que lors des années d'apports élevés. Ce résultat est comparable au comportement avec le mode prévisionnel/Combo. Avec le mode historique/PVAM, les événements critiques surviennent lors de seulement deux années d'apports modérés (1969 et 1997) alors qu'ils surviennent lors de 3 années en mode prévisionnel/Combo (1961, 1969 et 1997). Dans les deux cas, cependant, les événements critiques sont plus nombreux principalement lors de la gestion à la mi-juin de l'année 1969.

La Figure 25 illustre les prévisions d'ensemble en date du 10 juin 1969. À ce moment, lorsque le niveau du réservoir est près de la limite critique, la majorité des prévisions indiquent une diminution nette des apports en fin juin. Or, les apports « véritables » simulés pour cette année sont ceux du scénario avec les apports les plus élevés pour cette période. Les deux simulations qui considèrent les prévisions d'ensembles (historique/PVAM et prévisionnel/Combo) sous-estiment donc nettement les apports à venir, ce qui occasionne une gestion du réservoir qui

dépasse le seuil critique. Ce comportement est aussi constaté lors des années 1961 et 1997, mais est de moindre envergure.

En rétrospective, lors des années d'apports extrêmes et modérés, la variable PVAM n'occasionne pas de différence de gestion significative par rapport à la variable ÉENM, mais cause des inondations plus importantes. Cependant, malgré une gestion du réservoir à un niveau plus bas que la variable ÉENM, les prévisions sur le volume médian permettent d'améliorer les productions tout en réduisant les déversements non productifs lors des années d'apports élevés.

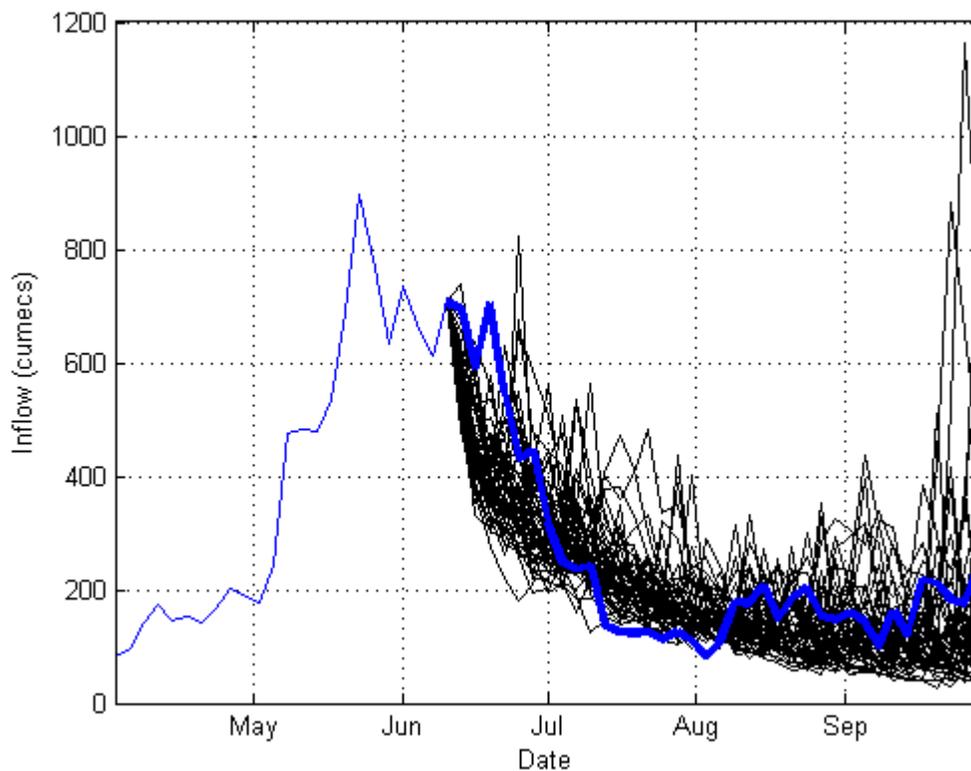


Figure 25 - Prévisions d'ensemble pour la période du 10 juin 1969

La comparaison entre les résultats de gestion de la variable PVAM en mode historique et de la variable combinée en mode prévisionnel offre cependant un portrait différent. Les années d'apports faibles représentent les années les plus performantes du mode prévisionnel/Combo et les résultats en mode historique/PVAM sont significativement inférieurs. En effet, une gestion significativement plus basse du réservoir en mode historique/PVAM (valeur $p = 0.00194 < 0.05$) occasionne des productions significativement plus faibles (valeur $p = 0.00506$) et des déversements non productifs malgré tout significativement plus grands (valeur $p = 0.0143$). De

plus, le mode historique/PVAM ne permet pas d'augmentation de production significative lors des années d'apports modérés, élevés ou extrêmes (valeur $p > 0.05$) en comparaison au mode prévisionnel/Combo. Cependant, une diminution significative des déversements non productifs lors des années d'apports extrêmes permet de réduire les inondations sur ces années.

5.2 Discussion complémentaire sur la gestion annuelle

L'évaluation graphique de la gestion du mode historique avec les variables PVAM et ÉENM et du mode prévisionnel avec la variable combinée permet de mieux comprendre les différences identifiées dans les tableaux précédents. Les Figures 26 à 29 comparent le comportement moyen de la gestion de ces trois simulations lors des années d'apports faibles, modérés, élevés et extrêmes.

5.2.1 Comparaison sur les années d'apports faibles, modérés et élevés

De façon générale, que les apports soient faibles, modérés ou élevés, la gestion révèle des tendances relativement constantes. En effet, de façon générale, le début de l'année de gestion commence à des niveaux moyens similaires, peu importe le mode d'optimisation et la variable hydrologique utilisée. De plus, le mode prévisionnel/Combo produit moins et déverse généralement des quantités d'eau moins importantes durant l'hiver, ce qui lui permet d'augmenter le niveau du réservoir jusqu'à la crue. Puis, une fois la crue commencée (dès début avril en général), les productions augmentent et restent supérieures avec le mode prévisionnel/Combo par rapport au mode historique avec les variables ÉENM et PVAM.

Spécifiquement lors des années d'apports faibles et modérés (Figure 26-27), le fait d'attendre avant d'augmenter les productions permet aux règles mises à jour avec la variable combinée de maintenir des niveaux de réservoir plus élevés lors de la deuxième partie de l'année. En plus de permettre de meilleures productions sur cette période, le maintien d'un niveau légèrement supérieur pour conclure l'année permet de diminuer les impacts potentiels d'une réserve trop basse l'année suivante, advenant une autre année d'apports modérés ou faibles. La variable PVAM semble pour sa part favoriser des règles de gestion qui induisent des niveaux de réservoir et des productions similaires à ceux de la variable ÉENM lors des années d'apports faibles et modérés.

Lors des années d'apports élevés (Figure 28), on constate que les règles mises à jour avec le mode prévisionnel/Combo anticipent mieux la crue et déversent de façon préventive quelques jours avant les règles optimisées à l'aide des scénarios historiques. Le pic est plus intense, mais se produit juste avant l'arrivée de la crue, ce qui permet de réduire les inondations. Cependant, les déversements préventifs avant la période de crue en mode historique/PVAM ne permettent pas de réduire les déversements non productifs lors de la fonte printanière. La baisse du niveau du réservoir en fin avril empêche les règles optimisées avec la variable PVAM d'augmenter les productions de façon équivalente à celles du mode prévisionnel/combo pour le restant de l'année.

Ainsi, lors des années régulières avec des apports faibles, modérés ou élevés, la mise à jour des règles à l'aide des prévisions d'ensemble et d'une variable hydrologique qui combine les modèles AR5 et ÉENM semble donc améliorer le comportement de gestion par rapport au modèle de référence historique/ÉENM et semble mieux tirer profit des prévisions d'ensemble que le mode historique/PVAM. Les règles mises à jour avec la variable combinée tendent à limiter la production en début d'année pour favoriser celle de fin d'année. Ce dernier comportement est aussi identifié lors des années d'apports extrêmes.

5.2.2 Comparaison sur les années d'apports extrêmes

Tel qu'illustré à la Figure 29, les règles mises à jour à l'aide du mode prévisionnel/Combo amènent au début des années extrêmes (1976 et 2007) des niveaux de réservoir plus élevés. Ces niveaux sont occasionnés par la gestion de l'année précédente et forcent plus de déversement non productif en hiver pour préparer le réservoir à l'ampleur de la crue printanière. Choisisant des moments différents pour augmenter les déversements non productifs en avril, les modes historiques/ÉENM et prévisionnel/combo abaissent cependant le réservoir à des niveaux similaires juste avant le pic de crue. Entre la mi-mai et le début de juillet, mis à part quelques pics, le mode historique/ÉENM limite les déversements, ce qui augmente le niveau du réservoir, l'obligeant à déverser un pic plus intense en début juillet. Ces règles permettent malgré tout une fin de l'année avec un réservoir plus rempli qu'avec les autres simulations. Le mode historique/PVAM favorise pour sa part plus de déversements avant la crue, laissant le réservoir moins plein pendant celle-ci et permettant un pic en juillet moins intense. Tout comme avec le

mode prévisionnel/combo, le mode historique/PVAM favorise une fin d'année avec un niveau de réservoir plus « modéré » l'année suivante.

Par ailleurs, la différence de gestion en début d'année lors d'année d'apports extrêmes, occasionnée par des niveaux d'eau différents dans le réservoir à la fin de l'année précédente, met en lumière l'influence du séquençage des années qui se succèdent. Cette particularité n'a pas été étudiée spécifiquement dans le cadre de la présente étude, mais les résultats constatés lors des années extrêmes indiquent qu'il serait pertinent de le faire pour mieux statuer sur la différence de comportement entre les deux modes de gestion (historique et prévisionnel) et les variables hydrologiques.

5.2.3 Conclusion sur l'utilisation des prévisions d'ensemble en mode prévisionnel

Tel que mentionné au chapitre 4, en ne considérant pas les déversements nécessaires en début d'année pour réduire la hauteur du réservoir au même niveau que celui du mode historique/ÉENM, les règles mises à jour avec le mode prévisionnel/Combo occasionnent moins de déversements non productifs de façon globale lors des années extrêmes. D'une façon générale, donc, bien que les volumes d'inondations soient en moyenne plus grands lors des années extrêmes en raison de l'effet marqué de l'année 1976, les règles mises à jour avec le mode prévisionnel et la variable hydrologique combinée permettent de réduire les déversements non productifs et le volume des inondations mieux que toutes les simulations en mode historique. Cette amélioration est observée peu importe la variable hydrologique utilisée. Si on ne considère pas l'année 1976, l'analyse sur une base annuelle confirme que les moments choisis pour effectuer les déversements non productifs par les règles mises à jour offrent un meilleur contrôle des risques associés aux inondations causées par ceux-ci lors des années d'apports plus élevés que la normale.

5.2.4 Conclusion sur l'utilisation des prévisions d'ensemble en mode historique

L'utilisation des prévisions d'ensemble en mode historique pour construire une variable hydrologique prévisionnelle, telle que celle utilisée pour les volumes d'apports annuels médians, offre, dans le cadre de cette étude, des résultats peu convaincants lorsque comparée à la variable ÉENM ou le mode prévisionnel. L'augmentation de la production lors des années d'apports extrêmes, élevés et modérés par rapport aux deux autres simulations (historique/ÉENM et

prévisionnel/combo) est compensée par une gestion moins bien contrôlée des déversements non productifs en période de crue, ce qui occasionne de plus fortes inondations. Plus d'investigations seraient nécessaires afin d'identifier, entre autres choses, un horizon de prévision mieux adapté aux conditions du système.

Par ailleurs, les prévisions d'ensemble auraient pu être utilisées différemment pour construire une variable hydrologique en mode historique. L'utilisation, par exemple, du volume moyen basé sur l'ensemble des prévisions pourraient être des alternatives intéressantes. En effet, de par sa définition, le scénario médian représente le point milieu de l'ensemble qu'il divise en deux moitiés, mais n'incorpore pas les tendances extrêmes. L'utilisation d'un scénario moyen, intrinsèquement influencé par les valeurs extrêmes, pourrait possiblement permettre d'incorporer l'information tirée de ces scénarios particuliers.

Dans une autre mesure, l'utilisation d'un volume au 75^e percentile ou au 25^e percentile basé sur les prévisions d'ensemble pourrait, par exemple, permettre de construire des règles qui laissent une marge pour contrer un volume de crue élevé ou faible, respectivement. Dans le cas particulier d'une prévision du volume d'apport au 75^e percentile de l'ensemble, cette variable pourrait possiblement permettre de mieux prémunir les règles du système Nechako face aux scénarios d'apports extrêmes comme les années 1976 et 2007.

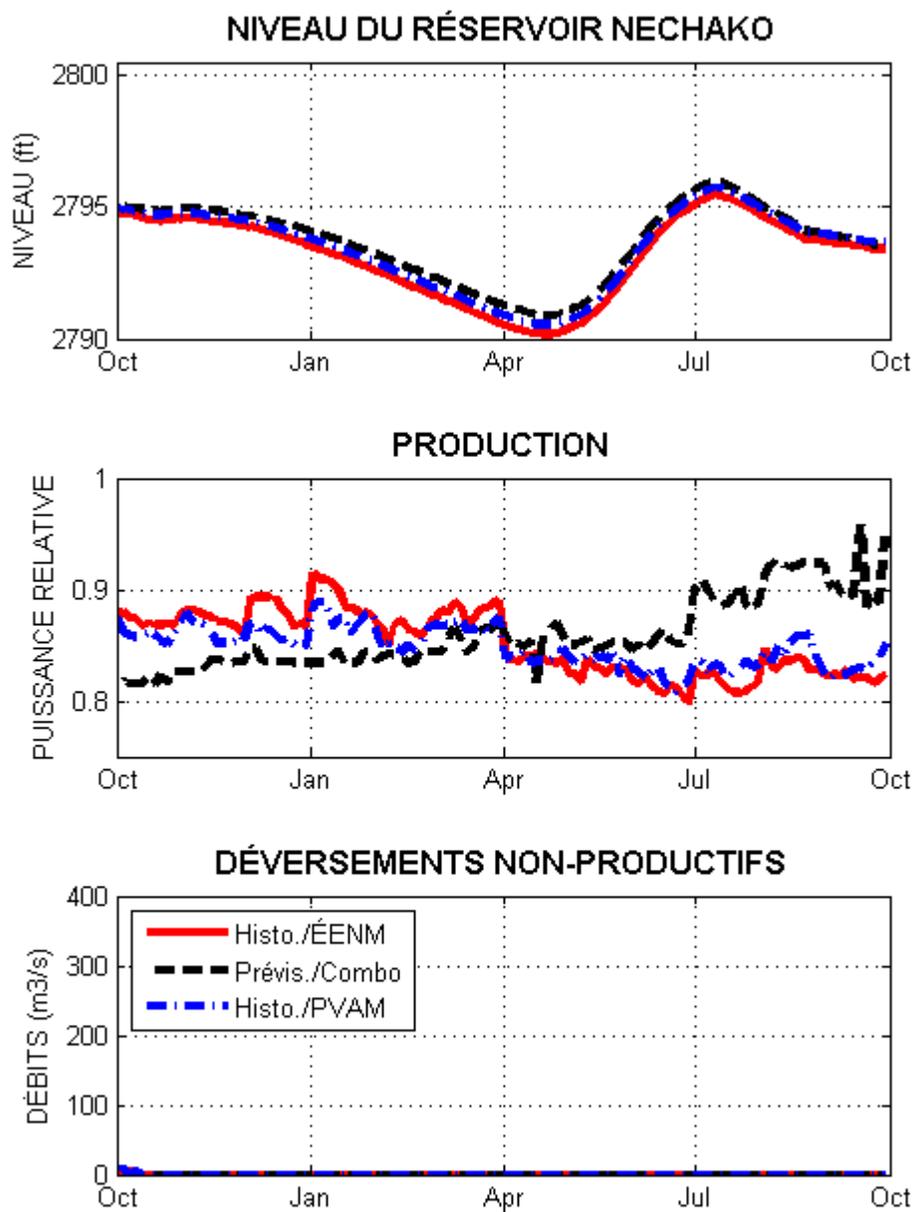


Figure 26 - Comparaison des résultats moyens de la gestion sur les années d'apports faibles

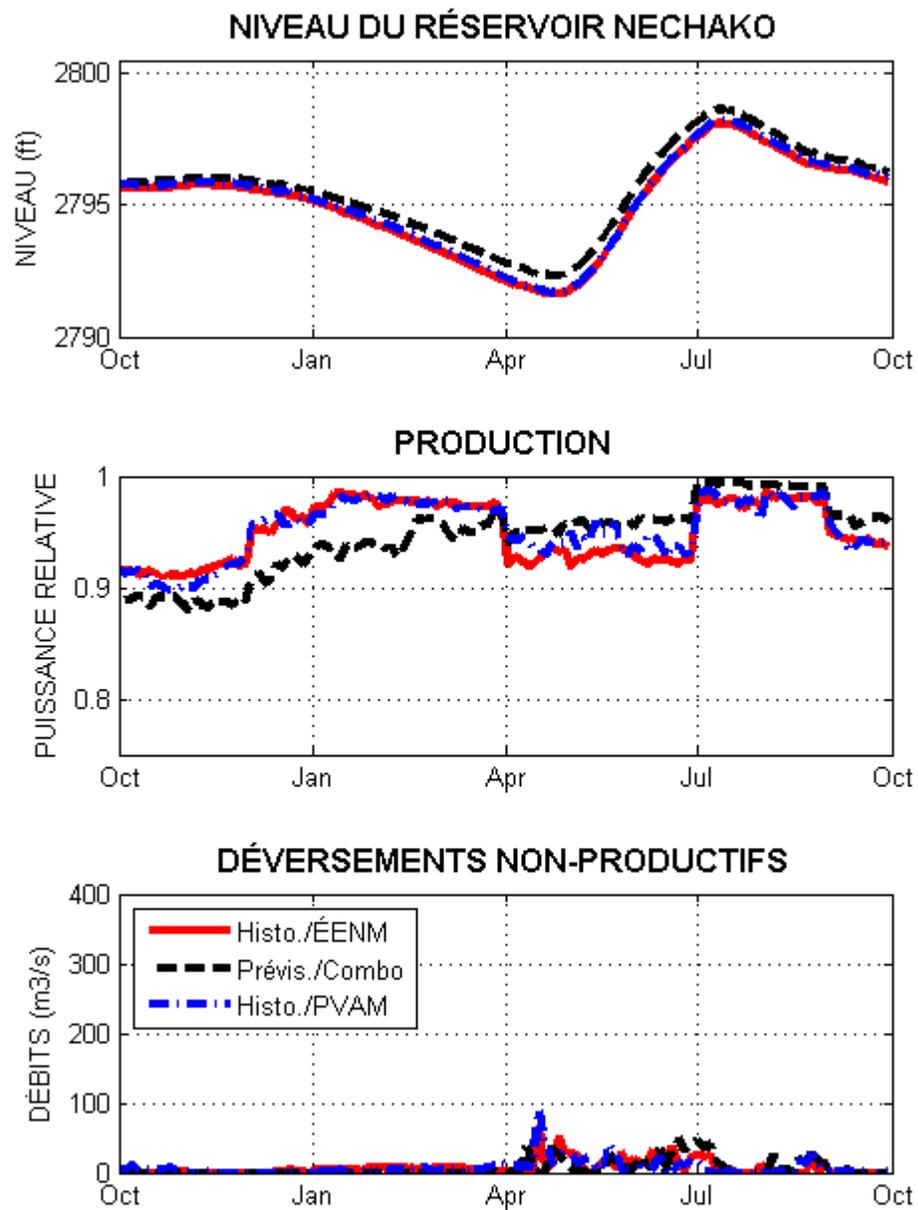


Figure 27 - Comparaison des résultats moyens de la gestion sur les années d'apports modérés

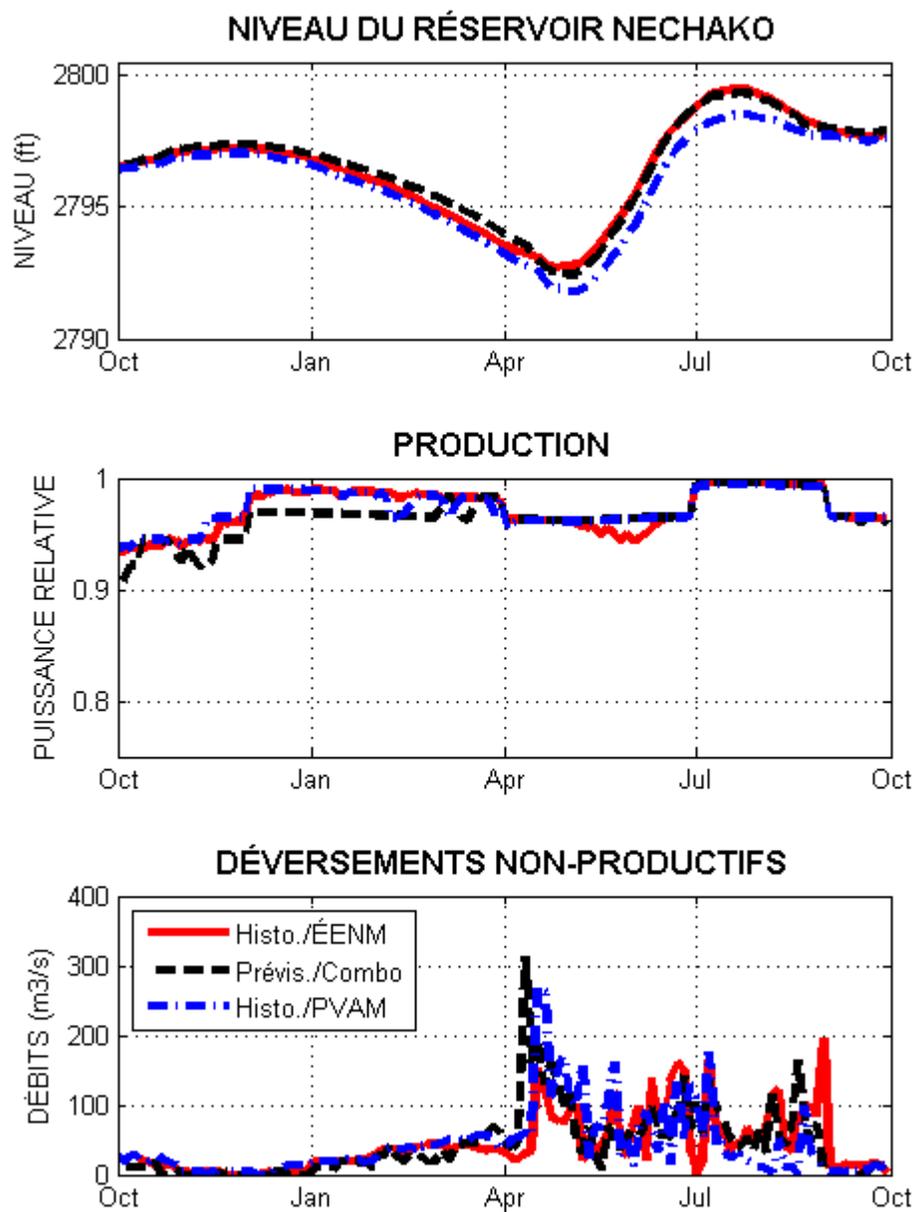


Figure 28 - Comparaison des résultats moyens de la gestion sur les années d'apports élevés

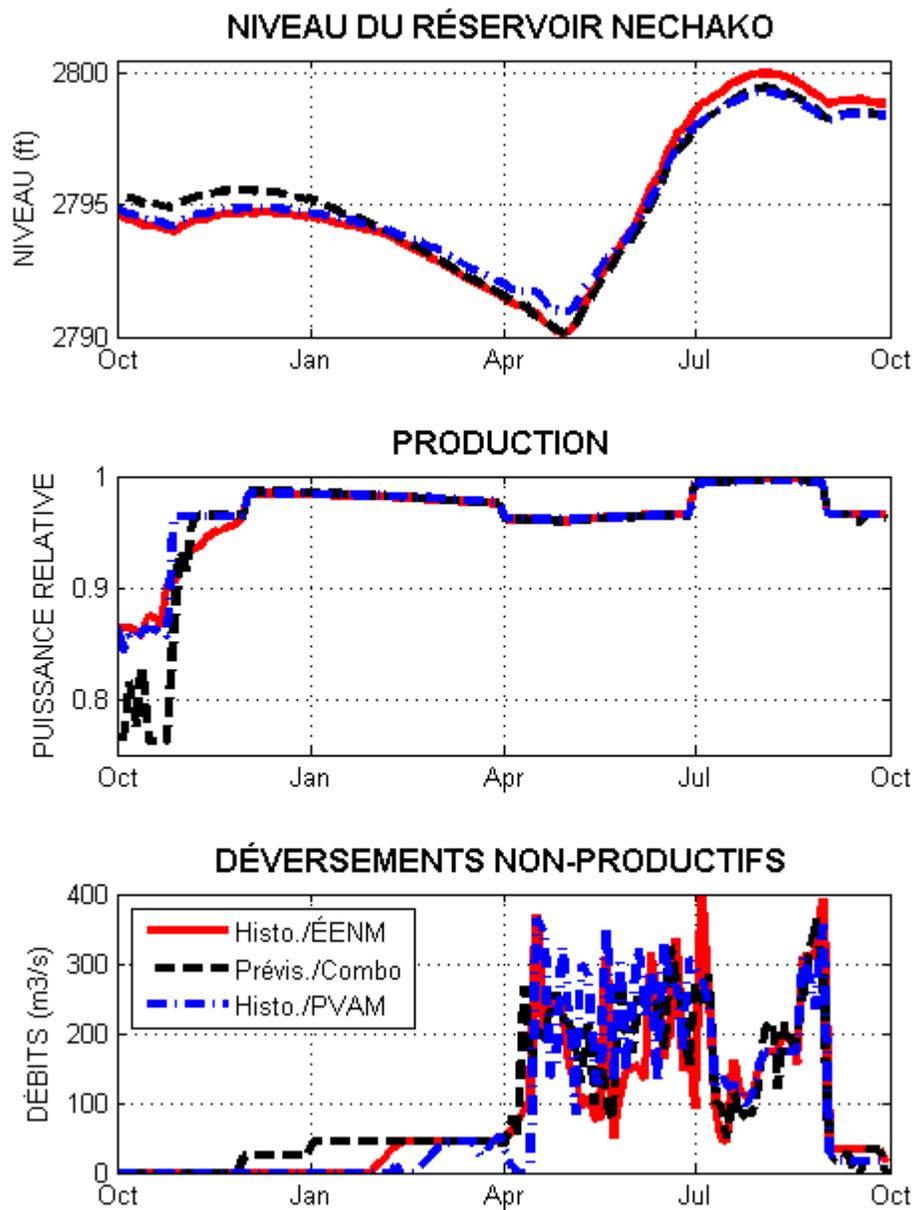


Figure 29 - Comparaison des résultats moyens de la gestion sur les années d'apports extrêmes

5.3 Analyse complémentaire aux prévisions d'ensembles

5.3.1 Discussion sur les simulations de CEQUEAU

Bien que les corrections manuelles apportées par Rio Tinto sur les données météorologiques aient apporté une amélioration des bilans hydriques simulés par CEQUEAU, un biais est toujours observable sur les simulations de l'équivalent en eau de la neige et des débits à la sortie du sous-bassin Nechako.

