

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS.....	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	vii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 MISE EN CONTEXTE DE LA PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE ..	4
1.1 PRÉSENTATION DU MILIEU DE PRATIQUE.....	4
1.2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	6
1.3 DOMAINE D'ÉTUDE.....	10
1.4 DONNÉES UTILISÉES.....	11
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE ET REVUE DE LITTÉRATURE	14
2.1 DESCRIPTION DES MODÈLES HYDROLOGIQUES.....	14
2.2 DESCRIPTION DE LA MÉTHODE D'OPTIMISATION	24
2.3 INCERTITUDE LIÉE À LA PARAMÉTRISATION DES MODÈLES.....	25
2.4 SEGMENTATION DES BASSINS VERSANTS	29
2.5 CORRECTION DES APPORTS NON-CONTRÔLÉS	36
CHAPITRE 3 MODÉLISATION HYDROLOGIQUE AVEC HSAMI ET CORRECTION DES DÉBITS HIVERNAUX	37
3.1 CARACTÉRISATION DE L'INCERTITUDE DES PARAMÈTRES	37
3.1.1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	37
3.1.2 ANALYSE DES RÉSULTATS	38
3.2 CORRECTION DES DÉBITS HIVERNAUX	39
3.2.1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	39
3.2.2 ANALYSE DES RÉSULTATS	40
CHAPITRE 4 CALIBRATION DU MODÈLE CEQUEAU SUR LES SOUS-BASSINS	45
4.1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	45
4.2 ANALYSE DES RÉSULTATS	50
CHAPITRE 5 CORRECTION DES APPORTS NON-CONTRÔLÉS (ANC).....	52
5.1 VALIDATION DU DÉBIT À BONNARD	52
5.1.1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	52
5.1.2 ANALYSE DES RÉSULTATS	59
5.2 FONCTION DE TRANSFERT DE DÉBIT ENTRE LAC MANOUANE ET PASSES- DANGEREUSES	64
5.2.1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	64
5.2.2 ANALYSE DES RÉSULTATS	66
CONCLUSION.....	68
BIBLIOGRAPHIE.....	72

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : DONNEES METEOROLOGIQUES MENSUELLES ET ANNUELLES MOYENNES (HISTORIQUE 1995-2012)	12
TABLEAU 2 : PARAMETRES DU MODELE HSAMI.....	19
TABLEAU 3 : PARAMETRES ET CONSTANTES INTERVENANT DANS LE MODELE CEQUEAU	23
TABLEAU 4 : BASSINS VERSANTS UTILISES POUR VALIDER LA METHODOLOGIE DE CORRECTION DES DEBITS SOUS GLACE.....	29
TABLEAU 5 : RESULTATS DE LA CORRECTION DES DEBITS SOUS GLACE.....	40
TABLEAU 6 : TABLEAU COMPARATIF DE LA PERFORMANCE DES TROIS CALIBRATIONS SELON LE(S) DEBIT(S) OPTIMISE(S)	48
TABLEAU 7 : VALEURS DES PARAMETRES OPTIMISES POUR LES TROIS METHODES DE CALIBRATION	49
TABLEAU 8 : PERFORMANCE DES DIFFERENTES REGRESSIONS ANALYSEES POUR CORRIGER LE DEBIT A BONNARD.....	61