Une comparaison des résultats de la simulation de l'ÉEN sur les carreaux entiers de CEQUEAU au droit de chacune des trois stations laisse croire que la simulation du couvert neigeux « en forêt » semble mieux représenter les données observées aux trois stations que celui du couvert neigeux « en clairière ». La Figure 30 illustre le biais annuel de l'équivalent en eau de la neige (ÉEN) sur la partie « en forêt » du carreau entier de CEQUEAU correspondant aux observations du « coussin à neige » de Mount Wells (CE no 45) entre 1993 et 2010. Une valeur positive indique une sous-évaluation du modèle et une valeur négative indique une surévaluation. Bien que les observations utilisées pour effectuer cette analyse ne couvrent pas l'entièreté de la période de données utilisée pour les simulations, les résultats illustrent que le modèle CEQUEAU utilisant les données météorologiques corrigées par Rio Tinto sous-estime d'environ 6.5 mm l'ÉEN (0.7% du maximum de 954 mm observé à Mount Wells) sur la période 1993-2010. Dans tous les cas présentés ici, cependant, aucun biais annuel ne dépasse des valeurs de ± 30 mm.

Entre 1997 et 2010, les résultats de la simulation CEQUEAU surestiment le volume de neige seulement lors de six années (1993, 1994, 1998, 2004, 2005 et 2008). Lorsque les résultats de la simulation de l'ÉEN de CEQUEAU « en clairière » sont comparés aux observations de la station Mount Wells, une surestimation de 28.5 mm provenant du modèle est constatée.

Le Tableau 9 illustre les critères de performance obtenus en comparant les valeurs des observations entre 1980 et 2010 et la simulation des débits à la sortie du sous-bassin Nechako avec les données météorologiques corrigées par Rio Tinto. Les débits simulés par CEQUEAU sous-estiment d'environ 6.2 m³/s les débits (3.3% de la moyenne de 187 m³/s observée sur le sous-bassin Nechako). Le critère de Nash-Sutcliffe de 0.85 sur les apports indique une

représentation en général assez fidèle des observations lors des événements d'apports élevés. Cependant, le critère de Nash-Sutcliffe de 0.68 sur le logarithme des apports tend à indiquer une représentation moins fidèle des apports lors des épisodes d'étiage et de faibles débits.

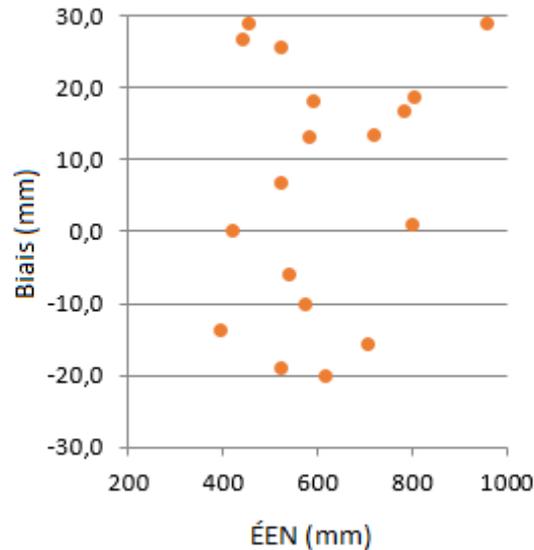


Figure 30 – Valeurs annuelles du critère de biais sur les ÉEN simulés avec les données météorologiques corrigées, lorsque comparées aux observations

Tableau 9 - Comparaison des critères de performance pour la simulation des apports hydriques par le modèle CEQUEAU sur l'ensemble des années simulées (1980 à 2010)

Critère de Nash-Sutcliffe sur les apports	Critère de Nash-Sutcliffe sur $\log(\text{apports})$	Critère de Biais sur les apports (m^3/s)
0.85	0.68	6.2

5.3.2 Recommandations complémentaires aux résultats dans un environnement virtuel

Les observations de précipitations solides sous-estiment en général les quantités de neige qui tombent sur le bassin Nechako. La simulation des stocks de neige par le modèle CEQUEAU, à partir de ces données de précipitations, sous-estime donc les quantités de neige stockées sur le bassin, lorsque comparées aux observations d'équivalent en eau de la neige (ÉEN) effectuées à

l'aide de coussins à neige. Cette différence entre les observations et les simulations du modèle devra être prise en compte lorsque l'application sera implantée en situation réelle. Les observations d'ÉEN des coussins à neige, plutôt que d'être directement utilisées comme variable hydrologique, devraient être utilisées afin d'ajuster les stocks de neige simulés par le modèle CEQUEAU. L'assimilation de données, par insertion directe ou par une méthode plus rigoureuse, est alors recommandée.

De plus, même en considérant des données météorologiques corrigées qui représentent mieux les volumes d'apports annuels, l'étude en conditions « simulées » considérée dans le cadre de cette recherche sous-estimait les apports sur le sous-bassin Nechako (biais de 6.2 m³/s). Ce biais combiné au risque de sous-estimation des précipitations risque, en situation réelle, d'amener le modèle CEQUEAU à proposer des scénarios de prévision d'ensemble qui sous-estiment les apports à venir. L'utilisation de telles prévisions d'ensemble pour faire la mise à jour des règles de gestion en temps réel risque donc de favoriser des règles qui sous-estiment les risques associés aux débordements dans le réservoir ou aux inondations en aval. Les règles mises à jour, bien qu'ayant moins de risque de sous-estimer la crue à venir que les règles optimisées avec les scénarios historiques, devront donc continuer d'être utilisées avec précaution en période de préparation à la crue printanière.

De même, en comparant les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe sur le logarithme des débits et sur les débits directement, les résultats du modèle CEQUEAU avec les données météorologiques corrigées ont démontré que l'erreur sur les débits faibles (avec les logarithmes) était plus grande que l'erreur sur les débits forts (avec les valeurs directes). Comme la gestion du réservoir Nechako est orientée surtout par le volume annuel, les erreurs moins grandes sur les apports élevés que sur les apports faibles représentent, en soi, une bonne nouvelle. Cependant, comme il est mentionné précédemment, les débits simulés par le modèle CEQUEAU ne sont pas à l'abri du problème de sous-évaluation des précipitations. La mise à jour des règles de gestion lors des périodes de faibles apports (principalement en hiver avant la crue) devra donc être interprétée avec vigilance.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

6.1 Sommaire des travaux réalisés

Dans le cadre de ce projet, un banc d'essai numérique a été élaboré afin d'évaluer la performance de l'algorithme d'optimisation de programmation dynamique stochastique de Rio Tinto lorsqu'utilisé en mode prévisionnel sur le système hydrique de la rivière Nechako en Colombie-Britannique. Pour se faire, la performance des règles de gestion mises à jour en mode prévisionnel à partir de prévisions d'ensemble construites avec le modèle hydrologique CEQUEAU a été comparée à celle de règles optimisées en mode historique qui utilisaient une représentation simulée des apports historiques sur le bassin versant.

Rejoignant les résultats de l'étude de Desreumaux et coll. (2014) sur le système Nechako, qui utilisait des valeurs d'apports observées plutôt que simulées, les résultats en mode historique ont permis d'obtenir de meilleurs résultats de gestion en établissant les probabilités de transition à l'aide de la valeur maximale saisonnière de l'équivalent en eau de la neige (ÉENM) plutôt qu'avec un modèle autorégressif d'ordre 5 (AR5) ou un modèle combinant les deux informations (Combo). De plus, l'utilisation de prévisions d'ensemble pour construire une variable hydrologique en mode historique qui émet une prévision du volume d'apport médian pour les huit mois à venir (PVAM) n'a pas permis d'améliorer les résultats de gestion lorsque comparée au mode historique avec la variable ÉENM.

Les résultats de gestion en mode prévisionnel utilisant une variable hydrologique « Combo », qui combine un modèle autorégressif d'ordre 5 (AR5) et la valeur saisonnière maximale de l'équivalent en eau de la neige (ÉENM), ont été plus performants que ceux obtenus à l'aide des règles optimisées à l'aide du mode historique utilisant la variable ÉENM. Pour des productions électriques similaires sur une période de 53 années, la mise à jour des règles de gestion à l'aide du mode prévisionnel/Combo a permis de réduire les déversements non productifs de façon générale et les inondations lors des années d'apports élevés et extrêmes. La réduction des risques de déversements non productifs et d'inondation s'est cependant fait au détriment d'un nombre plus élevé d'événements qui dépassent le seuil critique du réservoir Nechako. De plus, les résultats de simulation lors de l'année 1976 ont révélé que les règles mises à jour peuvent, malgré tout, être à risque de permettre des déversements importants lors d'une journée où les

apports sont exceptionnellement élevés. La mise à jour des règles de gestion à l'aide du mode prévisionnel ne met donc pas le gestionnaire à l'abri d'un risque d'inondation sévère. De façon générale, cependant, la mise à jour des règles à l'aide du mode prévisionnel et de la variable combinée permet un rabaissement du niveau du réservoir plus adéquat pour faire face aux crues printanières exceptionnelles. En dehors de l'épisode ponctuel simulé en mai 1976, l'ensemble de la gestion avec les règles mises à jour à chaque pas de temps à l'aide de la variable combinée et de prévisions d'ensemble élaborées à l'aide du modèle CEQUEAU démontre des gains qui peuvent être pertinents pour Rio Tinto, à la fois lors des années d'apports extrêmes, élevés, modérés ou faibles.

6.2 Contributions originales des travaux de recherche

Le banc d'essai numérique implanté dans le cadre de ce projet a permis de valider que l'utilisation du mode prévisionnel utilisant une variable hydrologique qui combine le modèle autorégressif d'ordre 5 et l'équivalent en eau de la neige maximal de la saison peut permettre d'améliorer la gestion du système hydrique du réservoir Nechako. Cette méthode d'optimisation facilite la recherche de paramètres pour la fonction-objectif, réduit les déversements non productifs en général, améliore particulièrement la gestion lors des années d'apports faibles et modérés et réduit le risque d'inondations. De plus, l'utilisation des prévisions d'ensemble pour construire une variable hydrologique en mode historique qui émet une prévision du volume d'apport médian pour les huit mois à venir ne permet pas d'améliorer les résultats de gestion sur le système Nechako en mode historique avec l'équivalent en eau de la neige maximal.

6.3 Recommandations et perspectives de recherche

Calibration de la fonction-objectif

Les simulations à l'aide du mode prévisionnel ont démontré une moins grande sensibilité aux variations des paramètres de la fonction-objectif. Pour des variations dans la valeur des paramètres de même ampleur qu'avec le mode historique, le mode prévisionnel affichait de moins grandes différences dans la gestion d'une simulation à l'autre. Comme mentionné au

Chapitre 4, la recherche de paramètres avec ce mode d'optimisation s'est donc effectuée sur une plage de paramètre plus étendue et avec une discrétisation plus fine en mode historique qu'en mode prévisionnel. Une recherche plus exhaustive et plus systématique de jeux de paramètres avec le mode prévisionnel est donc conseillée afin de mieux tirer bénéfice des avantages associés à ce mode d'optimisation. La gestion de l'événement d'inondation de mai 1976 pourrait d'ailleurs être améliorée à l'aide d'un jeu de paramètres qui contraint mieux le modèle lors de cet événement spécifique tout en conservant les avantages sur l'ensemble des autres années.

Par ailleurs, l'utilisation de valeurs de paramètres « bruitées » manuellement par une incertitude connue n'a pas été explorée de façon explicite dans cette étude. Cependant, pour valider la robustesse des résultats présentés ici, cette approche serait pertinente pour conclure sur la sensibilité comparée entre les modes prévisionnel et historique, de même que d'une variable hydrologique à l'autre.

Utilisation des prévisions d'ensemble en mode historique

Tel qu'illustré au Chapitre 5, bien que l'utilisation des prévisions d'ensemble en mode historique pour construire la variable hydrologique PVAM n'ait pas démontré de résultats très prometteurs, l'étude d'un horizon de prévision différent pourrait permettre de mieux tirer bénéfice d'une telle approche. L'utilisation d'une prévision du volume moyen plutôt qu'un volume médian pourrait de plus permettre de mieux tenir compte des scénarios extrêmes. À la lumière des premières observations effectuées ici, cependant, l'utilisation des prévisions d'ensemble laissent plus d'espoirs en mode prévisionnel qu'en mode historique.

Utilisation du mode prévisionnel en conditions réelles

Comme souligné au Chapitre 5, les simulations d'apports effectuées avec le modèle CEQUEAU ont tendance à sous-estimer légèrement les apports même en utilisant des données météorologiques corrigées pour mieux respecter le bilan hydrique observé sur une base annuelle. L'utilisation de règles de gestion mises à jour à l'aide du mode prévisionnel devra donc être testée, avant une implantation en situation réelle, avec des valeurs d'apports « véritables » observées plutôt que simulées. La discordance entre les apports véritables et les scénarios de prévision identifiés avec CEQUEAU pourrait réduire la valeur des bénéfices identifiés dans le

cadre de cette étude avec le mode prévisionnel. Cependant, l'utilisation de prévisions d'ensemble basées sur l'état actuel du bassin versant et plus conséquentes avec les risques inhérents aux conditions actuelles devrait permettre d'améliorer la gestion du réservoir lorsque comparée à l'utilisation de règles optimisées mode historique.

Pondération des valeurs de l'eau au-delà de l'horizon de gestion

Dans le cadre de ce projet, il a été choisi de ne pas appliquer de pondération sur les valeurs de l'eau optimisées *a priori* pour les années subséquentes à l'année optimisée lors de la mise à jour des règles. Cependant, il serait intéressant d'évaluer de quelle façon une diminution ou une augmentation de la valeur de l'eau sur l'horizon long terme modifie les résultats de gestion. Cela permettrait de valider si la calibration de cette « pondération » possède le potentiel d'être plus pertinente et plus efficace que la modification des coefficients de calibration de la fonction-objectif.

Modélisation des apports sur les bassins Cheslatta et Nautley

Parce qu'il n'existait pas de modèle hydrologique calibré pour ces sous-bassins, les apports sur les sous-bassins Cheslatta et Nautley ont été simulés à l'aide de « coefficients de bassin » dans le cadre de cette étude. Les apports « véritables » appliqués lors des simulations de cette étude ont été simulés à l'aide du même modèle qui a été utilisé lors de l'élaboration des prévisions d'ensemble. Ce choix implique donc qu'aucun biais de modélisation n'était considéré entre les prévisions et les apports simulés lors de la gestion du réservoir. Cependant, en situation d'application réelle, l'utilisation d'un modèle trop simplifié pour simuler les prévisions sur les sous-bassins secondaires peut mener à des erreurs importantes qui risquent d'influencer les résultats de gestion. Il est donc recommandé d'améliorer, avant l'implantation d'une procédure de mise à jour des règles en temps réel, la modélisation hydrologique sur les sous-bassins Cheslatta et Nautley.

Modification de la séquence des scénarios appliqués lors de la simulation

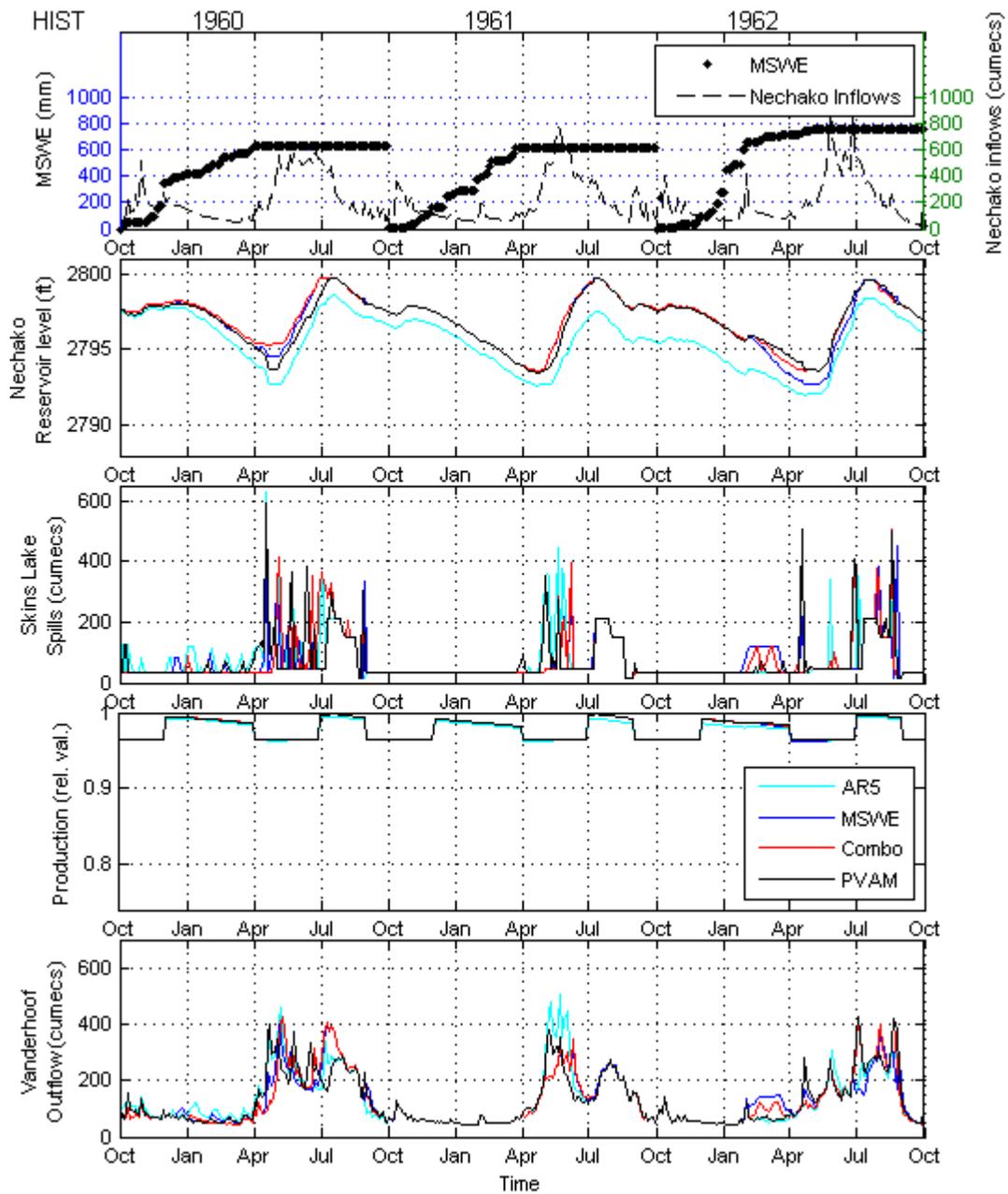
Aucune modification de la séquence de scénarios historiques n'a été appliquée dans le cadre de cette étude. C'est donc dire que les scénarios d'apports ont été simulés dans le même ordre chronologique que ce qui a été observé dans les années passées, entre 1957 et 2012. L'historique

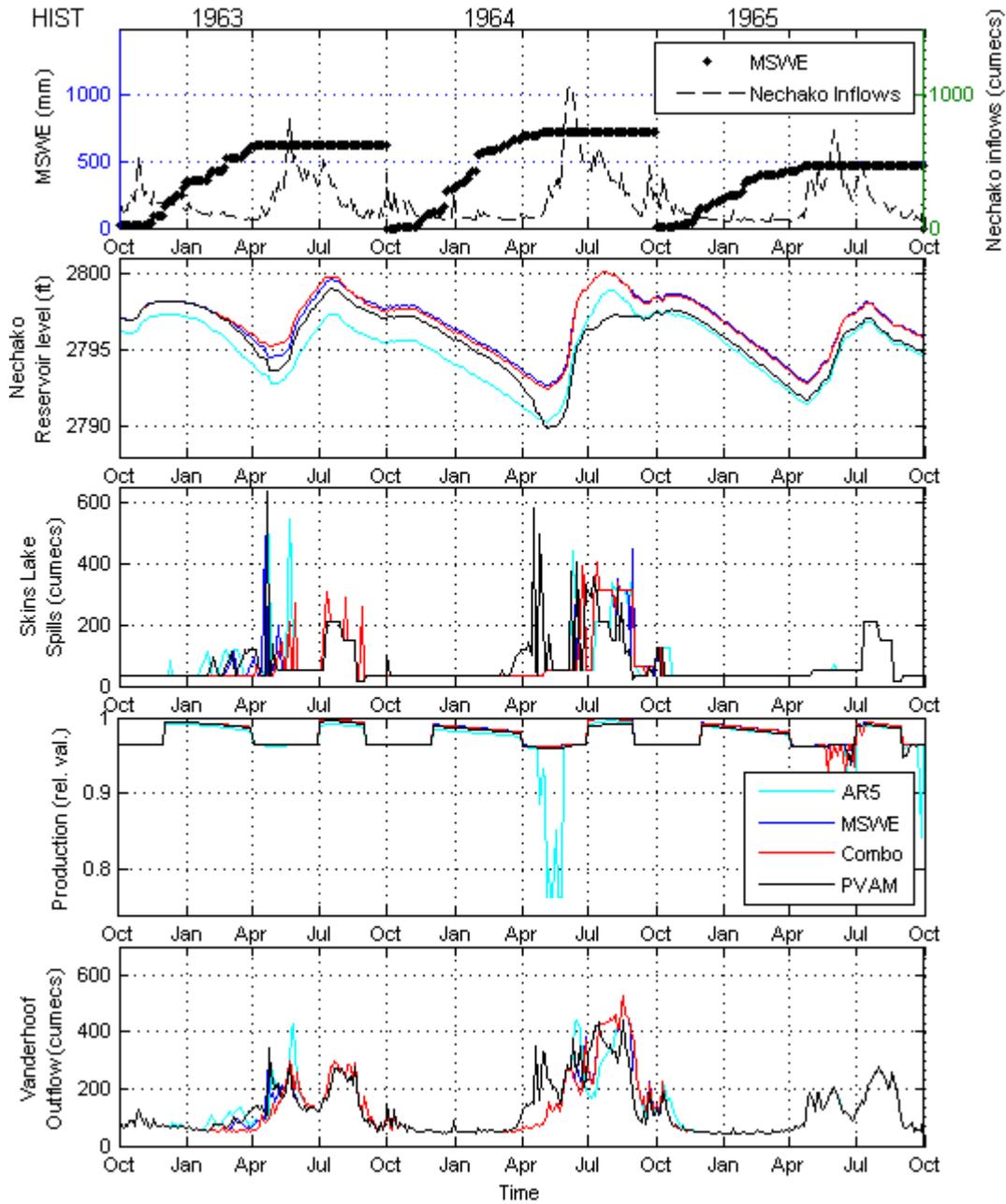
des apports sur le système hydrique de la rivière Nechako démontre quelques longues séquences d'années subséquentes de faibles apports (particulièrement lors des années 1980), mais peu d'années d'apports élevés ou extrêmes l'une à la suite de l'autre. L'un des intérêts du mode prévisionnel identifiés dans le cadre de cette étude était l'aptitude des règles mises à jour à mieux « uniformiser » d'une année à l'autre le niveau du réservoir à la fin d'une année de gestion (en septembre). De plus, certains résultats semblent illustrer l'importance du séquençage d'une année à l'autre sur les conditions en début d'année lors de scénario d'apports extrêmes. Ces constatations lèvent un certain doute sur certaines conclusions spécifiques quant à la gestion des années extrêmes. Il serait donc intéressant d'évaluer la performance du mode prévisionnel lorsque la séquence de scénarios d'apports appliquée est différente de celle qui a été observée dans le passé. Une telle étude pourrait permettre de mieux cerner les points potentiels d'amélioration et de détérioration face aux variations interannuelles.