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : CARTE DES BASSINS HYDROGRAPHIQUES DU RESEAU HYDROELECTRIQUE DE RTA	5
FIGURE 2 : SCHEMATISATION DU CALCUL DES ANC PAR BILAN HYDRIQUE	8
FIGURE 3 : POURCENTAGE DES APPORTS NON CONTROLES AMONTS A PASSES- DANGEREUSES PAR RAPPORT AU DEBIT EVACUE A BONNARD (MOYENNE 1995 A 2012).....	10
FIGURE 4 : CARTE DES BASSINS VERSANTS À L'ÉTUDE	11
FIGURE 5 : DEBITS MAXIMUMS, MINIMUMS ET MOYENS DE L'HISTORIQUE 1995-2012	13
FIGURE 6 : SCHEMA DU MODELE CONCEPTUEL HSAMI.....	18
FIGURE 7 : SCHEMA DE PRODUCTION DU MODELE CEQUEAU	22
FIGURE 8 : REPRESENTATION DES BASSINS VERSANTS AMONT DANS CEQUEAU.....	35
FIGURE 9 : VARIABILITE DES PARAMETRES DU MODELE HSAMI POUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE PERIBONKA.....	38
FIGURE 10 : COMPARAISON DES METHODES DE CORRECTION DES DEBITS HIVERNAUX: BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE PERIBONKA A) POUR LA PERIODE 1994-1999 B) POUR L'HIVER 1998-1999	43
FIGURE 11 : COMPARAISON DES METHODES DE CORRECTION DES DEBITS HIVERNAUX : BASSIN DE LA RIVIERE ASHUAPMUSHUAN AMONT A) POUR LA PERIODE 2002-2006 B) POUR L'HIVER 2004-2005	44
FIGURE 12 : DEBITS OBSERVES ET SIMULES POUR LES DIFFERENTES CALIBRATIONS DU SOUS-BASSIN AMONT MONTAGNES BLANCHES	46
FIGURE 13 : DEBITS OBSERVES ET SIMULES POUR LES DIFFERENTES CALIBRATIONS DU SOUS-BASSIN AVAL (EXUTOIRE) LAC MANOUANE	46
FIGURE 14 : DEBITS OBSERVES ET SIMULES POUR LES DIFFERENTES CALIBRATIONS DU SOUS-BASSIN AMONT PERIBONKA	47
FIGURE 15 : DEBITS OBSERVES ET SIMULES POUR LES DIFFERENTES CALIBRATIONS DU SOUS-BASSIN AVAL (EXUTOIRE) PASSES-DANGEREUSES.....	47
FIGURE 16 : COMPARAISON DES ANC DE LAC MANOUANE ET PASSES-DANGEREUSES PAR RAPPORT AU DEBIT A BONNARD	53
FIGURE 17 : COMPARAISON DES ANC HISTORIQUES ET SIMULES (CEQUEAU) POUR LAC MANOUANE PAR RAPPORT AU DEBIT A BONNARD	54
FIGURE 18 : EXEMPLE SCHEMATISE DES COURBES D'EVACUATION DU DEVERSOIR	55
FIGURE 19 : COMPARAISON DU DEBIT A BONNARD DES DONNEES D'OPERATION ET CALCULE PAR MODELISATION	57
FIGURE 20 : COMPARAISON DES ANC A PASSES-DANGEREUSES HISTORIQUES ET RECALCULES AVEC LE DEBIT A BONNARD CALCULE PAR MODELISATION	58

FIGURE 21 : POURCENTAGE DES APPORTS NON CONTROLES AMONTS A PASSES-DANGEREUSES (DONNEES D'OPERATION ET RECALCULEES) PAR RAPPORT AU DEBIT EVACUE A BONNARD (MOYENNE DE 1995 A 2012).....	59
FIGURE 22 : DEBITS CALCULES PAR MODELISATION EN FONCTION DES DEBITS DES DONNEES D'OPERATION.....	61
FIGURE 23 : COMPARAISON DU DEBIT A BONNARD CALCULE PAR MODELISATION, CORRIGE PAR REGRESSION LINEAIRE ET PROVENANT DES DONNEES D'OPERATION	63
FIGURE 24 : COMPARAISON DES APPORTS A PASSES-DANGEREUSES SELON LA METHODE UTILISEE POUR LE TRANSFERT DE DEBIT ENTRE LAC MANOUANE ET PASSES-DANGEREUSES AVEC LE DEBIT A BONNARD CALCULE PAR MODELISATION	65
FIGURE 25 : COMPARAISON DES APPORTS A PASSES-DANGEREUSES SELON LA METHODE UTILISEE POUR LE TRANSFERT DE DEBIT ENTRE LAC MANOUANE ET PASSES-DANGEREUSES AVEC LE DEBIT A BONNARD ESTIME PAR REGRESSION LINEAIRE.....	66

INTRODUCTION

La modélisation hydrologique est très répandue et il s'agit là d'un outil primordial pour la gestion optimale des ressources en eau, notamment pour les producteurs d'hydroélectricité. Il existe une grande variété de modèles hydrologiques utilisés tant en recherche que sur le plan opérationnel. Au fil des années, ces modèles ont subi des améliorations constantes et se sont sans cesse raffinés. Cependant, de nombreuses sources d'incertitudes persistent quant à la simulation et à la prévision des débits. De ce fait, de nombreuses recherches sont menées afin de réduire l'incertitude dans la modélisation hydrologique, que ce soit au niveau de l'incertitude sur le modèle, sur l'optimisation des paramètres ou sur les données météorologiques.

Le projet de recherche dont il est question ici vise à réduire l'incertitude sur la prévision des apports pour deux bassins versants situés au nord du lac Saint-Jean, soient Lac Manouane et Passes-Dangereuses, et dont les réservoirs servent à la production hydroélectrique de la compagnie Rio Tinto Alcan. Il faut savoir que ces bassins versants sont voisins et que le canal Bonnard permet de transférer du débit du lac Manouane vers le réservoir Passes-Dangereuses par l'ouverture des vannes du déversoir contrôlant l'entrée du canal. Or, les apports calculés pour ces bassins versants semblent erronés, et ce de façon significativement plus importante lorsque du débit circule dans le canal Bonnard.

Les aspects qui sont étudiés dans ce projet sont l'incertitude attribuable à la paramétrisation du modèle hydrologique de même que l'incertitude attribuable à la méthode de calcul des apports non-contrôlés, qui est un bilan hydrique. Pour ce faire, on s'intéresse à l'incertitude de la méthode d'optimisation, qui est Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES), ainsi qu'à la correction des débits sous glace. On vise également à déterminer s'il est préférable de modéliser le bassin versant de manière globale, c'est-à-dire en optimisant seulement le débit à l'exutoire, ou en le séparant en deux sous-bassins, c'est-à-dire en calibrant le modèle avec le débit du sous-bassin amont et du sous-bassin aval. Les études réalisées dans ce domaine démontrent des résultats mitigés et les conclusions varient généralement d'un bassin versant à l'autre. De plus, dans ce projet, on étudie la façon dont les apports non-contrôlés sont calculés. Puisque ce calcul tient compte d'un transfert de débit entre les deux bassins versants à l'étude, les courbes d'évacuation du déversoir Bonnard (débit en fonction du niveau du lac et de la hauteur d'ouverture des vannes) de même que la fonction de transfert de débit, qui est présentement à délai fixe de deux jours, sont revues en utilisant la modélisation hydrologique.

Dans le présent mémoire, la problématique de recherche est décrite dans le chapitre 1 alors que la méthodologie et la revue de littérature sont décrites dans le chapitre 2. Puis, le chapitre 3 présente les résultats et leur analyse pour le premier volet du projet, soit la modélisation hydrologique avec HSAMI et la correction des débits hivernaux. Le chapitre 4 contient les résultats et leur analyse pour la calibration du modèle CEQUEAU sur les sous-bassins. Enfin, le chapitre 5 présente les résultats et leur analyse pour le dernier volet de

l'étude, soit la correction des apports non-contrôlés, qui contient la validation des courbes d'évacuation de Bonnard et la fonction de transfert de débit entre Lac Manouane et Passes-Dangereuses.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE 1

MISE EN CONTEXTE DE LA PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

1.1 PRÉSENTATION DU MILIEU DE PRATIQUE

Le projet de recherche est réalisé dans le cadre d'une bourse en milieu de pratique, soit la bourse BMP Innovation, dont les partenaires financiers sont le Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT), le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et Rio Tinto Alcan (RTA), division Énergie Électrique. Le projet s'inscrit donc directement dans les intérêts de recherche de cette entreprise. Rio Tinto Alcan est un important producteur d'aluminium dont le siège social est situé à Montréal et qui possède quatre alumineries dans la région du Saguenay-Lac-St-Jean. Énergie Électrique est la division de Rio Tinto Alcan qui est responsable de la production hydroélectrique. La gestion optimale des ressources en eau de leurs bassins hydrographiques est une de leur priorité et constitue un domaine de recherche important pour l'entreprise. Le réseau hydrographique dont ils font la gestion est composé des sous-bassins versants du lac Saint-Jean. La figure 1 en présente la localisation. L'entreprise possède un parc de production de six centrales au Saguenay-Lac-St-Jean et de nombreux barrages et ouvrages de régularisation. RTA possède des ouvrages de régularisation pour gérer l'eau arrivant au lac St-Jean via la rivière Péribonka, mais ne possède aucun contrôle sur les autres affluents. Il y a également des ouvrages de régularisation à l'exutoire du lac

St-Jean. Les trois réservoirs principaux pour la production hydroélectrique sont le lac Manouane, le réservoir Passes-Dangereuses et le lac Saint-Jean. Il est également à noter qu'il y a des installations (canal Bonnard) permettant de transférer de l'eau du lac Manouane vers la rivière Péribonka, et donc vers le réservoir Passes-Dangereuses. Ce projet de recherche porte sur les apports aux bassins amonts, soient Lac Manouane et Passes-Dangereuses (voir figure 1).