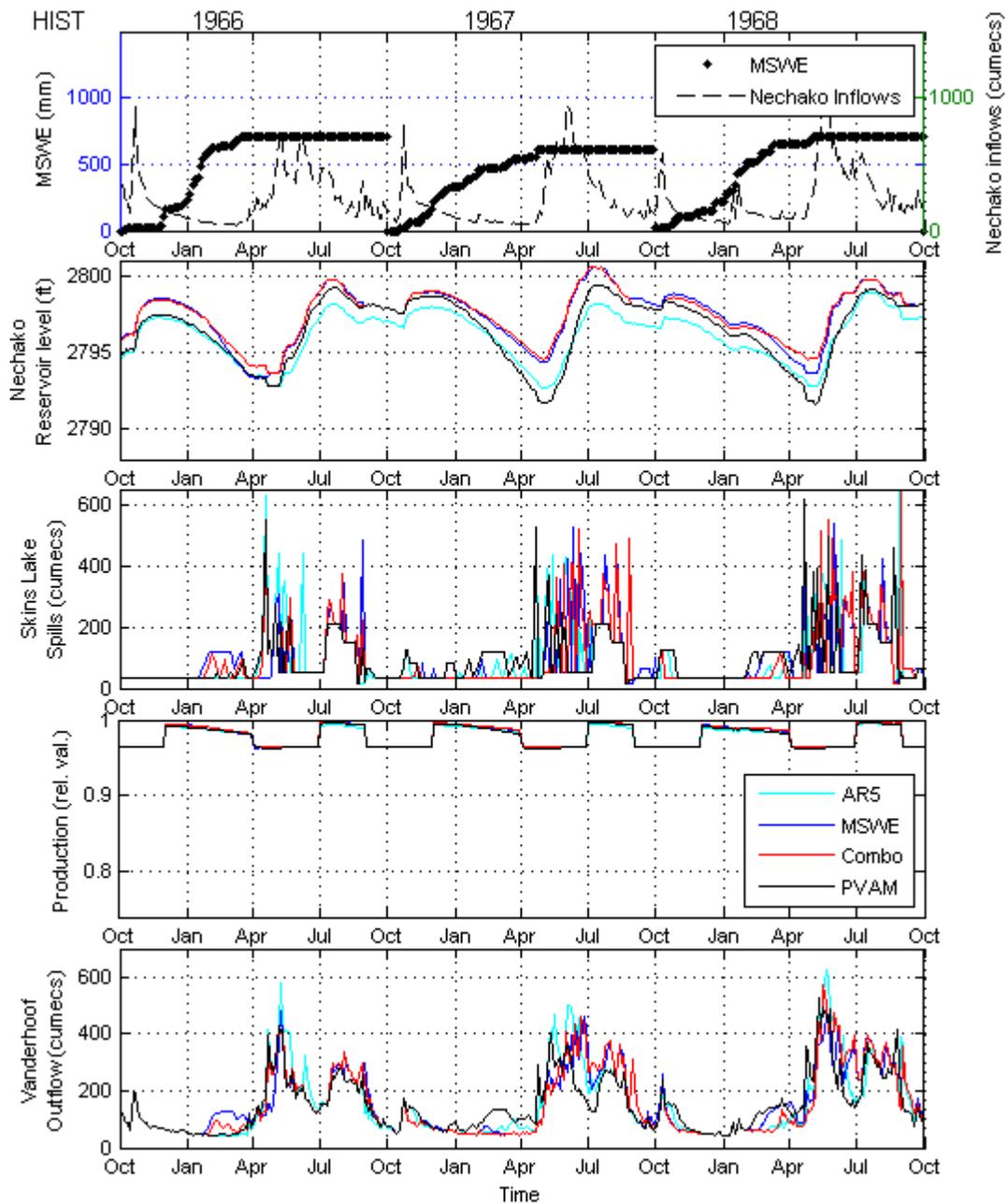
ANNEXE A – COEFFICIENTS DE BASSIN

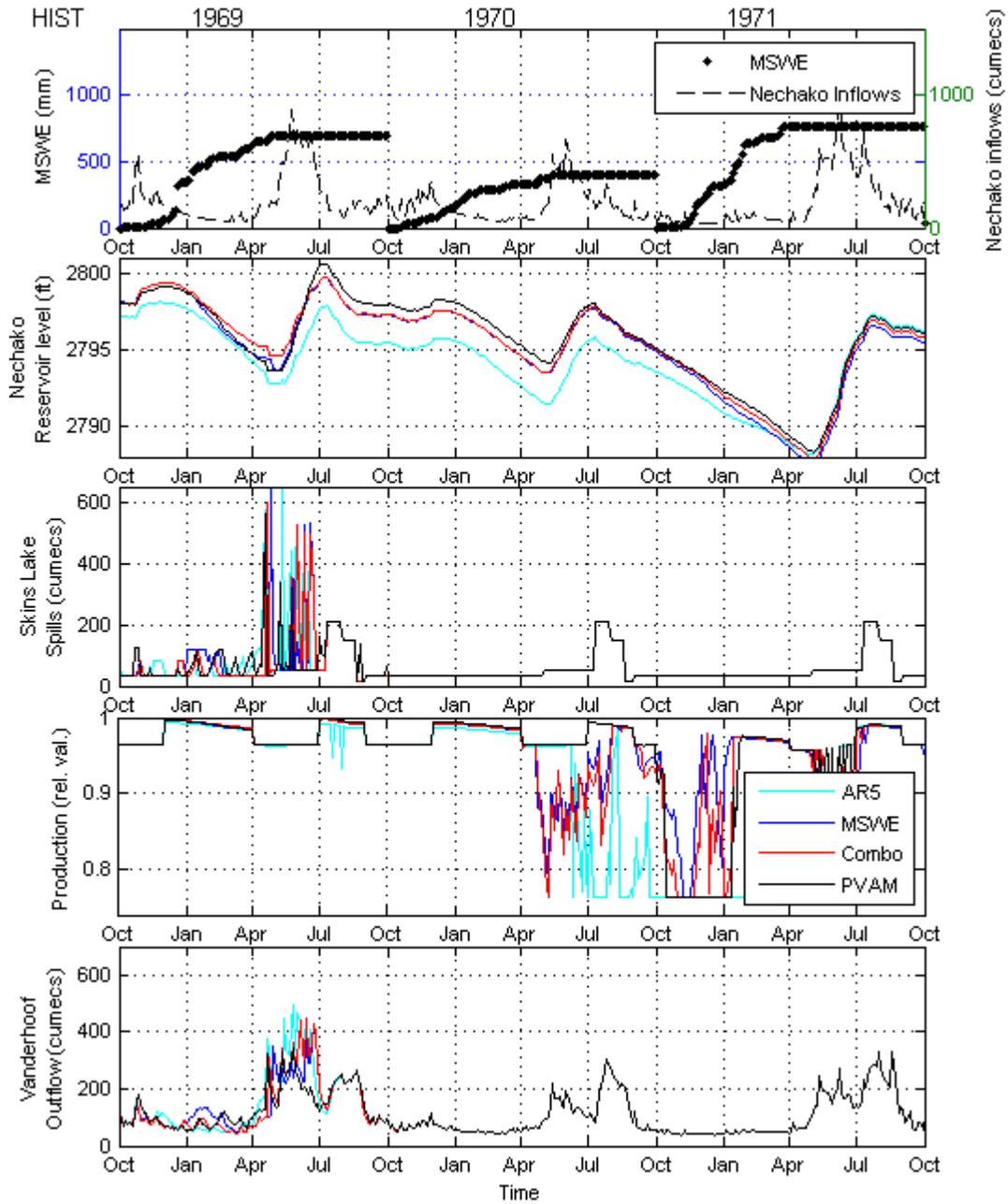
	Date	Chesl.	Nautl.	t	Date	Chesl.	Nautl.	t	Date	Chesl.	Nautl.
1	1 OCT	15,37	30,13	42	1 FÉV	80,53	22,40	82	1 JUN	72,33	269,33
2	4 OCT	16,19	28,57	43	4 FÉV	89,97	22,50	83	4 JUN	54,57	262,88
3	7 OCT	15,47	28,13	44	7 FÉV	86,80	22,53	84	7 JUN	52,10	251,54
4	10 OCT	16,40	28,13	45	10 FÉV	92,13	22,47	85	10 JUN	44,17	237,89
5	13 OCT	17,72	28,10	46	13 FÉV	93,43	22,53	86	13 JUN	39,27	225,33
6	16 OCT	18,13	28,80	47	16 FÉV	102,47	22,20	87	16 JUN	40,73	214,00
7	19 OCT	19,11	29,83	48	19 FÉV	93,57	21,93	88	19 JUN	32,20	200,33
8	22 OCT	16,85	33,47	49	22 FÉV	105,70	21,60	89	22 JUN	29,53	187,33
9	25 OCT	16,44	35,77	50	25 FÉV	95,60	21,37	90	25 JUN	29,60	173,33
10	28 OCT	16,62	38,53	51	28 FÉV	28,10	21,03	91	28 JUN	58,67	162,67
11	31 OCT	16,32	40,50	52	3 MAR	13,60	20,80	92	1 JUL	116,77	155,33
12	3 NOV	17,63	41,03	53	6 MAR	62,93	21,03	93	4 JUL	62,67	148,67
13	6 NOV	21,43	41,97	54	9 MAR	74,90	21,60	94	7 JUL	59,57	144,67
14	9 NOV	64,97	44,37	55	12 MAR	78,87	22,20	95	10 JUL	47,97	142,33
15	12 NOV	58,60	46,73	56	15 MAR	81,20	23,17	96	13 JUL	55,13	142,00
16	15 NOV	39,50	47,50	57	18 MAR	83,43	23,53	97	16 JUL	61,37	143,33
17	18 NOV	69,43	47,47	58	21 MAR	82,83	25,83	98	19 JUL	64,57	147,67
18	21 NOV	48,83	45,77	59	24 MAR	85,73	26,10	99	22 JUL	60,30	152,00
19	24 NOV	18,80	44,80	60	27 MAR	85,77	27,23	100	25 JUL	60,53	155,33
20	27 NOV	13,70	43,27	61	30 MAR	88,80	27,25	101	28 JUL	47,47	159,33
21	30 NOV	11,97	40,07	62	2 AVR	86,90	27,87	102	31 JUL	54,67	163,00
22	3 DÉC	12,47	38,03	63	5 AVR	83,97	33,80	103	3 AOÛ	50,27	164,00
23	6 DÉC	17,97	37,03	64	8 AVR	94,03	40,20	104	6 AOÛ	79,43	163,00
24	9 DÉC	17,77	35,90	65	11 AVR	75,83	45,57	105	9 AOÛ	72,67	139,00
25	12 DÉC	14,80	36,10	66	14 AVR	117,23	48,80	106	12 AOÛ	102,10	102,13
26	15 DÉC	12,10	35,53	67	17 AVR	164,10	51,07	107	15 AOÛ	61,13	86,67
27	18 DÉC	10,57	34,57	68	20 AVR	126,37	57,30	108	18 AOÛ	59,33	77,67
28	21 DÉC	9,93	32,97	69	23 AVR	95,23	63,60	109	21 AOÛ	72,33	71,27
29	24 DÉC	12,33	32,17	70	26 AVR	114,70	83,43	110	24 AOÛ	82,37	66,67
30	27 DÉC	11,13	30,40	71	29 AVR	115,17	101,80	111	27 AOÛ	87,33	60,33
31	30 DÉC	24,27	28,97	72	2 MAI	102,33	131,33	112	30 AOÛ	70,33	56,00
32	2 JAN	55,30	27,77	73	5 MAI	114,33	159,67	113	2 SEP	43,90	52,77
33	5 JAN	67,50	26,77	74	8 MAI	119,67	185,67	114	5 SEP	29,40	50,57
34	8 JAN	64,33	26,00	75	11 MAI	123,33	207,00	115	8 SEP	19,37	47,50
35	11 JAN	54,13	25,23	76	14 MAI	115,00	232,00	116	11 SEP	16,60	44,37
36	14 JAN	12,65	24,07	77	17 MAI	122,33	253,00	117	14 SEP	16,10	41,77
37	17 JAN	26,67	23,80	78	20 MAI	102,00	266,67	118	17 SEP	16,23	40,77
38	20 JAN	79,23	22,93	79	23 MAI	88,00	262,67	119	20 SEP	15,23	38,87
39	23 JAN	83,13	23,07	80	26 MAI	82,53	263,00	120	23 SEP	17,40	36,37
40	26 JAN	86,13	22,53	81	29 MAI	85,93	262,00	121	26 SEP	16,70	34,27
41	29 JAN	78,63	22,20					122	29 SEP	15,07	31,47

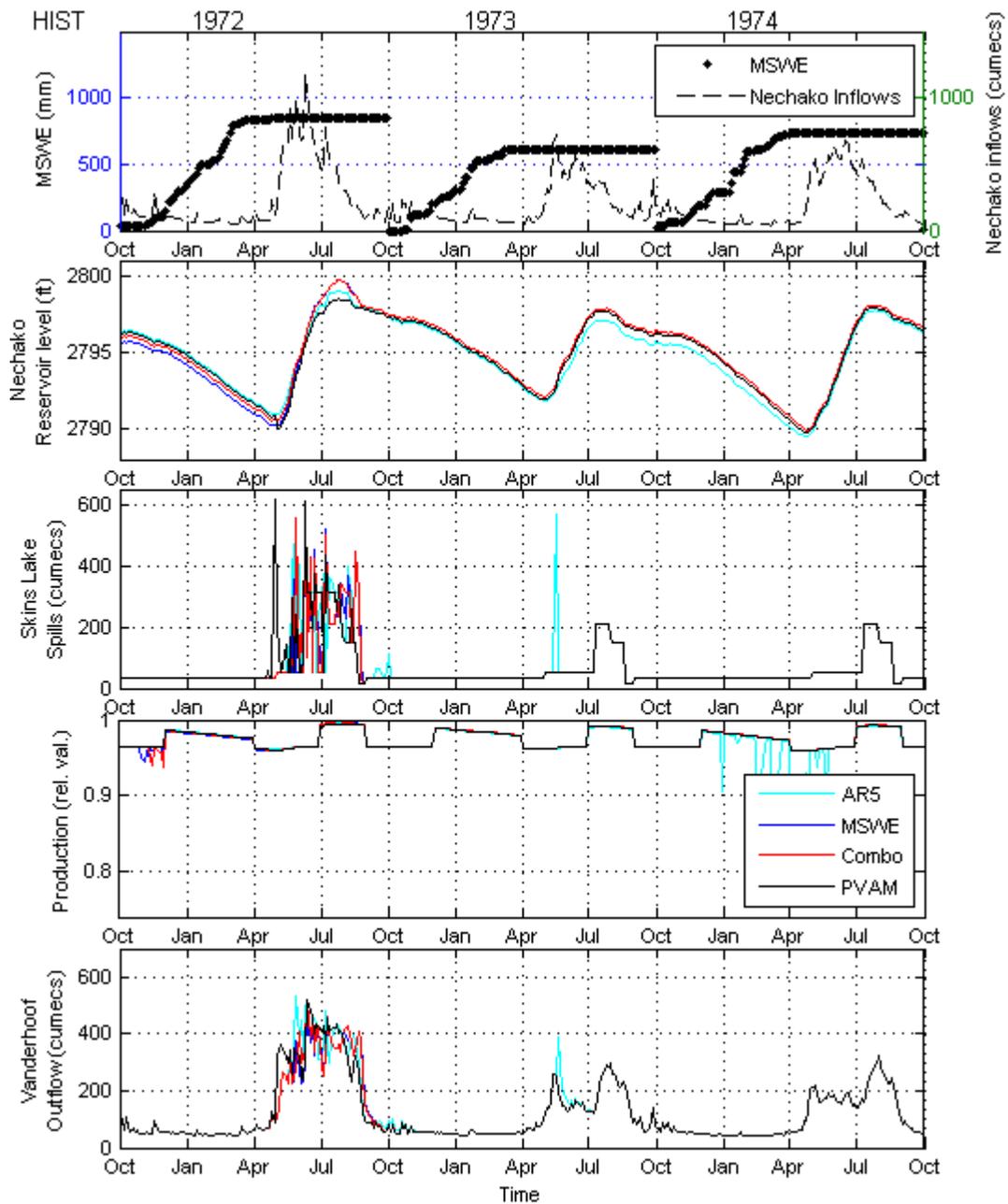
ANNEXE B – RÉSULTATS DE SIMULATION EN MODE HISTORIQUE

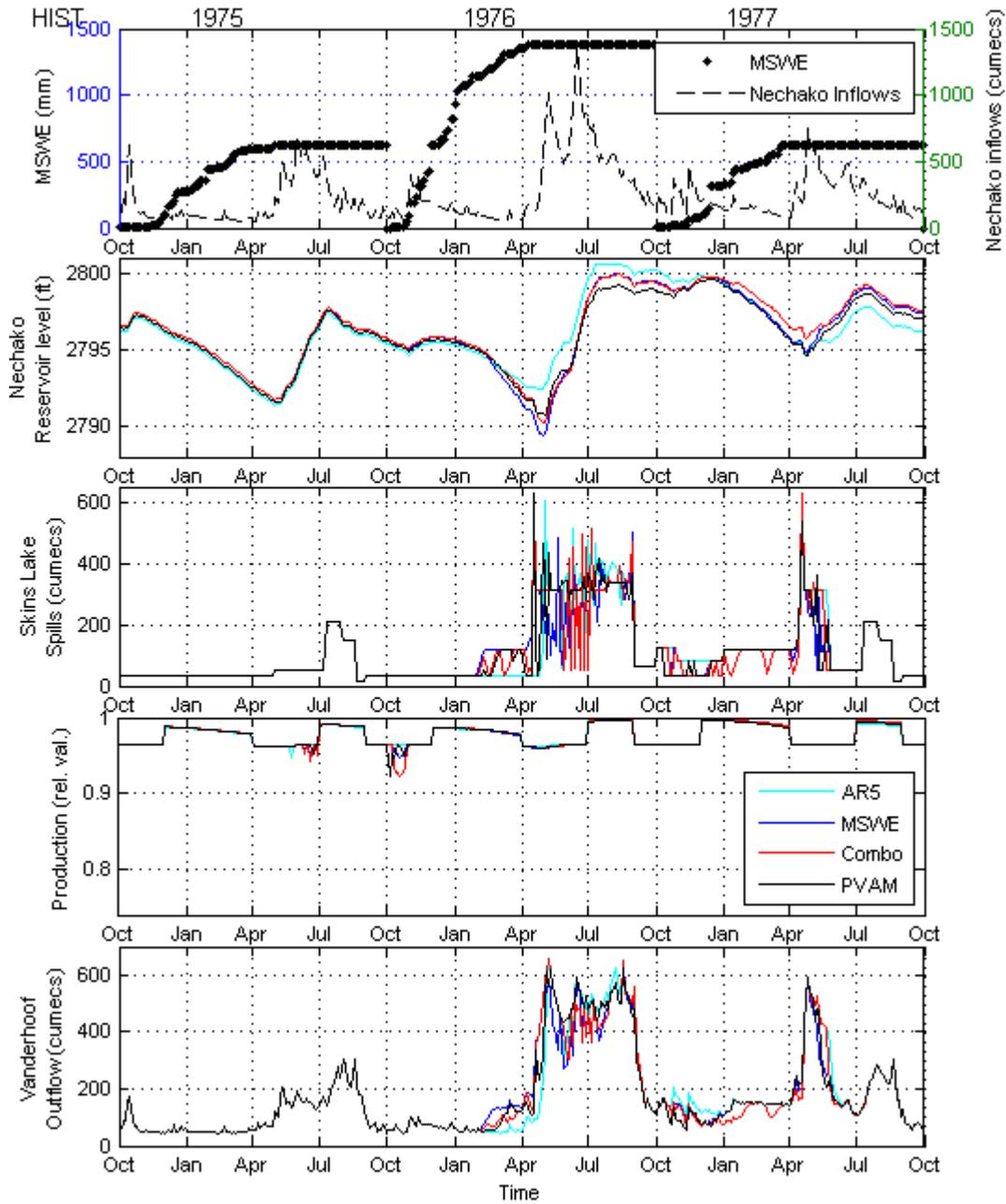


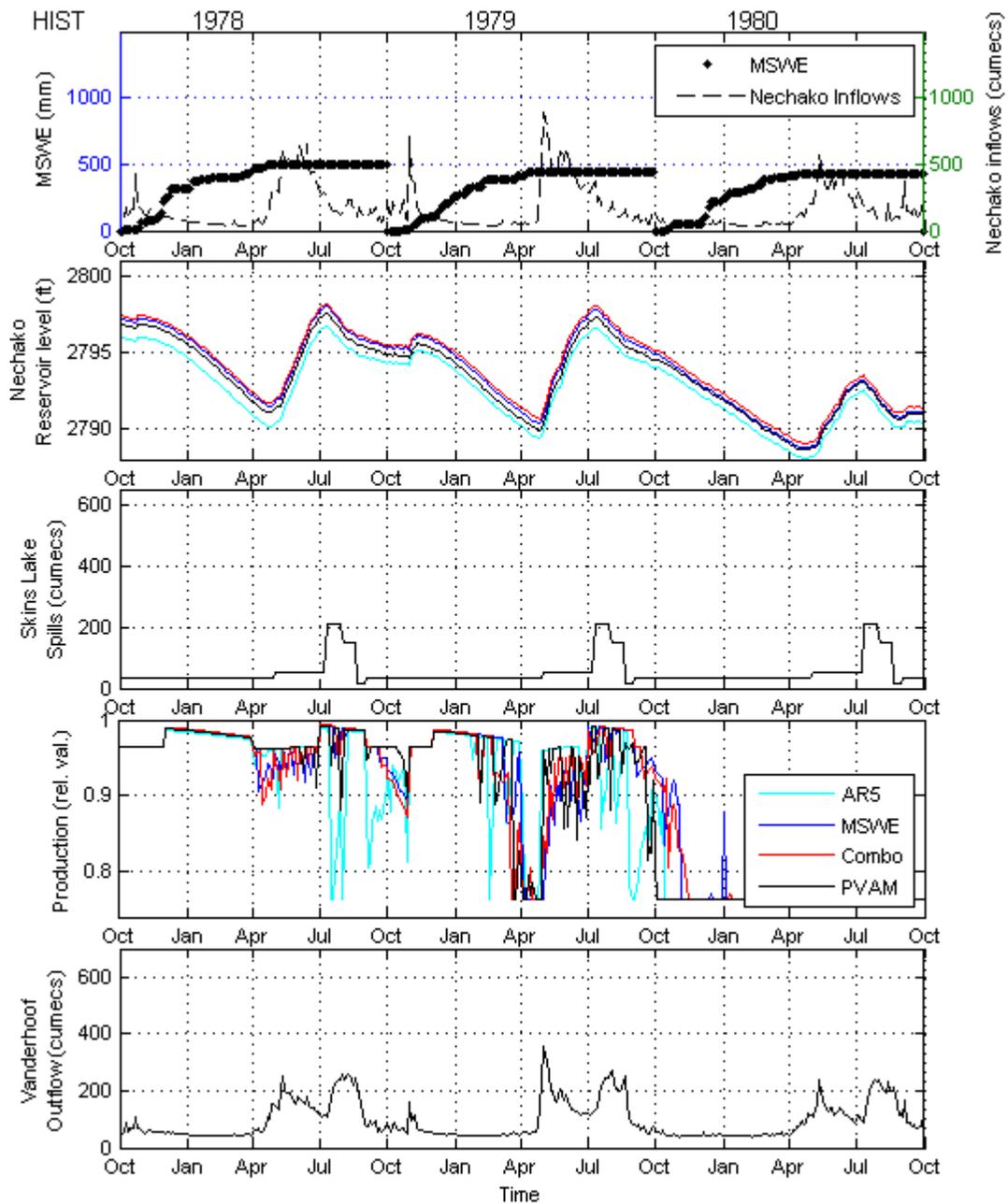


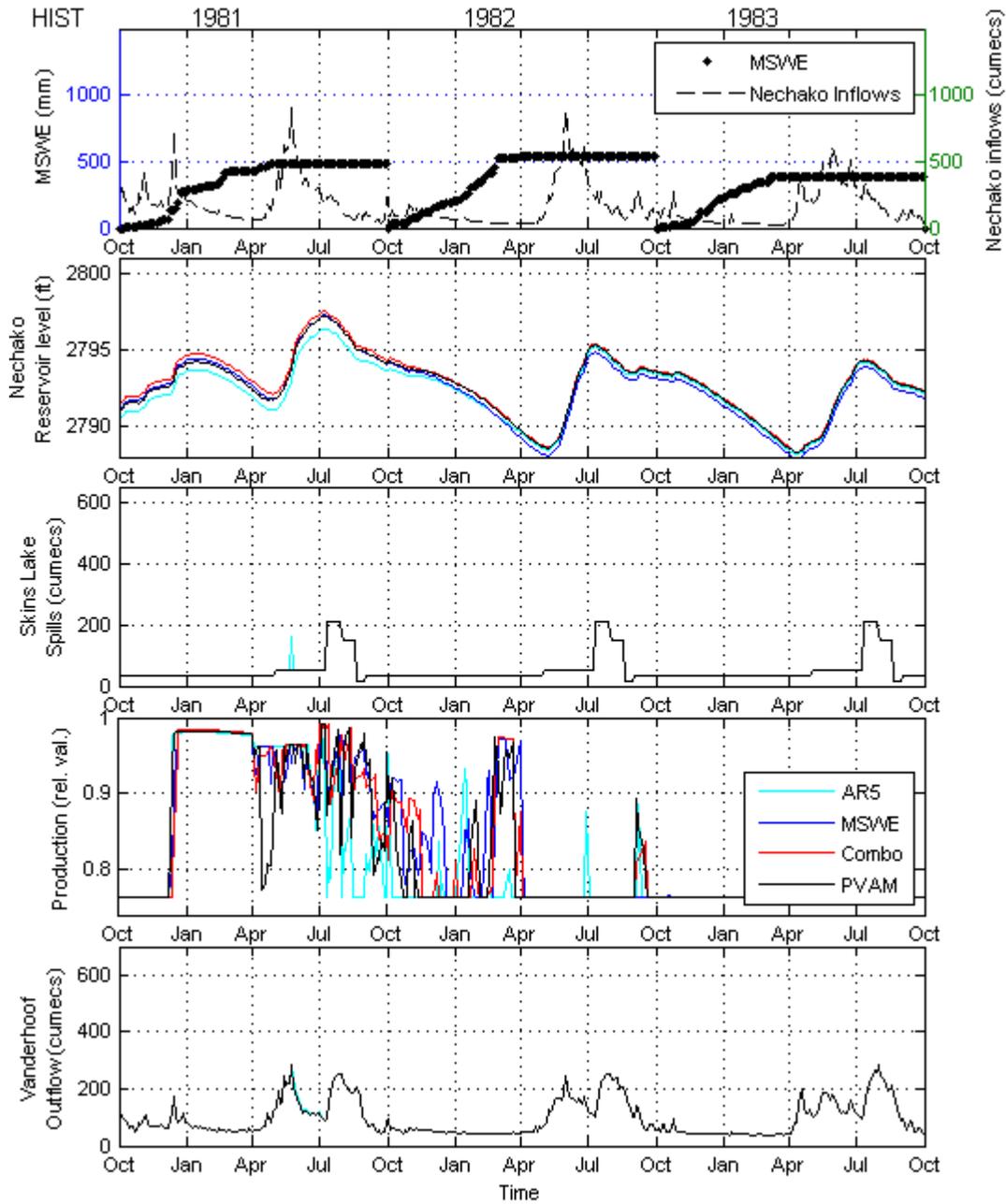


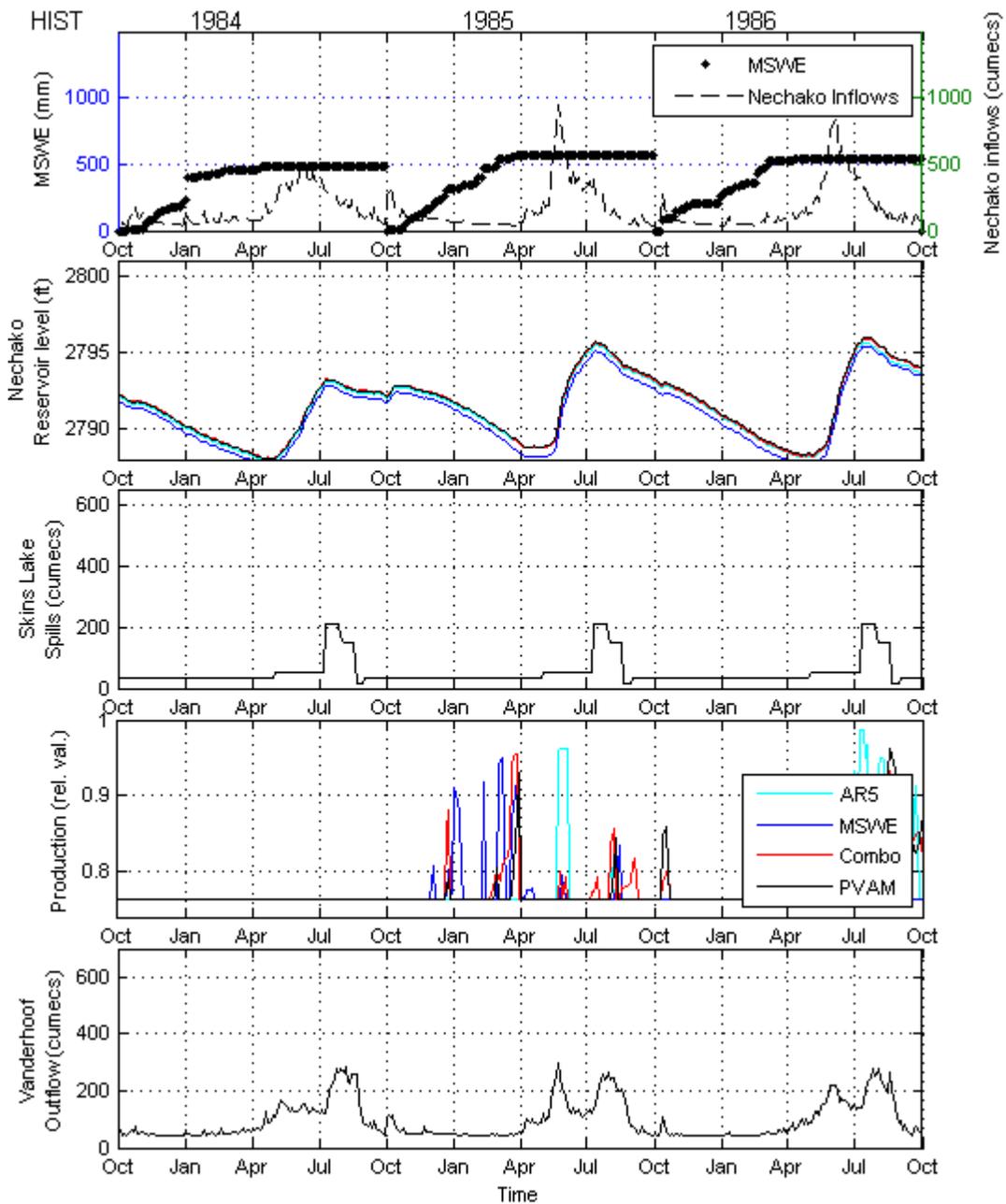


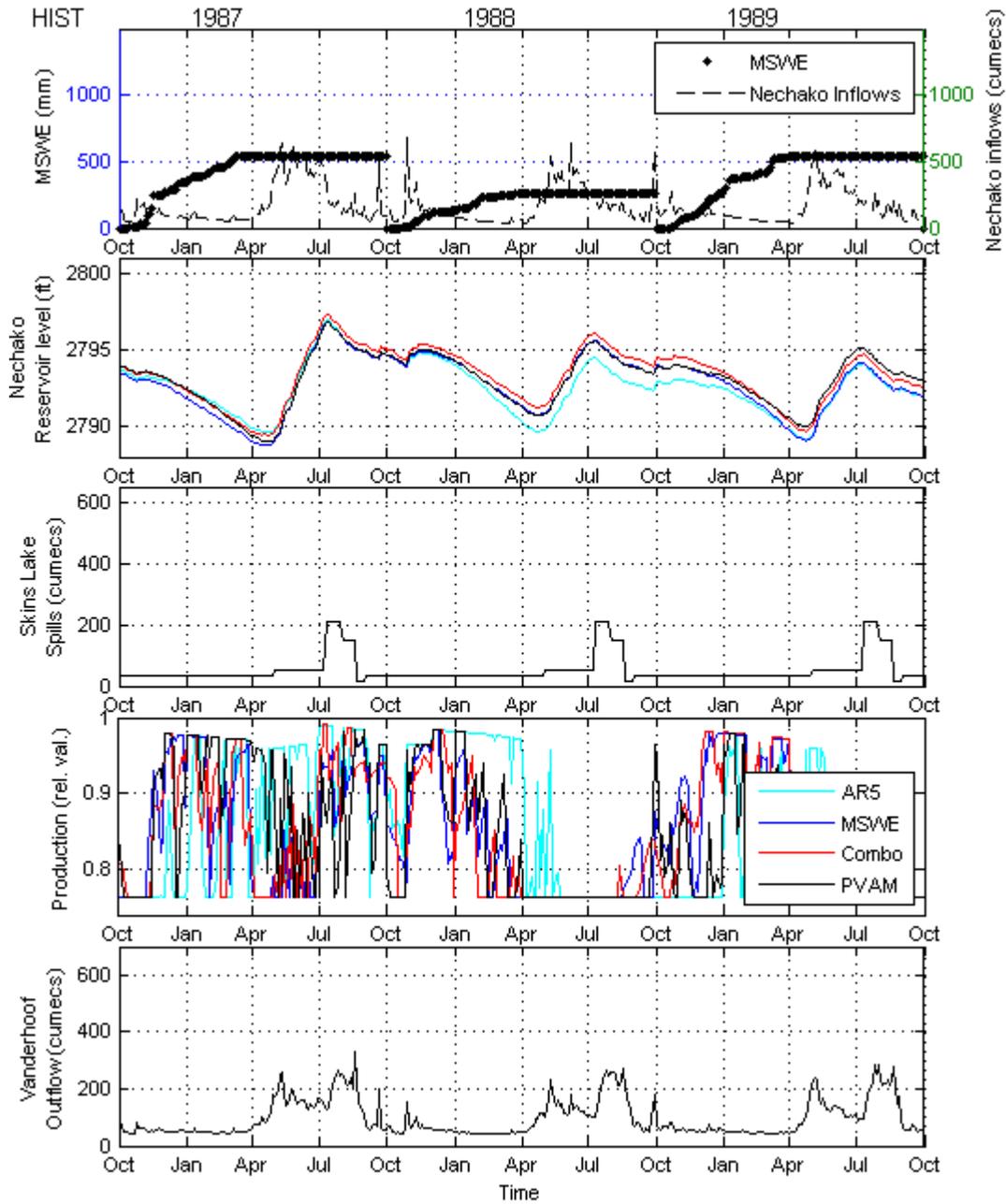


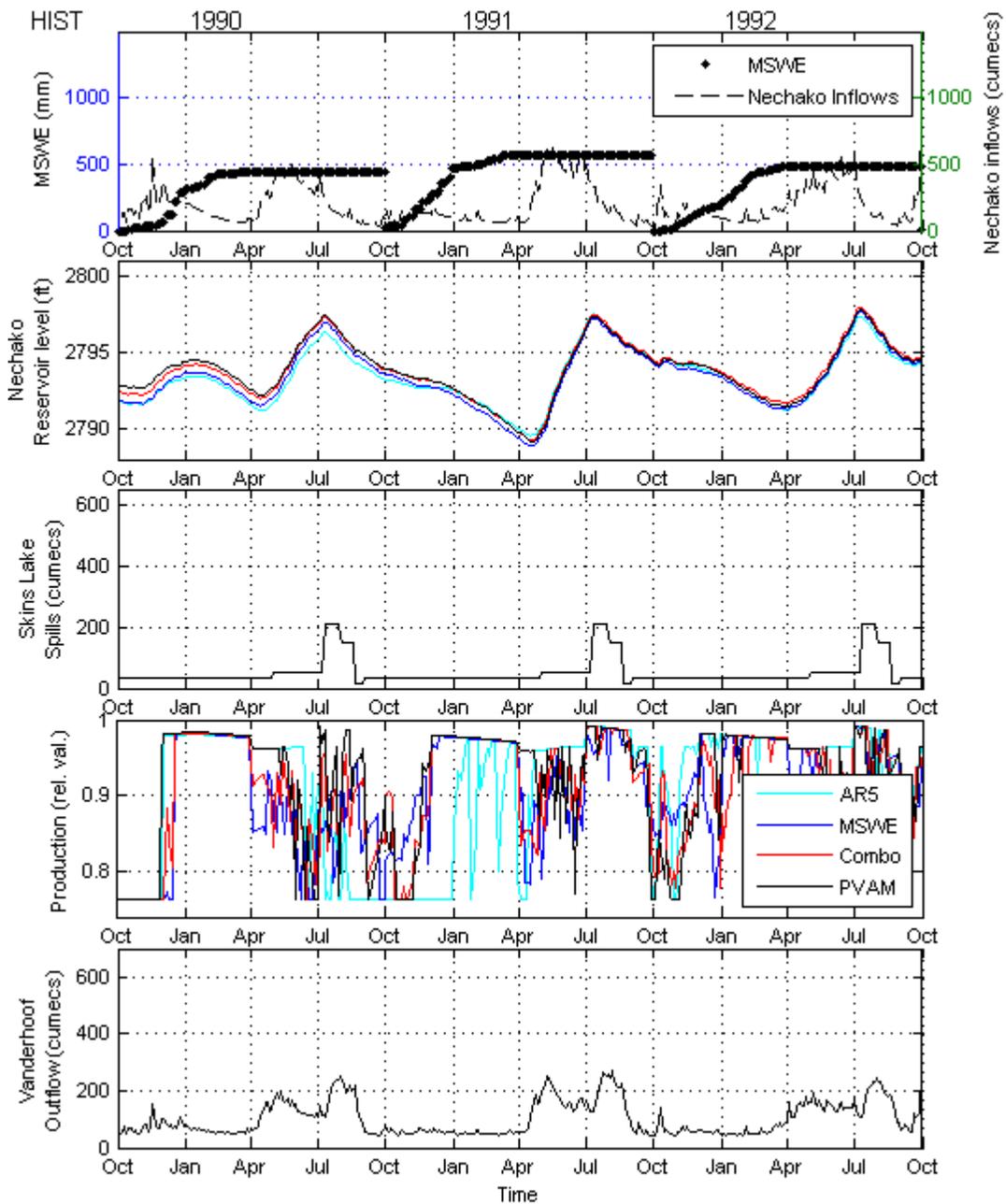