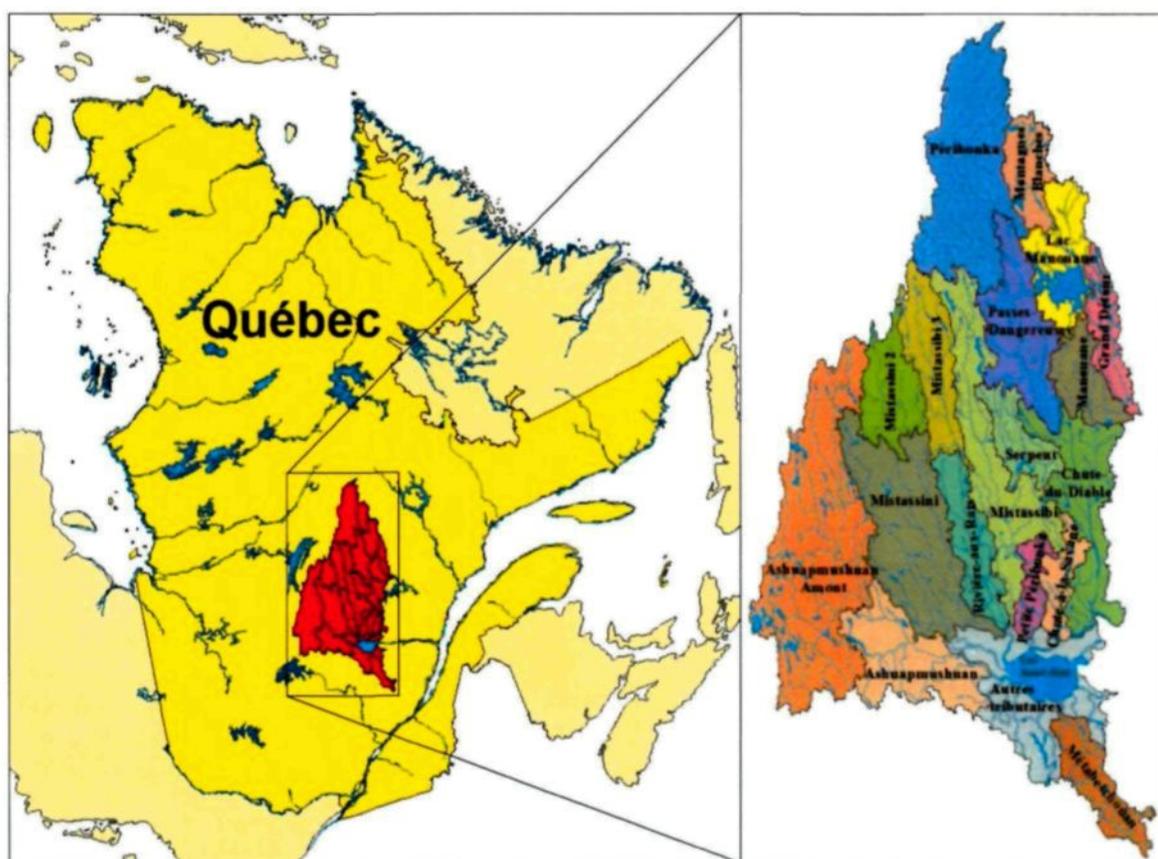


Figure 1 : Carte des bassins hydrographiques du réseau hydroélectrique de RTA

1.2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

La prévision des volumes d'eau entrant aux réservoirs est essentielle à la gestion optimale de la production hydroélectrique, mais comporte d'importantes incertitudes qui proviennent des prévisions et des observations météorologiques, des observations hydrologiques (niveaux et débits) et du modèle hydrologique. Le projet de recherche présenté dans ce mémoire vise à caractériser puis diminuer la portion réductible de l'incertitude en prévision hydrologique, à travers une étude de cas pour la partie amont du bassin hydrographique du lac St-Jean composée des bassins Lac Manouane (LM) et Passes-Dangereuses (PD).

Plus spécifiquement, l'objectif principal du projet est de réduire l'incertitude prévisionnelle des apports d'eau aux réservoirs amont. Parmi les sources d'incertitude dites réductibles, ce projet porte sur l'incertitude attribuable à la modélisation hydrologique via les modèles CEQUEAU (Morin et Paquet, 2007) et HSAMI (Bisson et Roberge, 1983 ; Fortin, 2000). De plus, il porte sur l'incertitude liée au calcul des apports non-contrôlés utilisés pour la paramétrisation du modèle hydrologique. Le projet de recherche comporte ainsi deux volets.