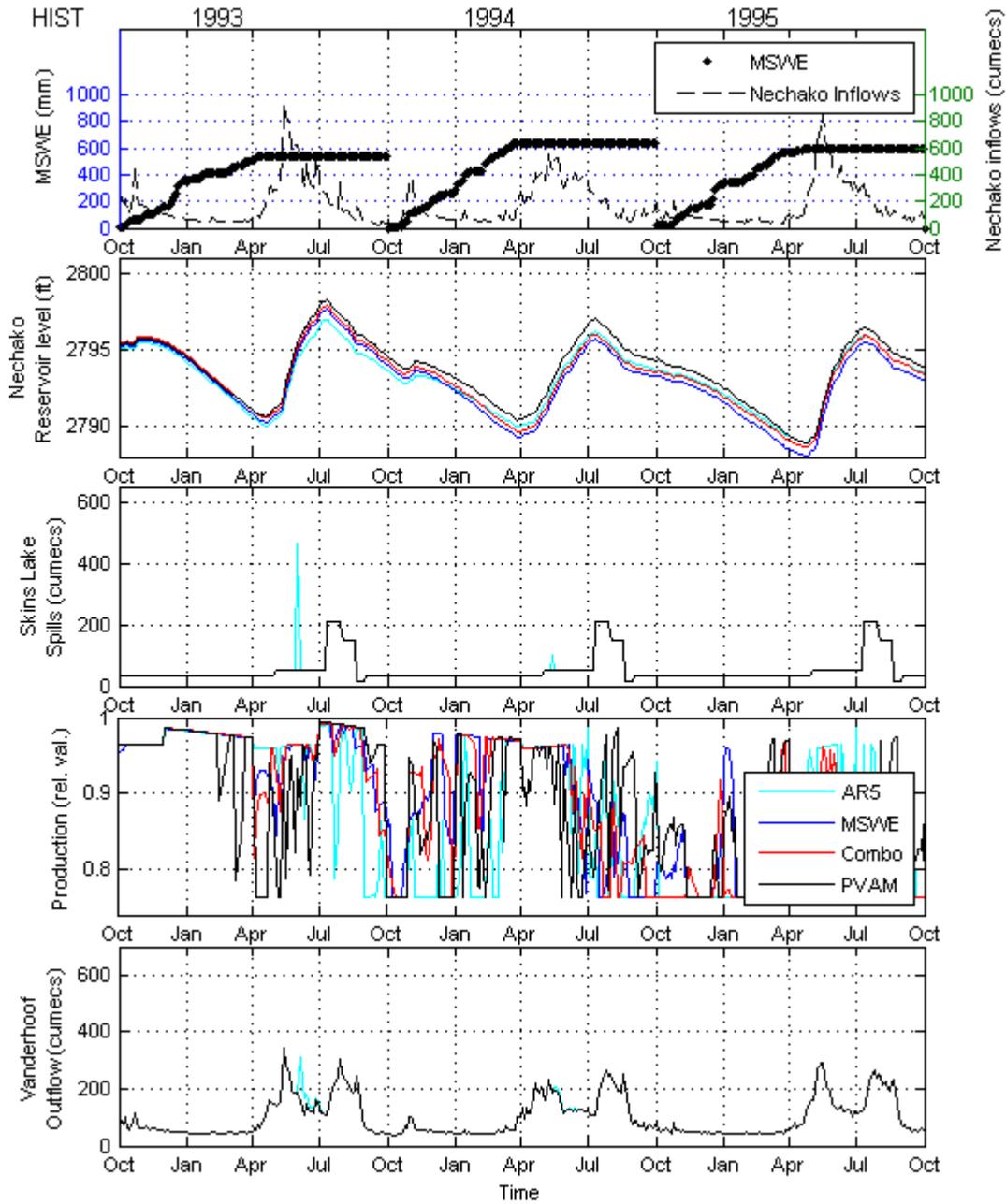


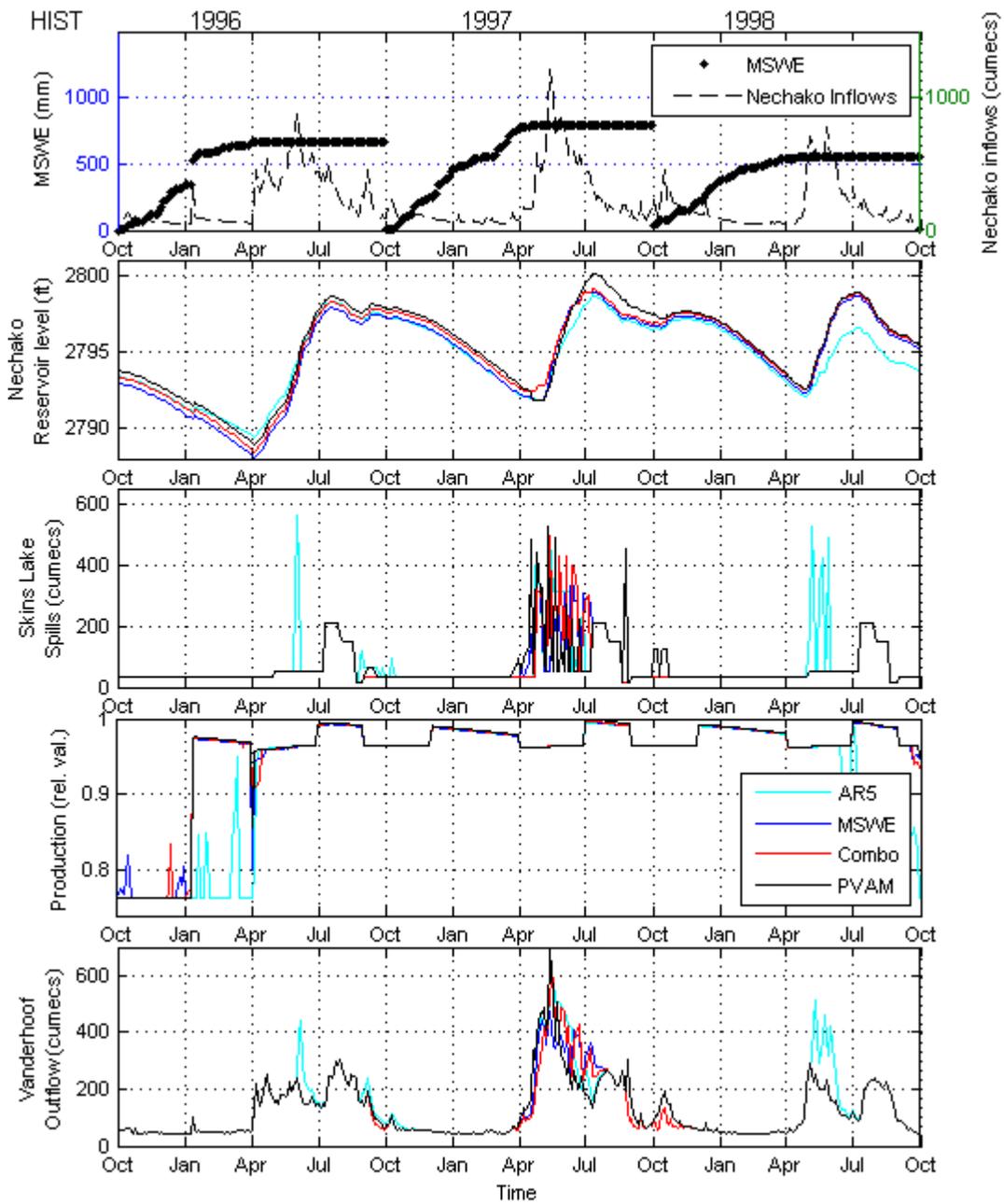


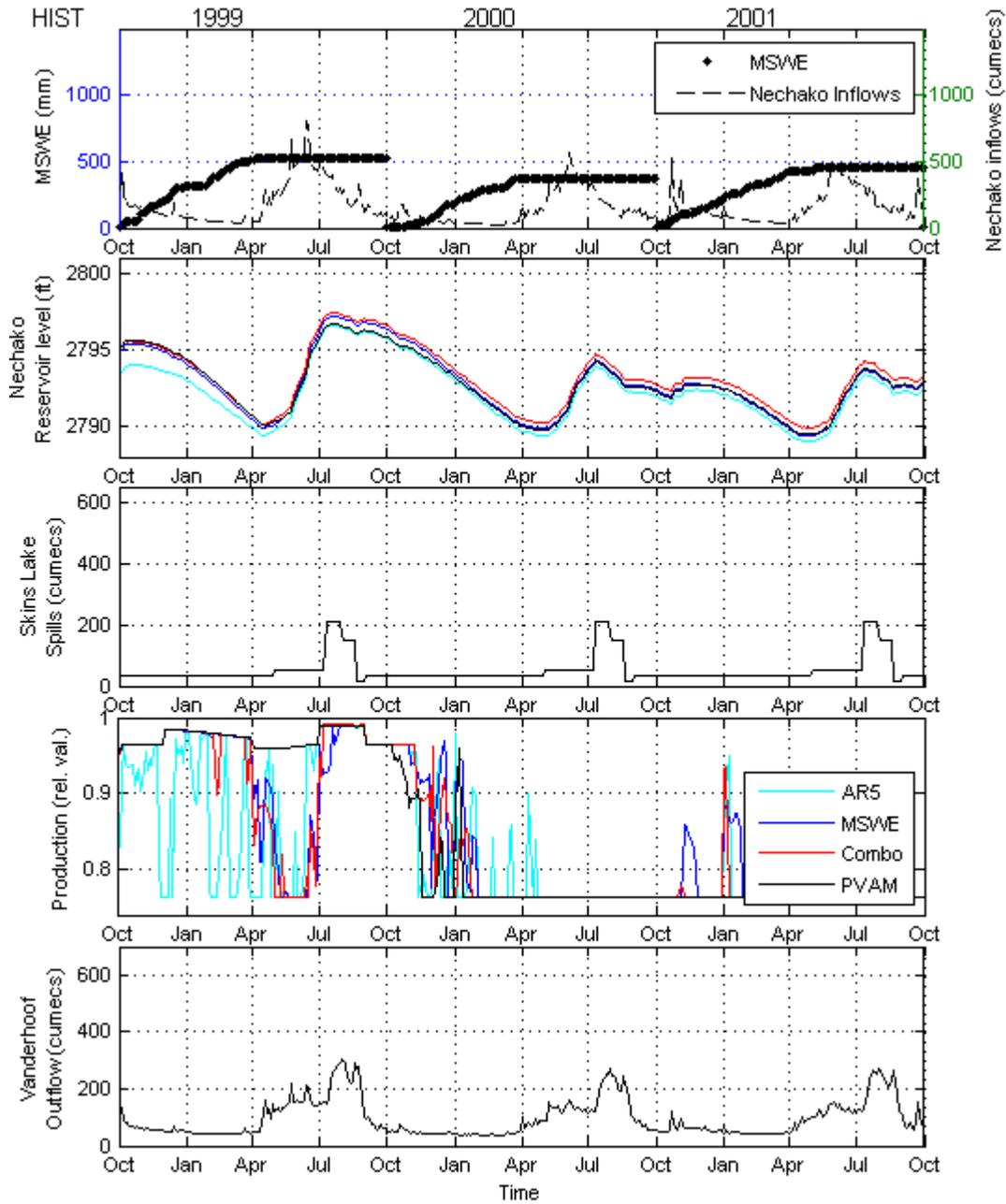


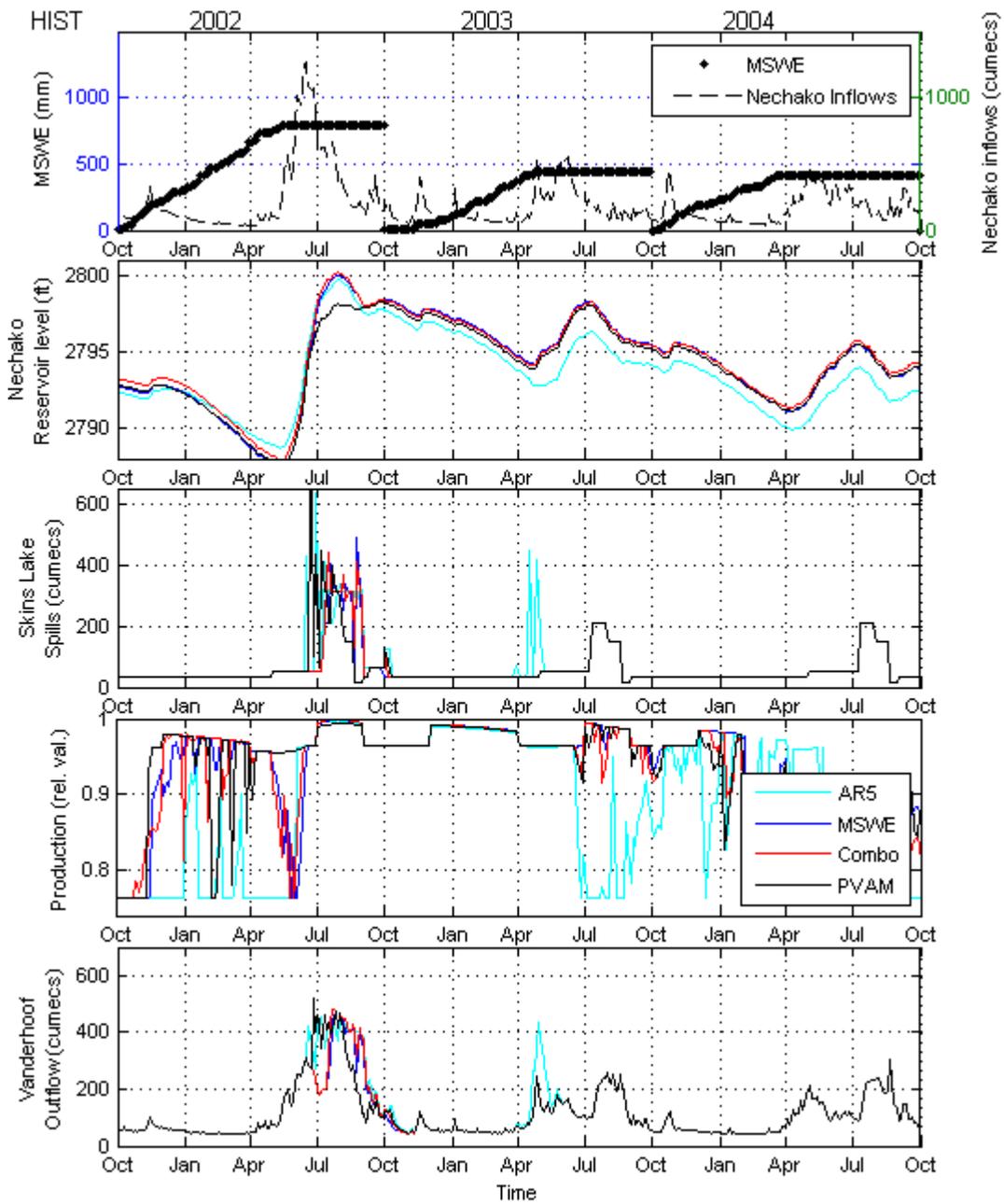


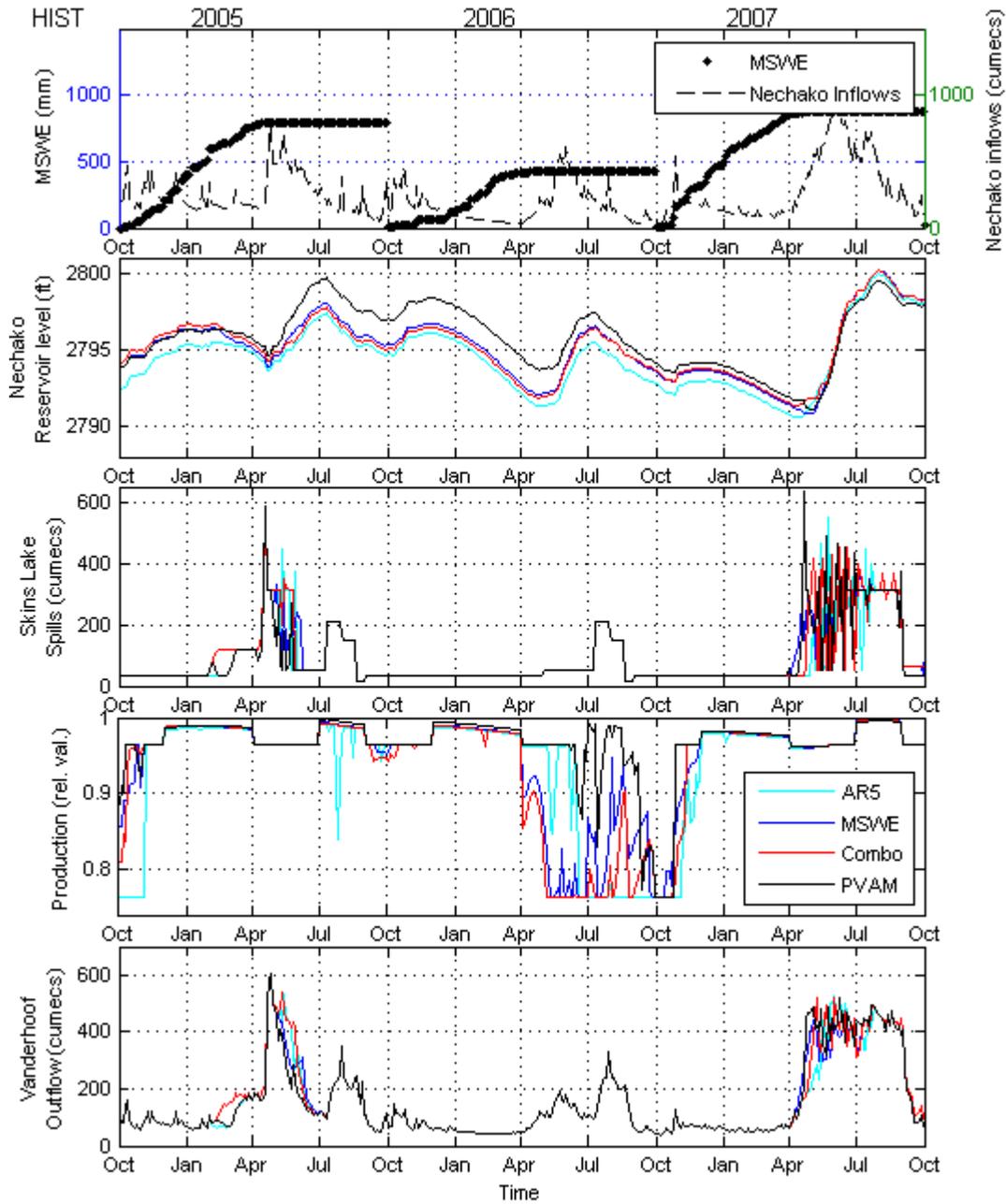


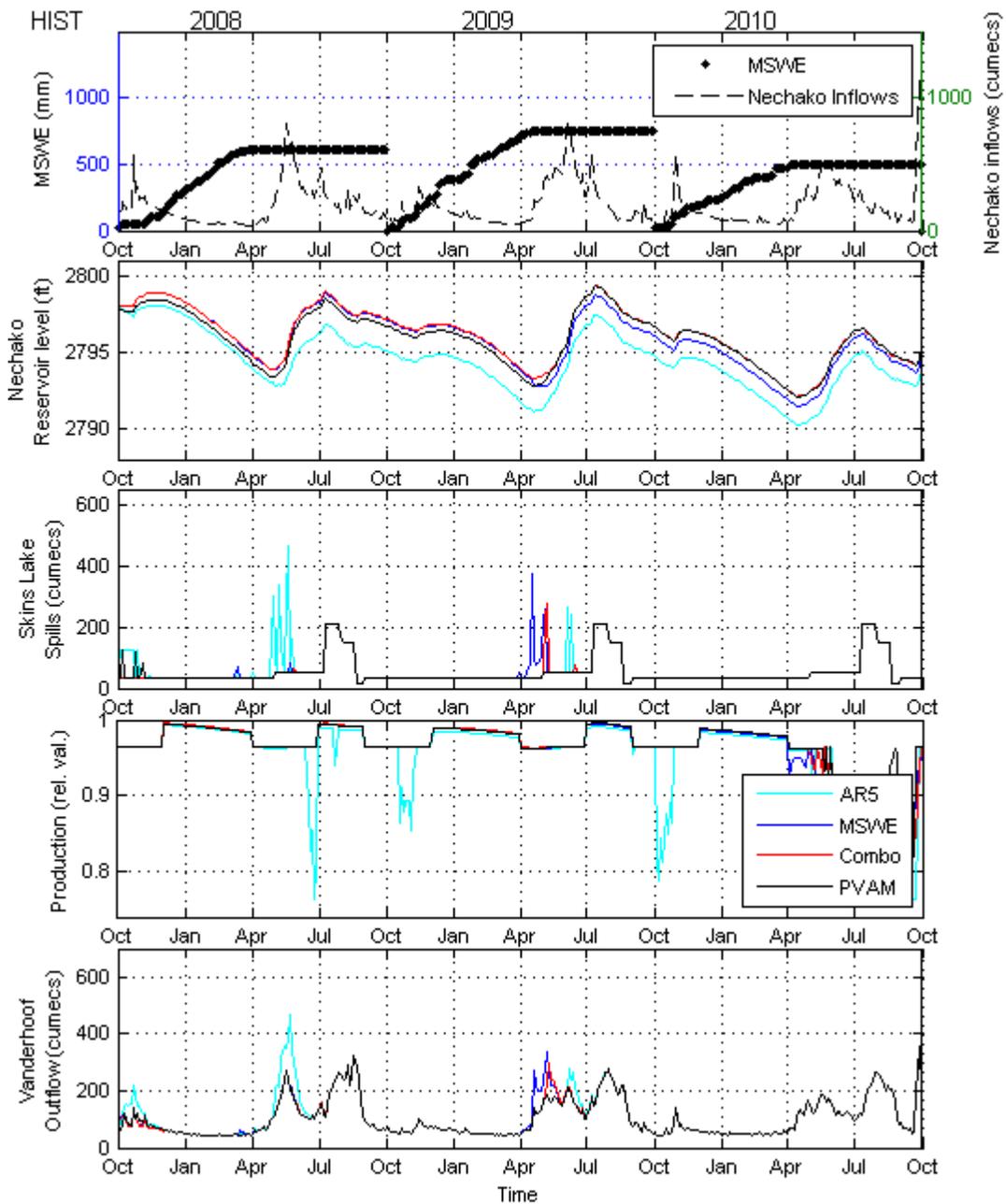


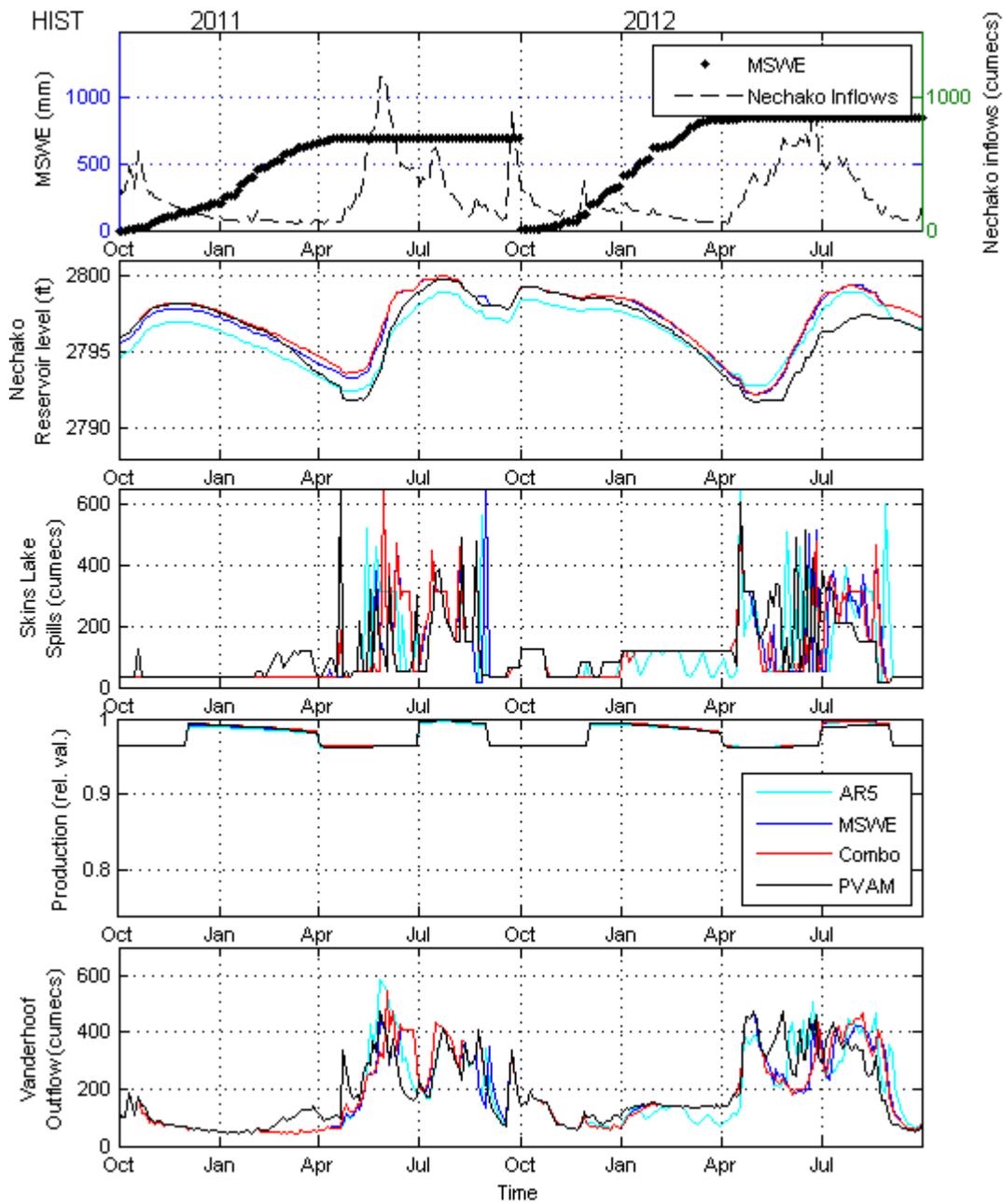




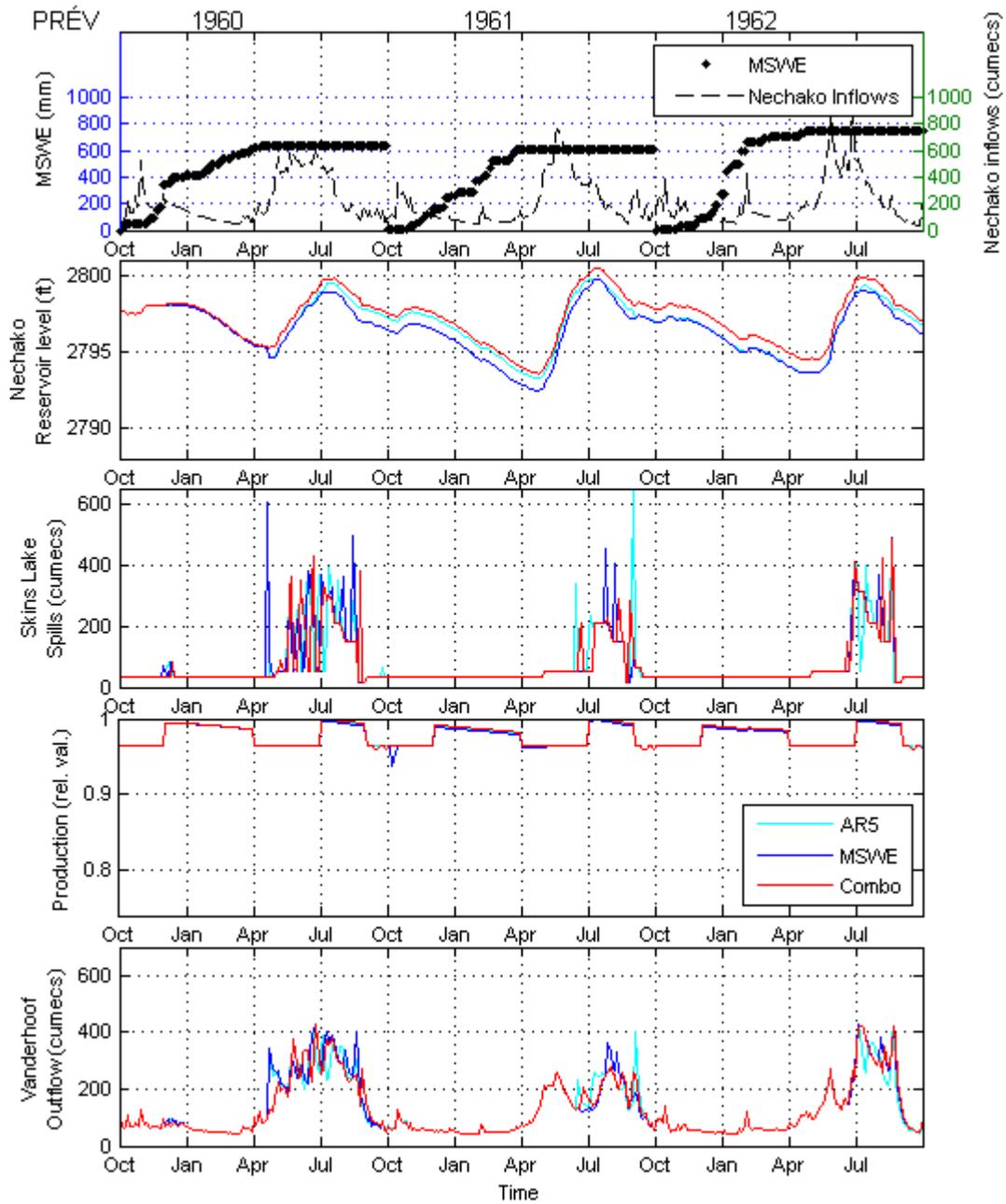


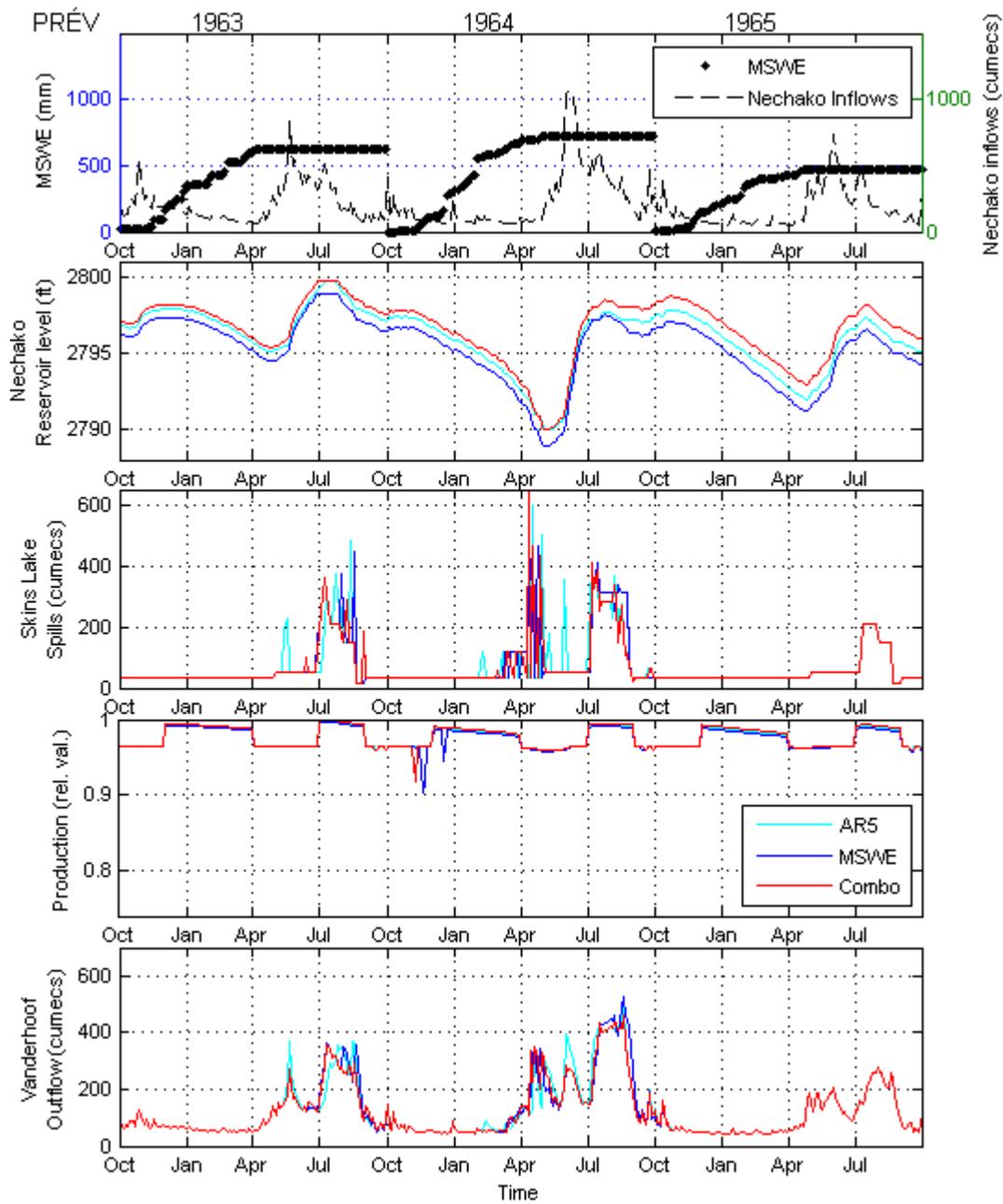


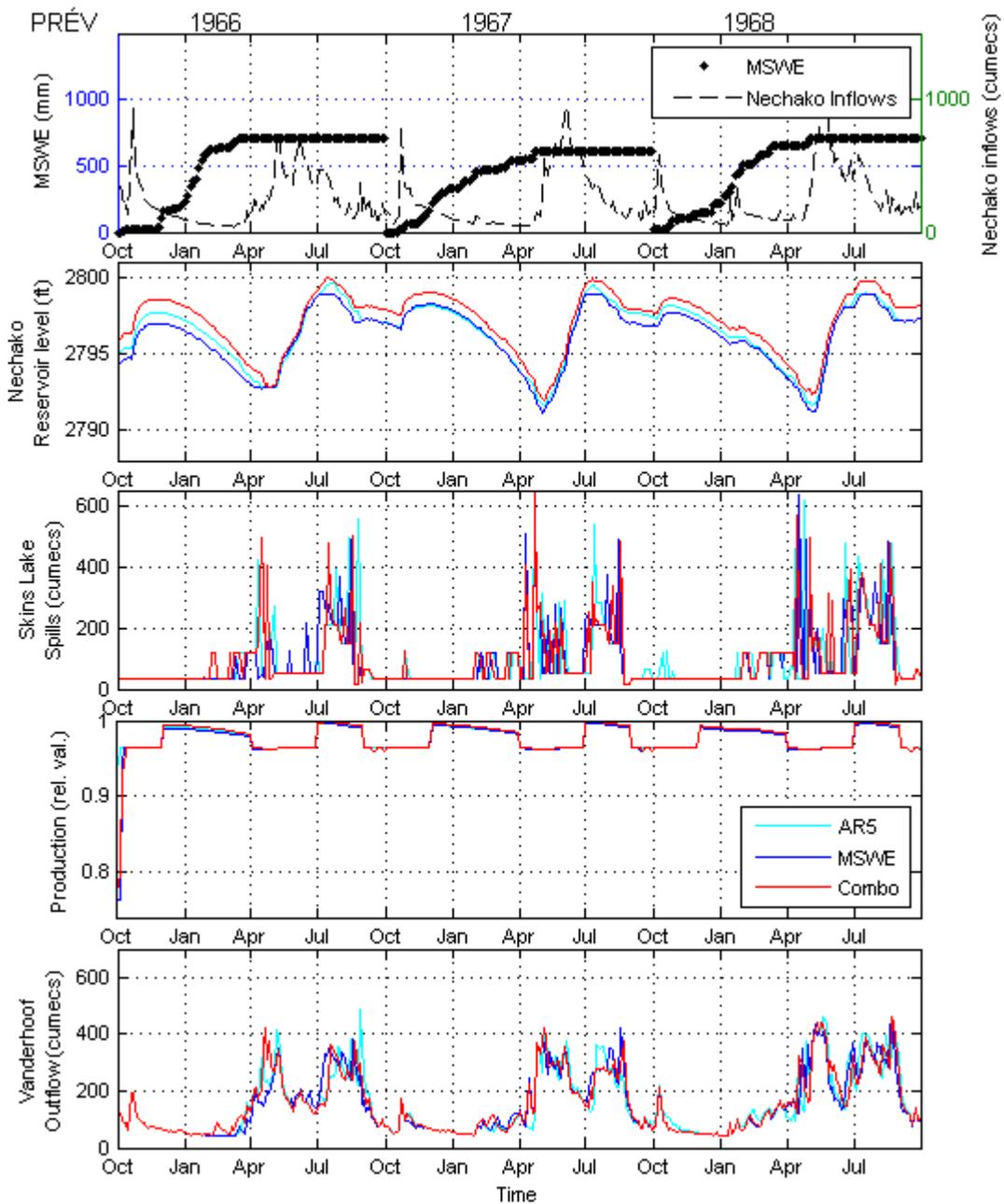


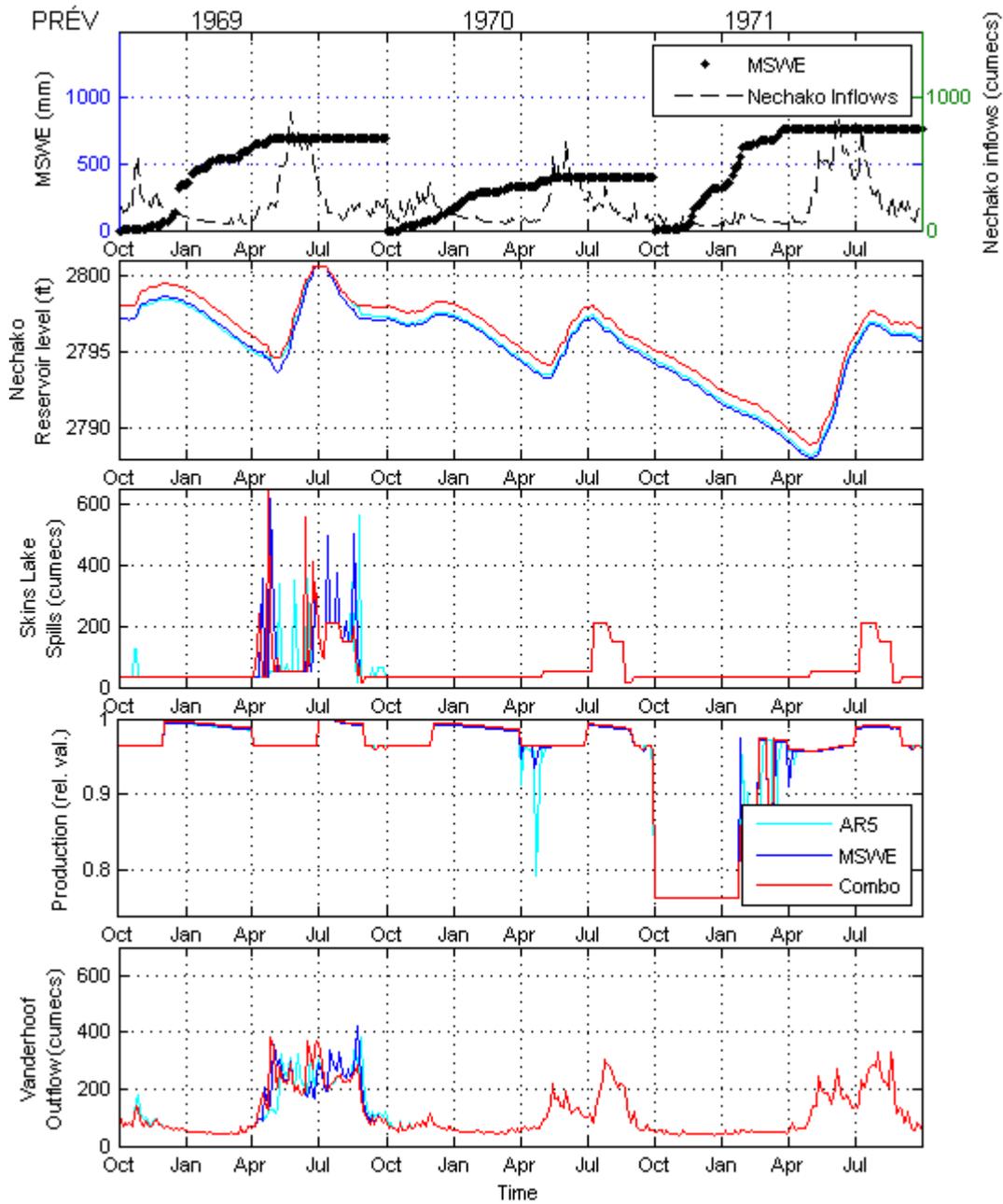


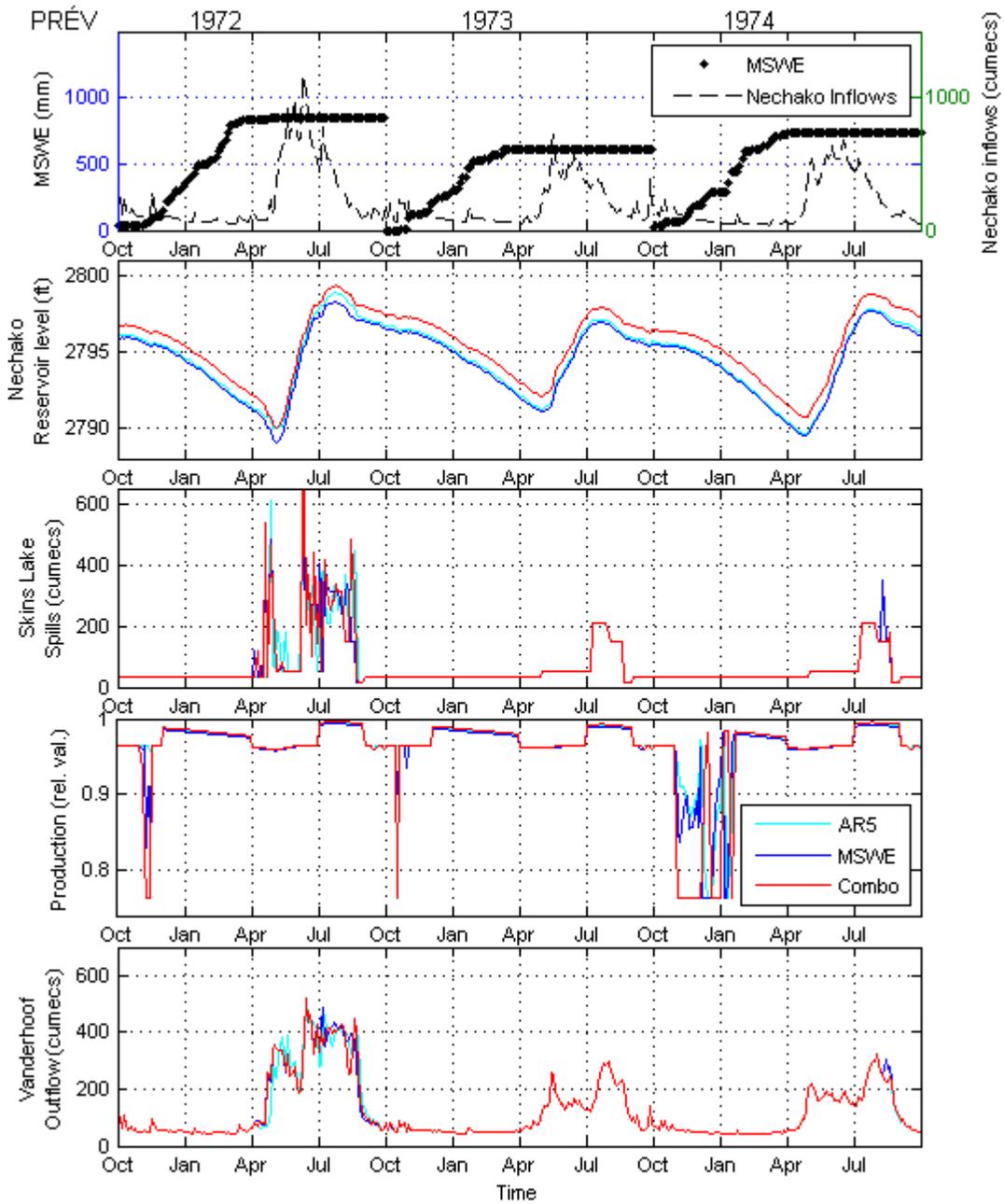
ANNEXE C – RÉSULTATS DE SIMULATION EN MODE PRÉVISIONNEL