Le premier volet concerne la paramétrisation des modèles hydrologiques pour diminuer l'incertitude, entre autres celle attribuable à la correction des débits sous glace. Également, une analyse sur la calibration de CEQUEAU par sous-bassin est effectuée afin de quantifier l'incertitude attribuable à la segmentation des bassins versants. Le premier

sous-objectif consiste donc à quantifier l'incertitude attribuable à la paramétrisation des modèles hydrologiques utilisés par RTA, soient HSAMI et CEQUEAU, puis à réduire cette incertitude au minimum en adoptant le meilleur jeu de paramètres possible d'après un processus de sélection multicritère.

Le deuxième volet du projet concerne les apports aux réservoirs. Les apports non-contrôlés (ANC) pour les bassins versants de RTA ne sont pas directement mesurés, ils sont plutôt calculés par bilan hydrique. Le schéma de la figure 2 illustre la façon dont sont calculés les ANC. Les ANC sont les apports (débits) naturels arrivant aux réservoirs, c'est-à-dire sans contrôle par évacuateur ou autre intervention de gestion. Le déversoir de Bonnard permet de transférer de l'eau du lac Manouane vers le réservoir Passes-Dangereuses. Présentement, un délai de deux jours est considéré pour le temps de parcours entre le lac Manouane et le réservoir Passes-Dangereuses lorsque le transfert est effectué. Les équations 1 et 2 permettent respectivement de déterminer les ANC à Lac Manouane et à Passes-Dangereuses.

$$\mathbf{ANC}_{\mathbf{LM}} = \mathbf{Q}_{\Delta\mathbf{V}(\mathbf{LM})} + \mathbf{Q}_{\mathbf{Bonnard}} \quad \text{Équation 1}$$

Avec :

$\mathbf{ANC}_{\mathbf{LM}}$: Apports non contrôlés au lac Manouane [m^3/s]

$\mathbf{Q}_{\Delta\mathbf{V}(\mathbf{LM})}$: Débit associé à l'emmagasinement au lac Manouane [m^3/s]

$\mathbf{Q}_{\mathbf{Bonnard}}$: Débit évacué à Bonnard [m^3/s]

$$ANC_{PD} = Q_{\Delta V(PD)} - Q_{Bonnard-2jours} + Q_{turbiné} + Q_{déversé} \quad \text{Équation 2}$$

Avec :

ANC_{PD} : Apports non contrôlés à Passes-Dangereuses [m^3/s]

$Q_{\Delta V(PD)}$: Débit associé à l'emmagasinement au réservoir Passes-Dangereuses [m^3/s]

$Q_{Bonnard-2jours}$: Débit évacué à Bonnard 2 jours plus tôt [m^3/s]

$Q_{turbiné}$: Débit turbiné à la centrale Chute-des-Passes [m^3/s]

$Q_{déversé}$: Débit déversé au réservoir Passes-Dangereuses [m^3/s]

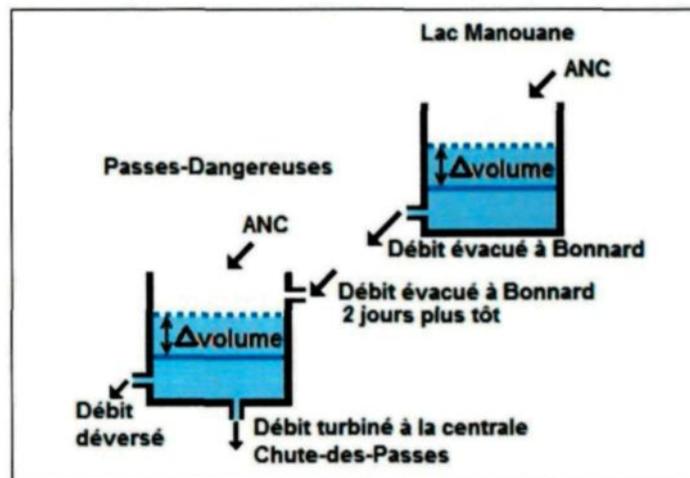


Figure 2 : Schématisation du calcul des ANC par bilan hydrique

L'incertitude sur les apports aux réservoirs provient donc en partie de la modélisation de la courbe de production de la centrale Passes-Dangereuses, en partie des courbes d'évacuation du lac Manouane (canal Bonnard) et en partie de la modélisation de l'écoulement entre les bassins Lac Manouane et Passes-Dangereuses. La courbe de production de la centrale Passes-Dangereuses est revue par RTA. Quant à la modélisation de l'écoulement entre ces bassins, le modèle actuel suppose un écoulement à délai fixe. En