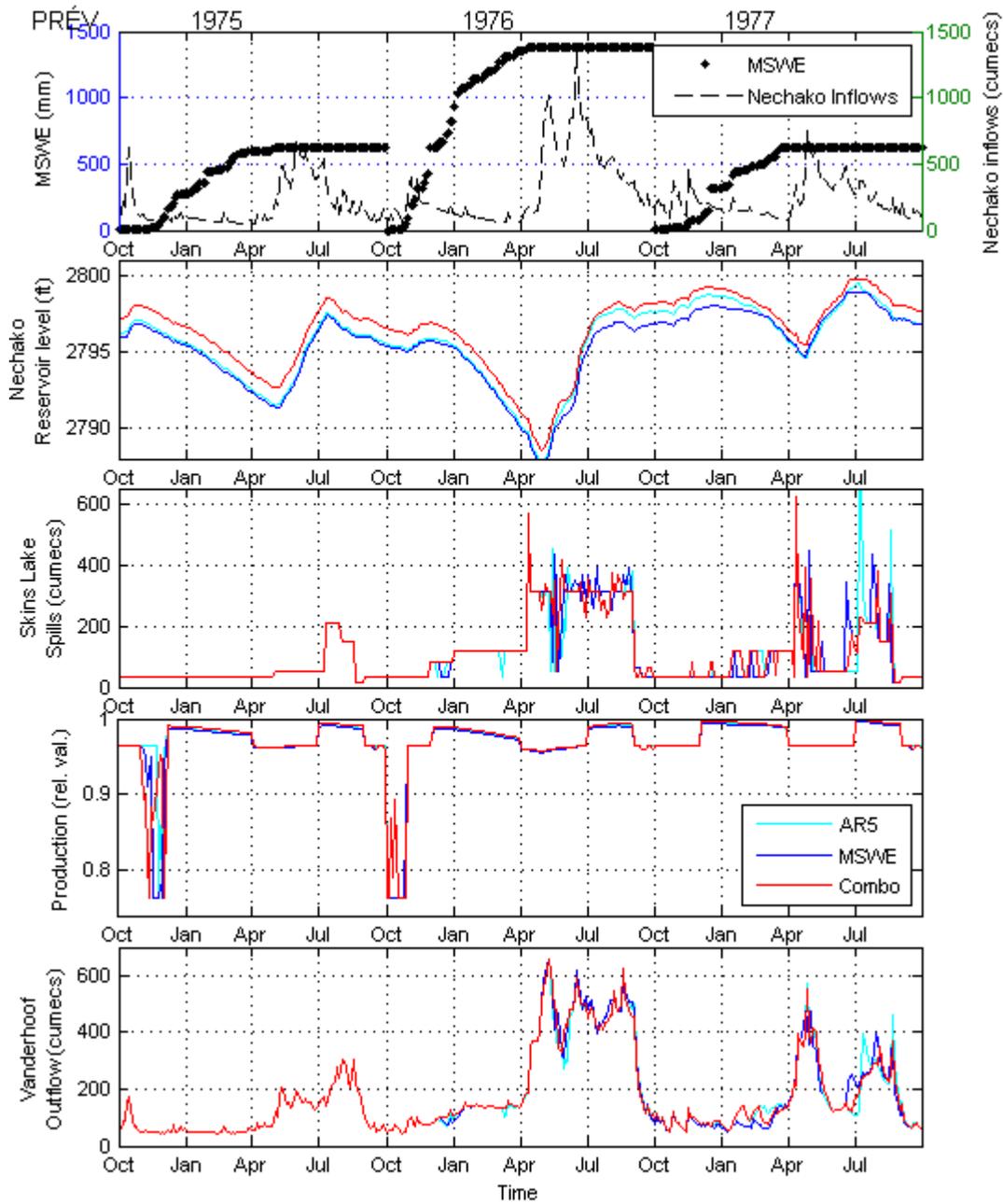


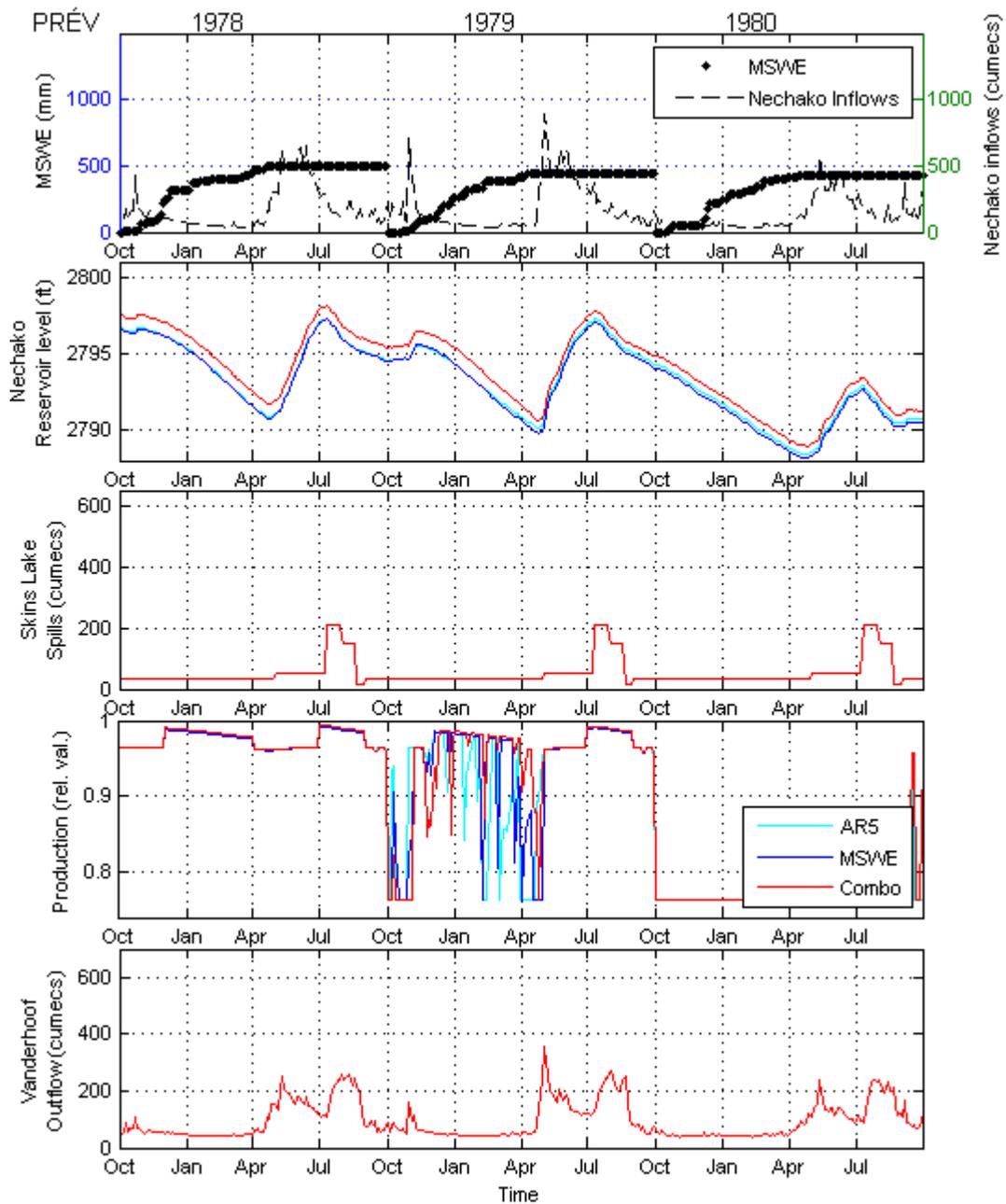


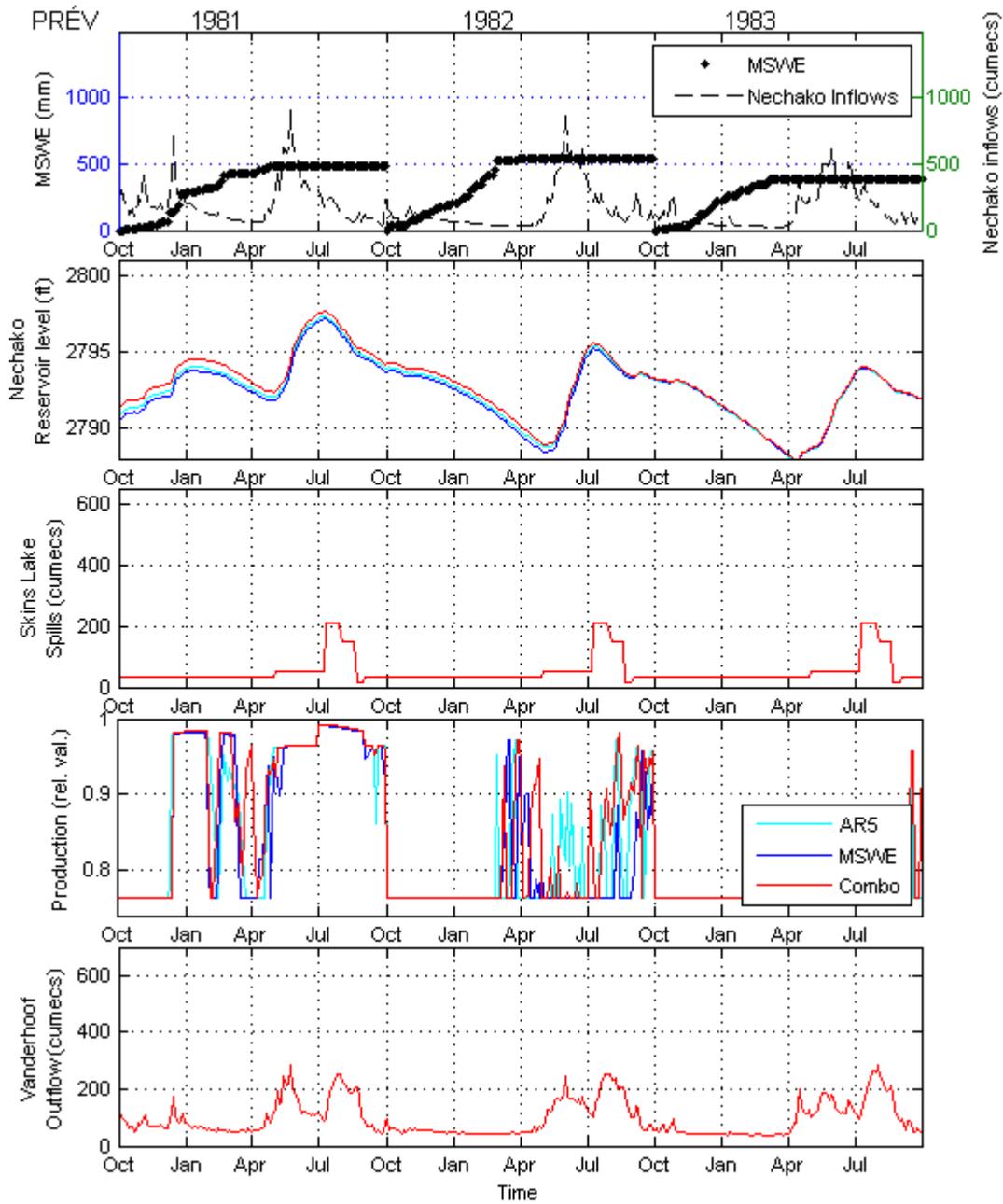


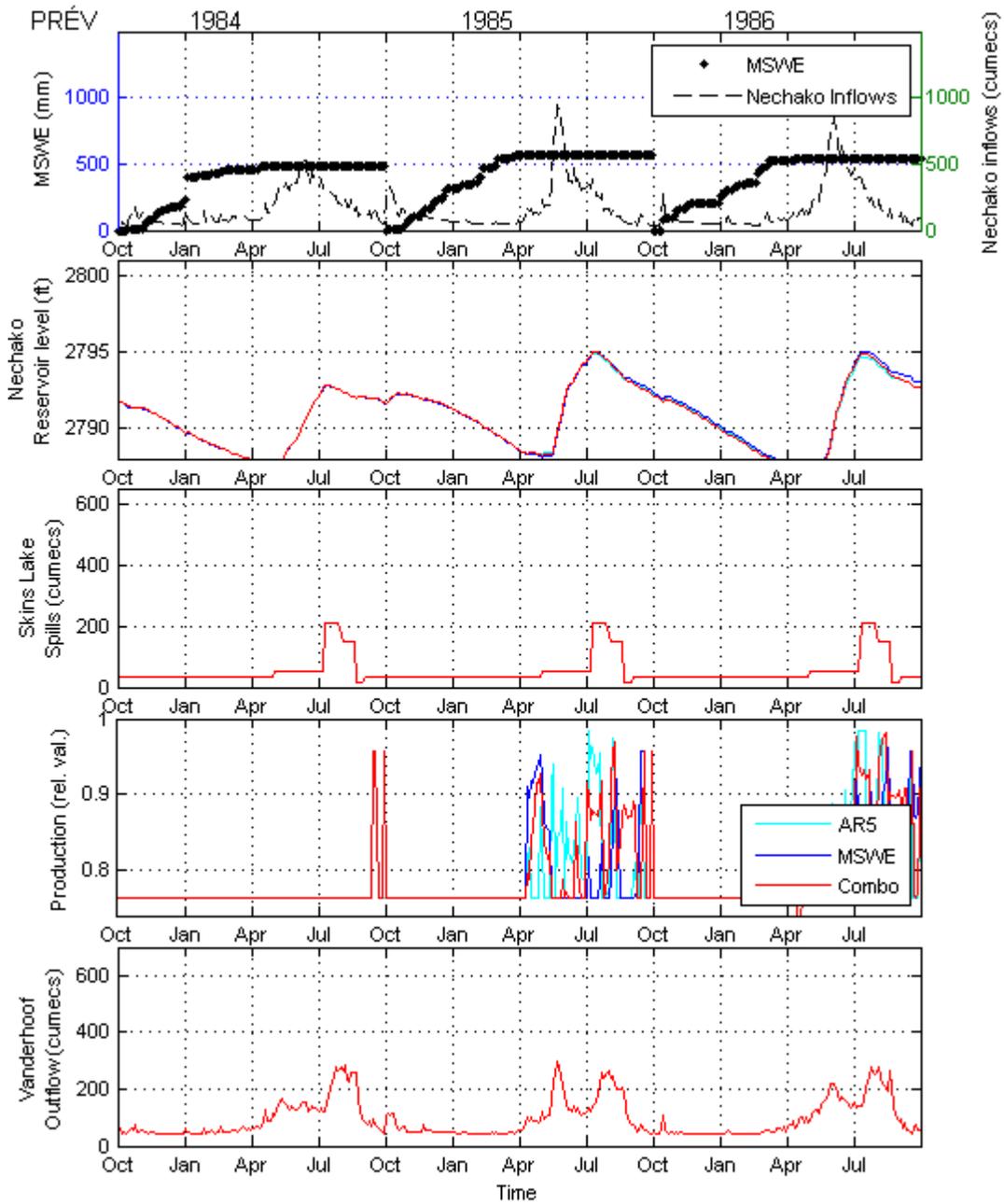


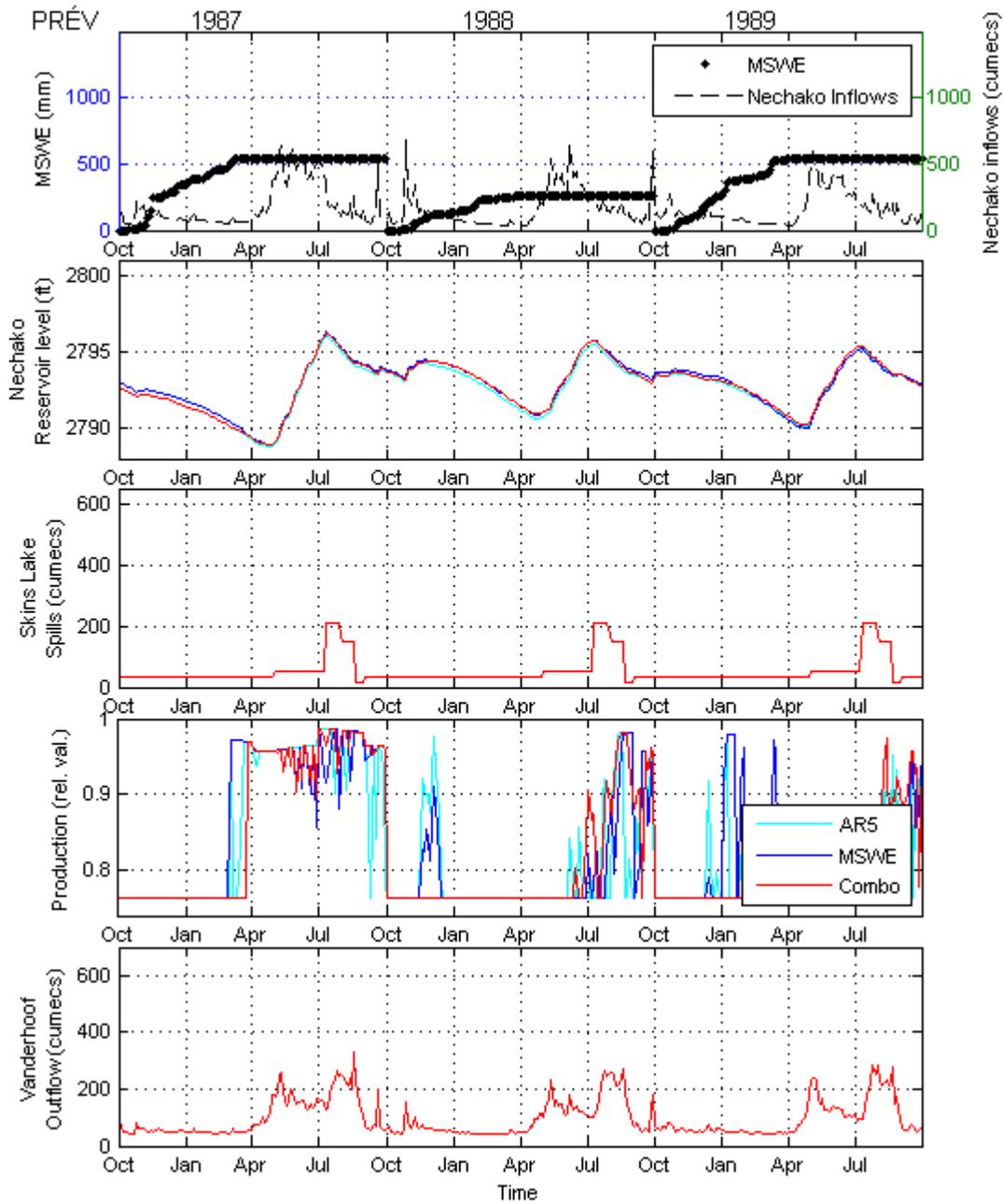


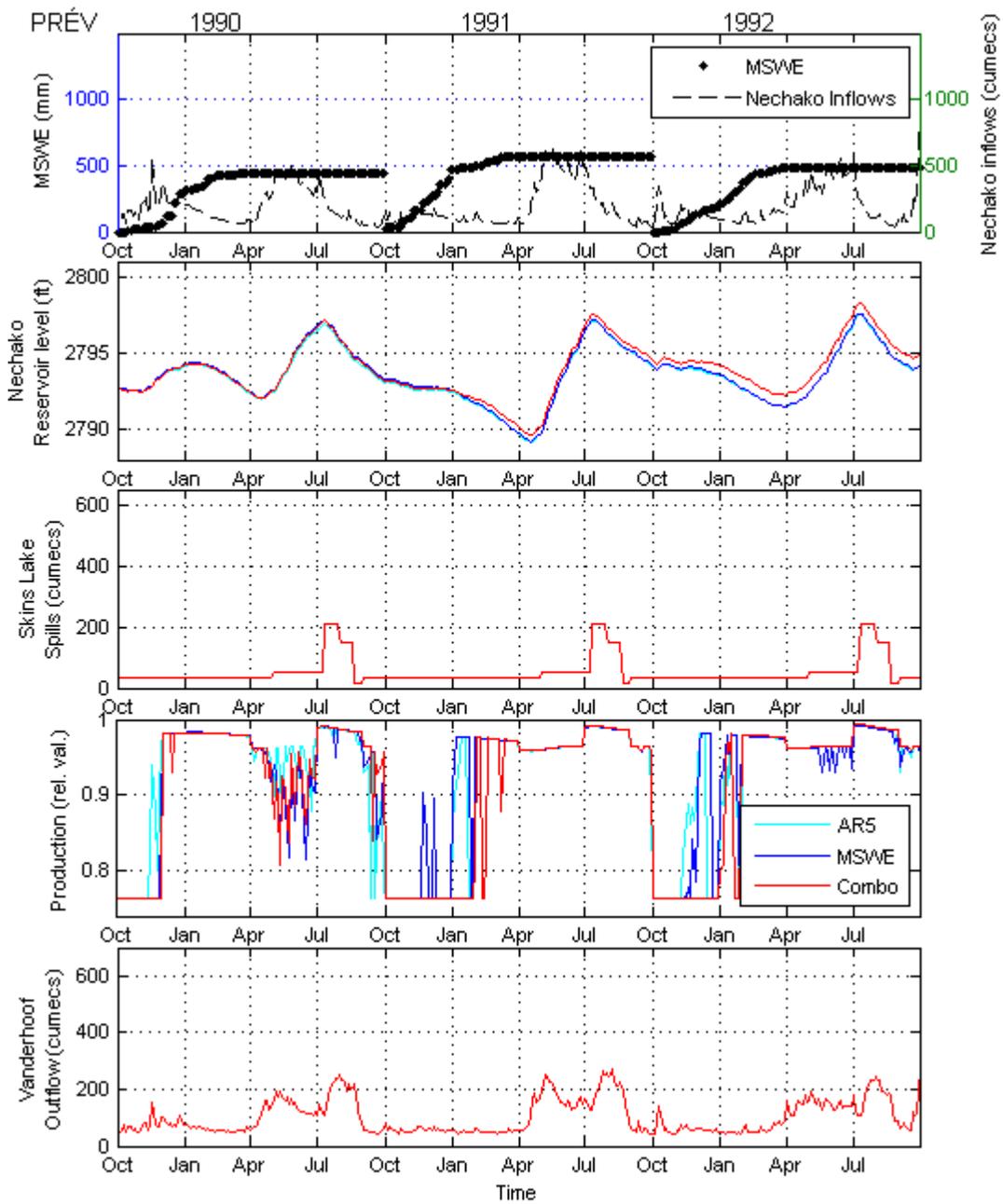


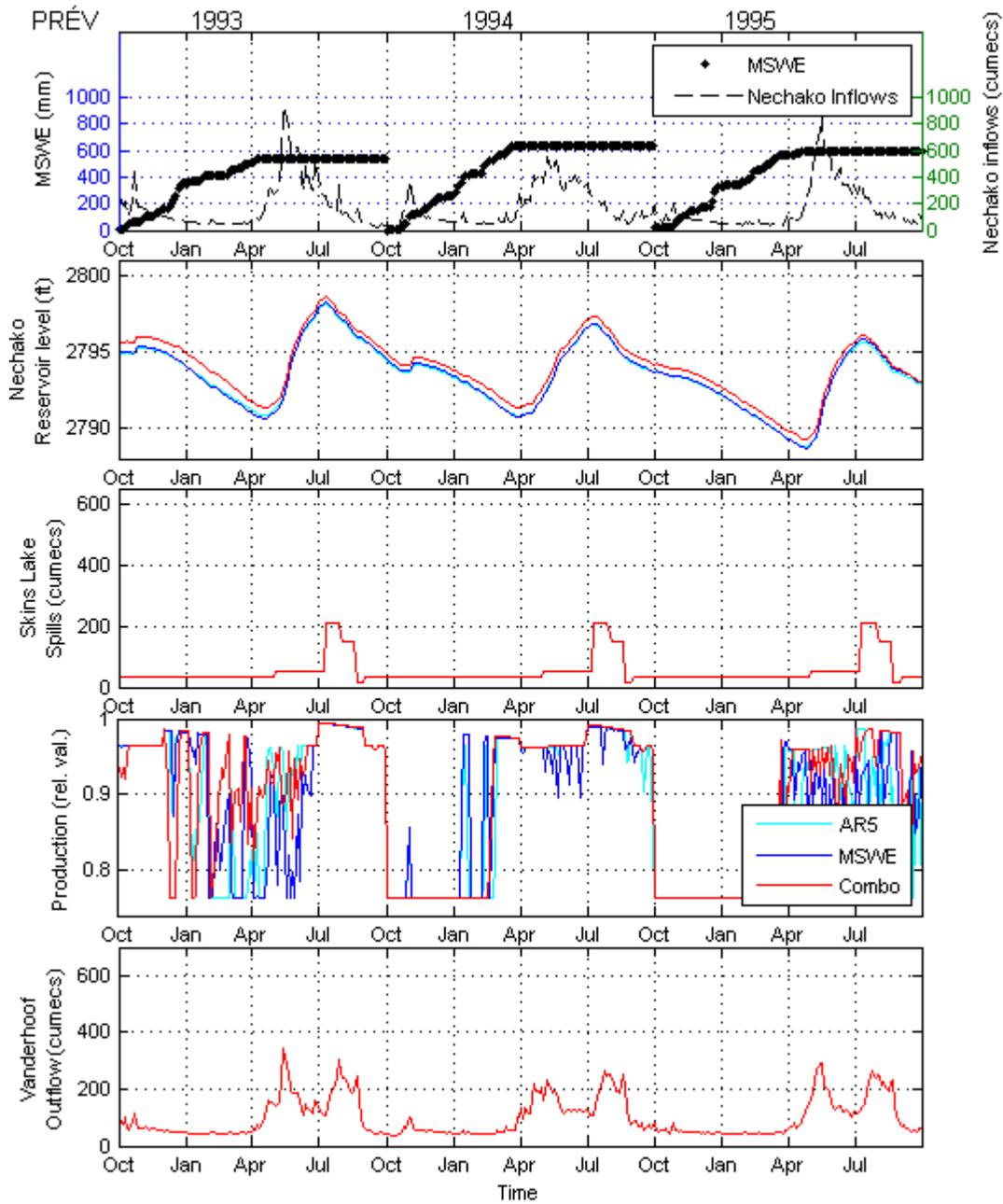


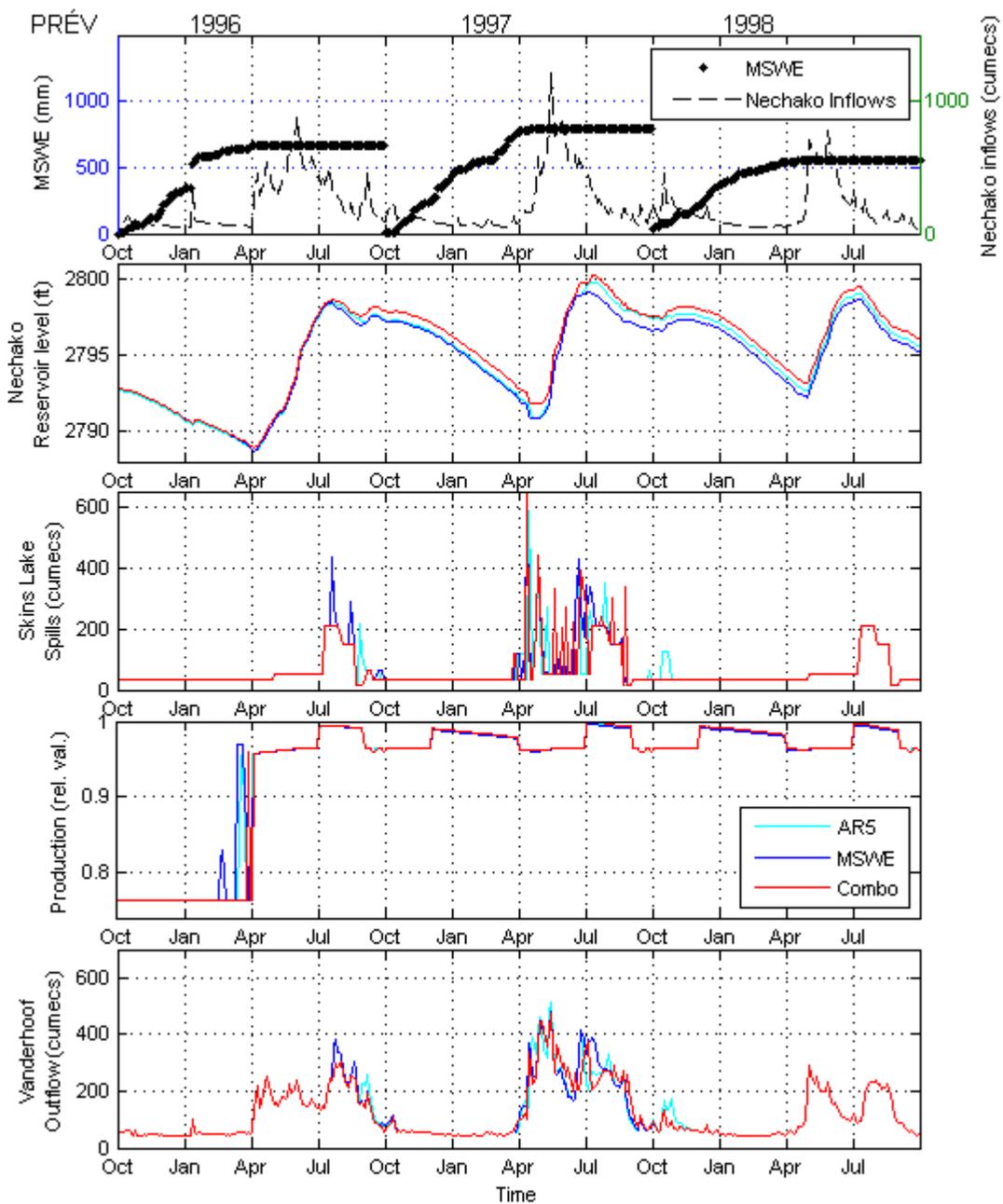


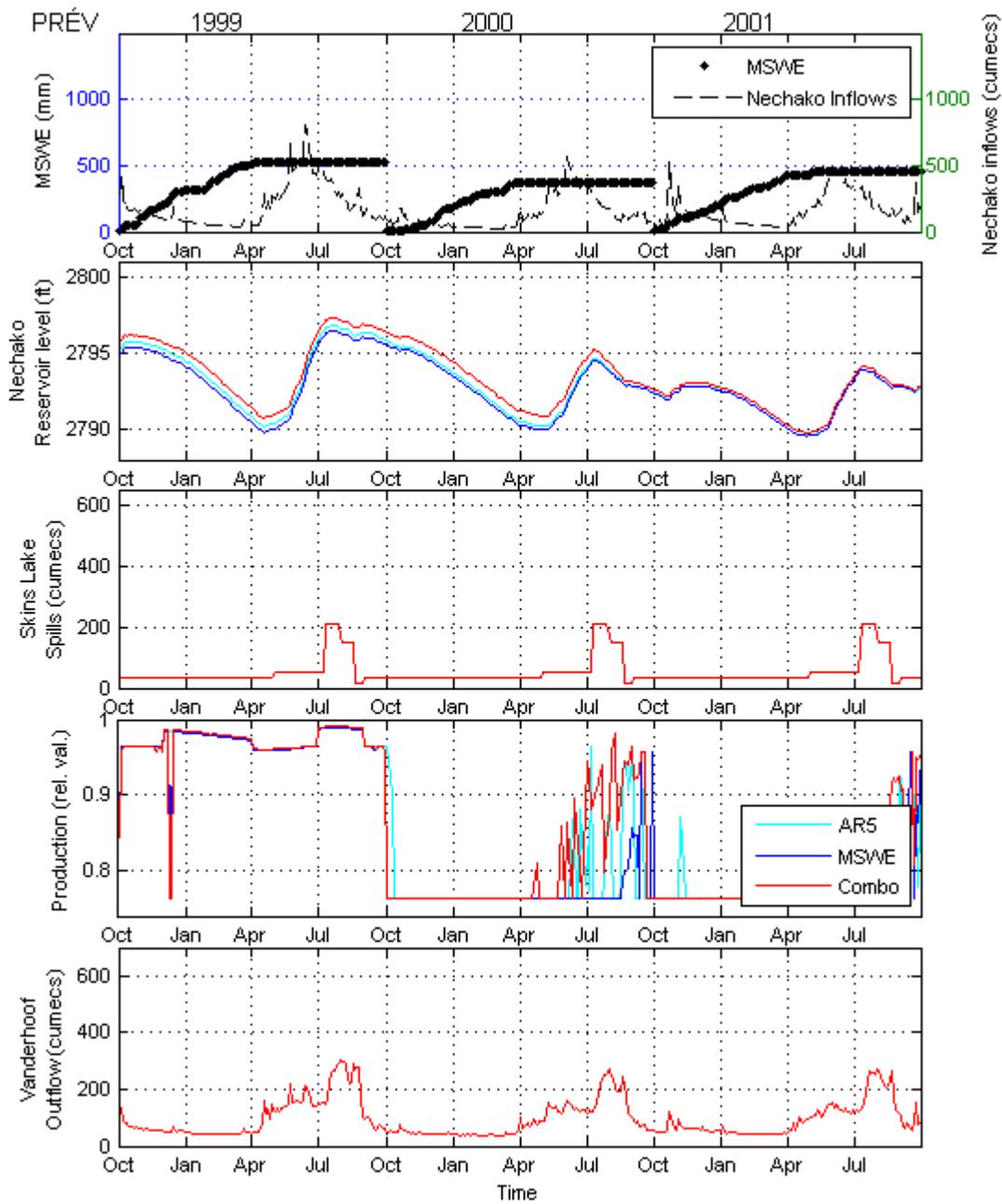


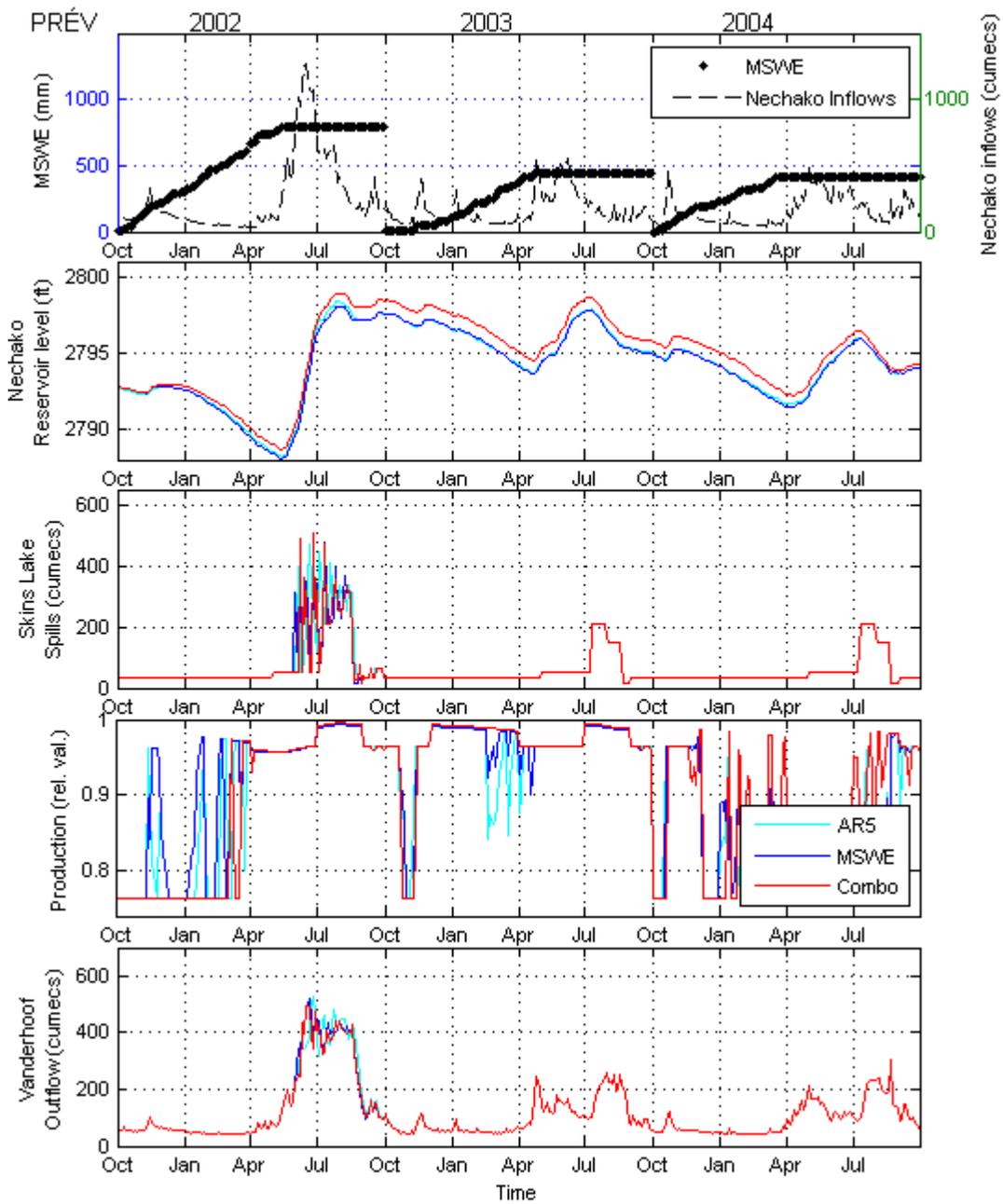


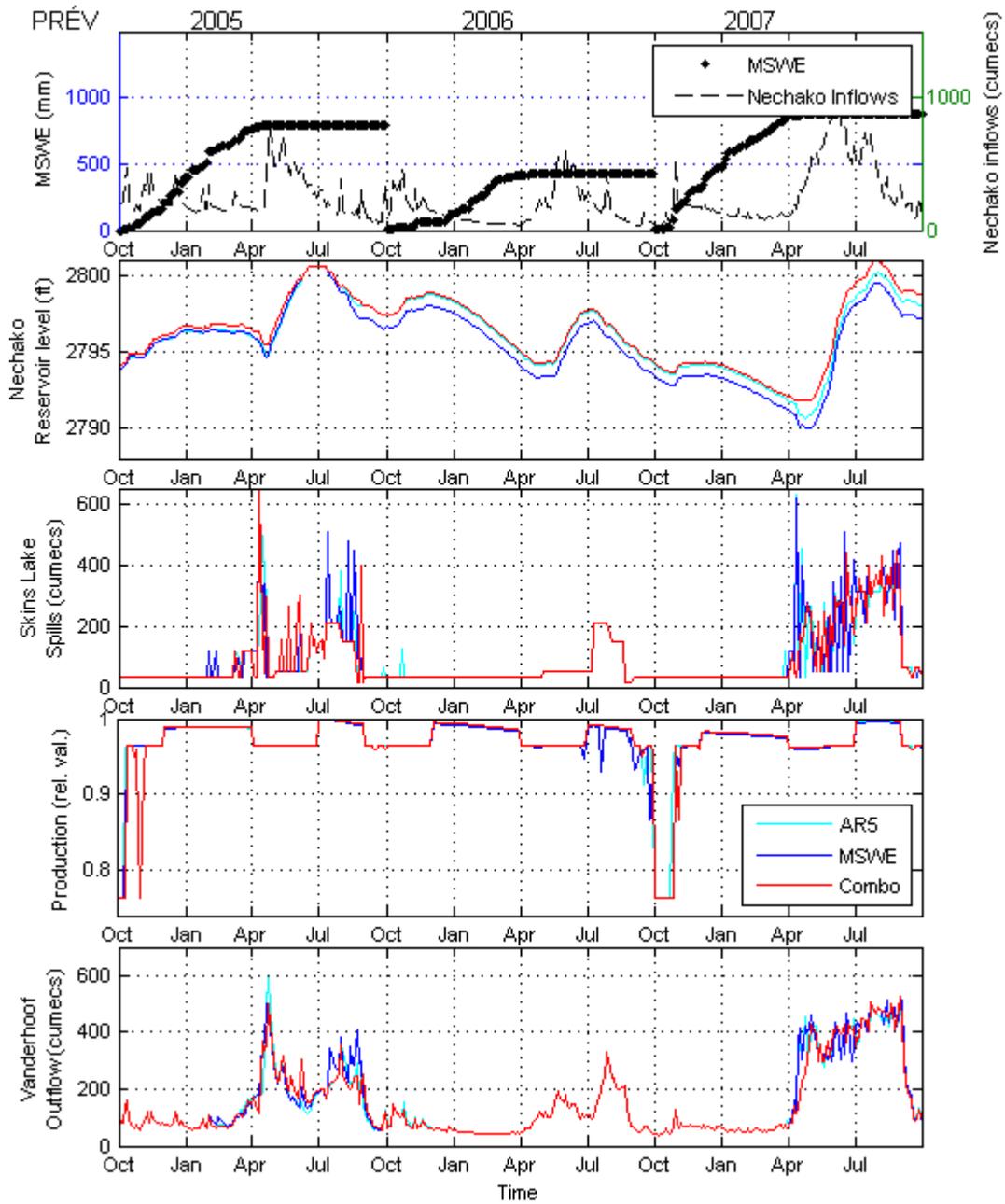


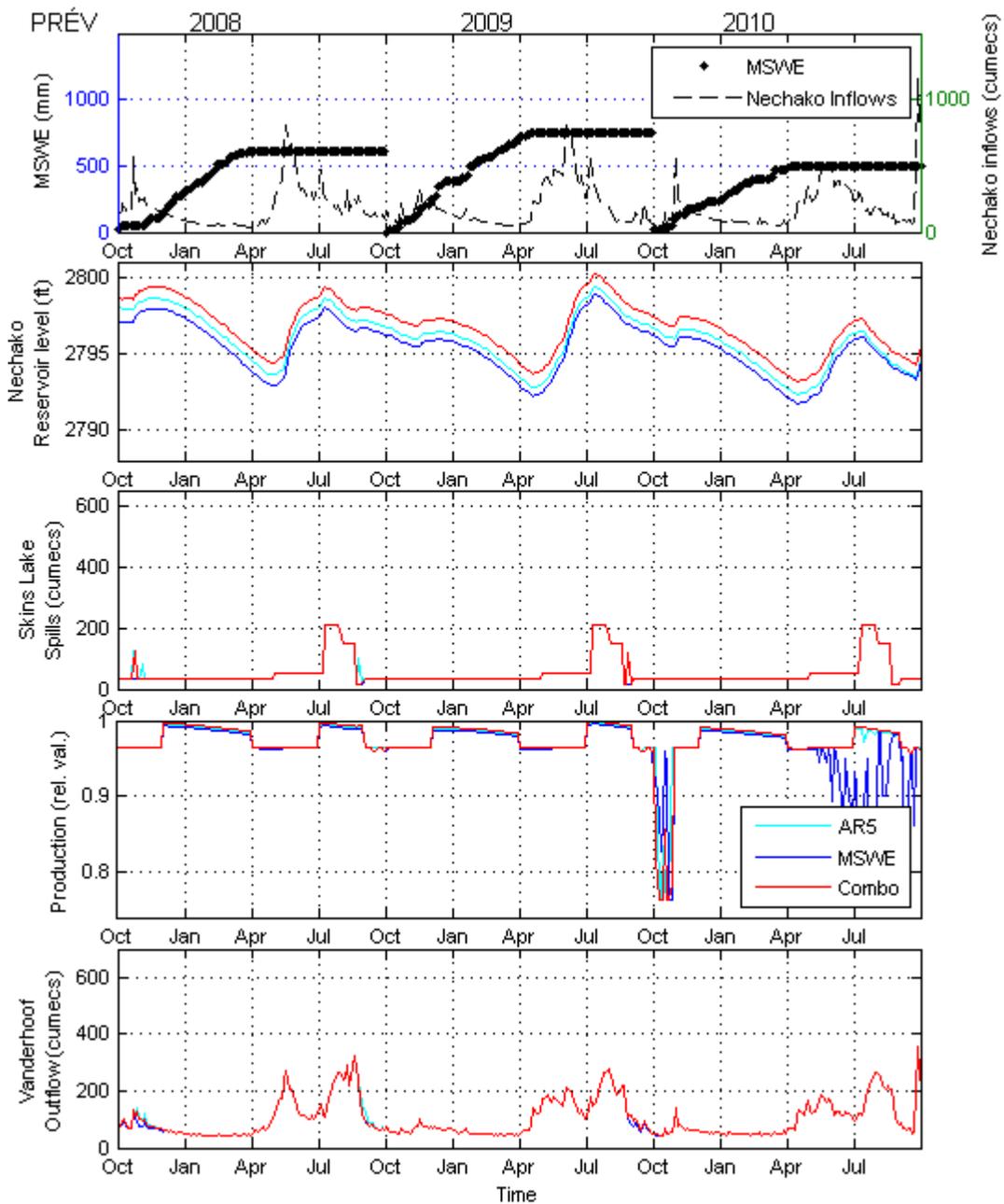


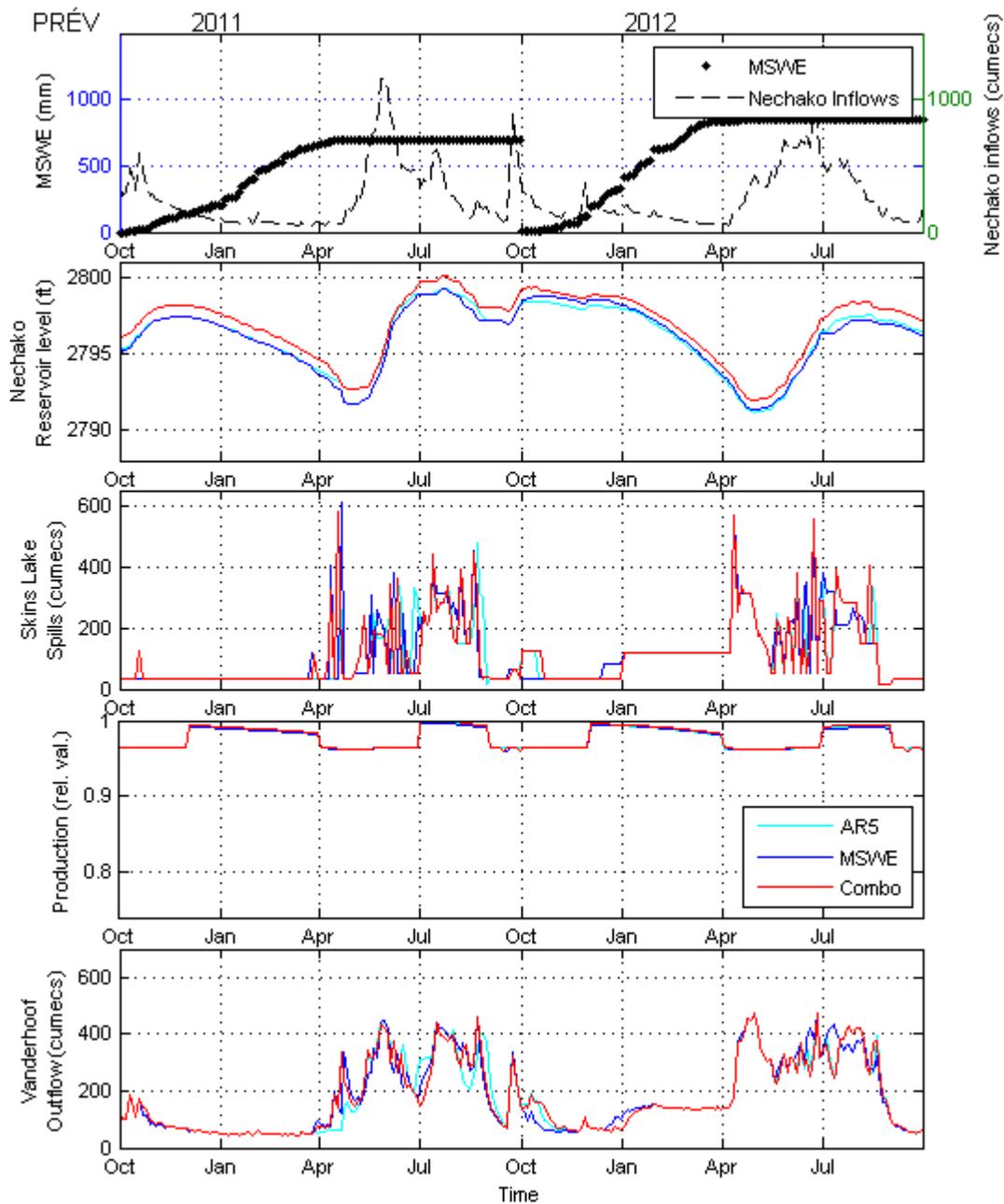












LISTE DES RÉFÉRENCES

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. et Rasmussen, J. (1986a). An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1-2), p. 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. et Rasmussen, J. (1986b). An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1-2), p. 61-77.
- Anvari, S., Mousavi, S.J. et Morid, S. (2014). Sampling/stochastic dynamic programming for optimal operation of multi-purpose reservoirs using artificial neural network-based ensemble streamflow predictions. *Journal of Hydroinformatics*, 16(4), p. 907-921.
- Archibald, T.W., McKinnon, K.I.M. et Thomas, L.C. (1997). An aggregate stochastic dynamic programming model of multireservoir systems. *Water Resources Research*, 33(2), p. 333-340.
- Batista, A., Suzuki, K. et Kadota, A. (2008). Integrating long- and short-term reservoir operation models via stochastic and deterministic optimization: Case study in Japan. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(5), p. 440-448.
- Bergström, S. (1976). *Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments*. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, volume RH07. Norrköping, Sweden, 134 p.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., Schofield, N. et Tagg, A.F. (1984). Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U.K. catchments. *Journal of Hydrology*, 69(1-4), p. 119-143.
- Box, G.E.P. et Jenkins, G.M. (1976). *Time series analysis forecasting and control*. Holden-Day series in time series analysis, édition révisée. Toronto Holden-Day, Toronto, Canada, 755 p.
- Braga, B. et Barbosa, P.S.F. (2001). Multiobjective real-time reservoir operation with a network flow algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(4), p. 837-852.
- Castelletti, A., De Rigo, D., Tepsich, L., Soncini-Sessa, R. et Weber, E. (2008a). On-line design of water reservoir policies based on inflow prediction, *Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control*, IFAC Proceedings volumes, IFAC-PapersOnline, Seoul, Korea, p. 4540-14545.

- Castelletti, A., Pianosi, F. et Soncini-Sessa, R. (2008b). Water reservoir control under economic, social and environmental constraints. *Automatica*, 44(6), p. 1595-1607.
- Charbonneau, R., Fortin, J.P. et Morin, G. (1977). The cequeau model: Description and examples of its use in problems related to water resource management / le modèle cequeau: Description et exemples d'utilisation dans le cadre de problèmes reliés à l'aménagement. *Hydrological Sciences Bulletin*, 22(1), p. 193-202.
- Côté, P., Haguma, D., Leconte, R. et Krau, S. (2011). Stochastic optimisation of Hydro-Quebec hydropower installations: A statistical comparison between SDP and SSDP methods. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(12), p. 1427-1434.
- Côté, P. et Leconte, R. (2016). Comparison of stochastic optimization algorithms for hydropower reservoir operation with ensemble streamflow prediction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(2), p. 04015046
- Couillard, D. et Cluis, D.A. (1980). Generation of polluting loads within river basins. *Water Research*, 14(11), p. 1621-1630.
- Davidson, C., Pereira-Cardenal, S.J., Liu, S., Mo, X., Rosbjerg, D. et Bauer-Gottwein, P. (2015). Using stochastic dynamic programming to support water resources management in the ziya river basin, China. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(7), p. 04014086
- Desreumaux, Q., Leconte, R. et Côté, P. (2014). Role of hydrologic information in stochastic dynamic programming: a case study of the Kemano hydropower system in British Columbia. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(9), p. 839-844.
- Etkin, D., Kirshen, P., Watkins, D., Roncoli, C., Sanon, M., Some, L., Dembele, Y., Sanfo, J., Zoungrana, J. et Hoogenboom, G. (2015). Stochastic programming for improved multiuse reservoir operation in Burkina Faso, West Africa. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(3), p. 04014056
- Eum, H.I. et Kim, Y.O. (2010). The value of updating ensemble streamflow prediction in reservoir operations. *Hydrological Processes*, 24(20), p. 2888-2899.
- Faber, B.A. et Stedinger, J.R. (2001). Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts. *Journal of Hydrology*, 249(1-4), p. 113-133.
- Fortin, V., Favre, A.C. et Saïd, M. (2006). Probabilistic forecasting from ensemble prediction systems: Improving upon the best-member method by using a different weight and dressing kernel for each member. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(617), p. 1349-1369.

-
- Galelli, S., Goedbloed, A., Schwanenberg, D. et van Overloop, P.J. (2014). Optimal real-time operation of multipurpose urban reservoirs: Case study in Singapore. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(4), p. 511-523.
- Goedbloed, A., Galelli, S. et Schwanenberg, D. (2011). *Assessing the effectiveness of a real-time control method for Marina Reservoir management. Conference Paper. MODSIM 2011 - 19th International Congress on Modelling and Simulation - Sustaining Our Future: Understanding and Living with Uncertainty*, p. 4036-4042
- Gurtz, J., Baltensweiler, A. et Lang, H. (1999). Spatially distributed hydrotope-based modelling of evapotranspiration and runoff in mountainous basins. *Hydrological Processes*, 13(17), p. 2751-2768.
- Hendrickx, F. et Sauquet, E. (2013). Impact of warming climate on water management for the Ariège River basin (France). *Hydrological Sciences Journal*, 58(5), p. 976-993.
- Hingray, B.P., Cécile. et Musy, A. (2009). *Hydrologie 2. Une science pour l'ingénieur*. . (Vol. 54). Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 601 p.
- Kim, Y.O., Eum, H.I., Lee, E.G. et Ko, I.H. (2007). Optimizing operational policies of a Korean multireservoir system using sampling stochastic dynamic programming with ensemble streamflow prediction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(1), p. 4-14.
- Labadie, J.W. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), p. 93-111.
- Loucks, D.P., Van Beek, E., Stedinger, J.R., Dijkman, J.P.M. et Villars, M.T. (2005). *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*. Unesco, Paris, France, 680 p.
- Martinez, L. et Soares, S. (2002). Comparison between closed-loop and partial open-loop feedback control policies in long term hydrothermal scheduling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(2), p. 330-336.
- Morin, G., Paquet, P. et INRS-ETE. (2007). *Modèle hydrologique CEQUEAU*. Québec : Université du Québec, INRS-Eau, Terre et Environnement, 449 p.
- Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), p. 275-289.
- Pianosi, F. et Ravazzani, G. (2010). Assessing rainfall-runoff models for the management of Lake Verbano. *Hydrological Processes*, 24(22), p. 3195-3205.
- Pianosi, F. et Soncini-Sessa, R. (2009). Real-time management of a multipurpose water reservoir with a heteroscedastic inflow model. *Water Resources Research*, 45(10), W10430, p. 1-12

- Raso, L., Schwanenberg, D., van de Giesen, N.C. et van Overloop, P.J. (2014). Short-term optimal operation of water systems using ensemble forecasts. *Advances in Water Resources*, 71, p. 200-208.
- Saad, M., Bigras, P., Turgeon, A. et Duquette, R. (1996). Fuzzy learning decomposition for the scheduling of hydroelectric power systems. *Water Resources Research*, 32(1), p. 179-186.
- Seiller, G., Anctil, F. et Perrin, C. (2012). Multimodel evaluation of twenty lumped hydrological models under contrasted climate conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4), p. 1171-1189.
- Singh, V.P. et Frevert, D.K. (2002). *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. États-Unis d'Amérique : Water Resources Publication, 891 p.
- Srinivasa Prasad, A., Umamahesh, N.V. et Viswanath, G.K. (2013). Short-term real-time reservoir operation for irrigation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(2), p. 149-158.
- St-Hilaire, A., Morin, G., El-Jabi, N. et Caissie, D. (2000). Water temperature modelling in a small forested stream: Implication of forest canopy and soil temperature. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(6), p. 1095-1108.
- Thornthwaite, C.W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), p. 55-94.
- Turgeon, A. (2005). Daily operation of reservoir subject to yearly probabilistic constraints. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(5), p. 342-350.
- Turgeon, A. (2007). Stochastic optimization of multireservoir operation: The optimal reservoir trajectory approach. *Water Resources Research*, 43(5), W05420, p. 1-10
- USACE. (1956). *Snow hydrology; summary report of the snow investigations*. Portland, Or. : North Pacific Division, Corps of Engineers, U.S. Army. Portland, Or., États-Unis, 437 p.
- Zambelli, M. S., Lopes, M. S. et Soares, S. (2012). Long-term hydropower scheduling using model predictive control approach with hybrid monthly-annual inflow forecasting. *Proceedings of the 2012 6th IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition*, Montevideo, Uruguay, p. 1-5
- Zhao, T., Cai, X. et Yang, D. (2011). Effect of streamflow forecast uncertainty on real-time reservoir operation. *Advances in Water Resources*, 34(4), p. 495-504.
- Zhao, T., Yang, D., Cai, X., Zhao, J. et Wang, H. (2012). Identifying effective forecast horizon for real-time reservoir operation under a limited inflow forecast. *Water Resources Research*, 48(1), W01540, p. 1-15