réalité, le délai d'écoulement varie probablement dans le temps. Cette modélisation de l'écoulement du débit entre le déversoir Bonnard et le réservoir Passes-Dangereuses semble erronée. En effet, un graphique du pourcentage des apports non-contrôlés (ANC) montre une discordance lorsque le déversoir de Bonnard est ouvert (voir la figure 3). Ce graphique présente le pourcentage des apports non-contrôlés amonts à Passes-Dangereuses, dont le calcul est :

$$\% \text{ ANC PD} = \frac{\text{ANC}_{\text{PD}}}{\text{ANC}_{\text{total}}} \cdot 100 = \frac{\text{ANC}_{\text{PD}}}{\text{ANC}_{\text{PD}} + \text{ANC}_{\text{LM}}} \cdot 100 \quad \text{Équation 3}$$

On s'attend à obtenir un pourcentage toujours relativement constant puisque le pourcentage des ANC est relatif à la superficie des bassins versants. Or, on observe que lorsque le déversoir Bonnard est ouvert, les ANC à Passes-Dangereuses chutent, ce qui laisse croire que la méthode de calcul des ANC à Passes-Dangereuses, qui inclut le débit provenant de Bonnard, semble erronée.

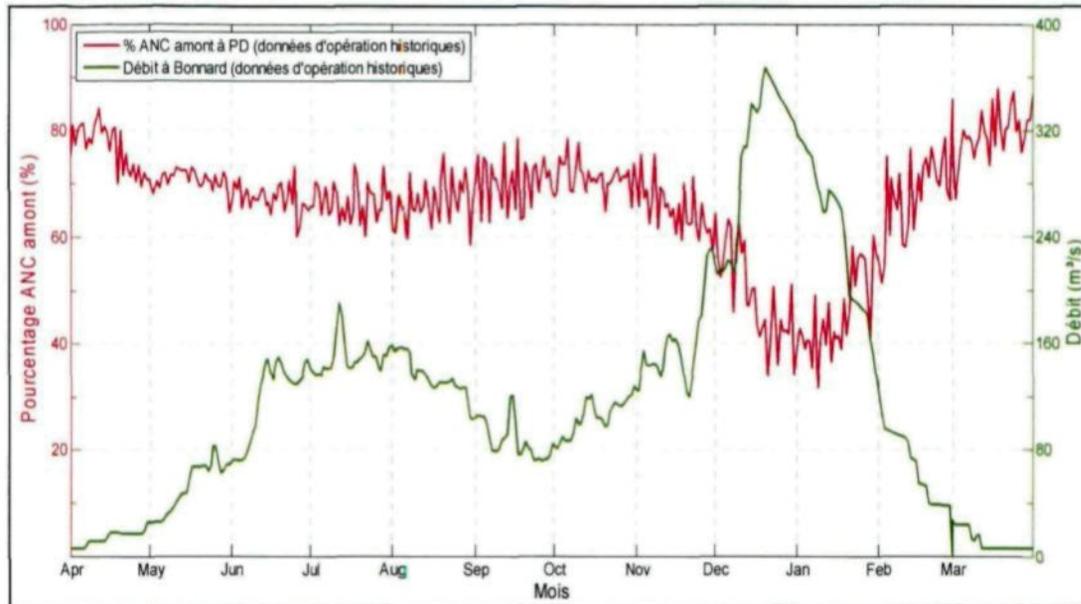


Figure 3 : Pourcentage des apports non contrôlés amonts à Passes-Dangereuses par rapport au débit évacué à Bonnard (moyenne 1995 à 2012)

Le deuxième sous-objectif du projet de recherche consiste donc à revoir la modélisation de l'écoulement entre lac Manouane et Passes-Dangereuses, notamment par la façon de modéliser les intrants dans le modèle hydrologique CEQUEAU, et de revoir les courbes d'évacuation du lac Manouane afin de diminuer l'incertitude sur la prévision des apports.

1.3 DOMAINE D'ÉTUDE

Le domaine d'étude est constitué des bassins amonts de RTA, soient les bassins versants Lac Manouane et Passes-Dangereuses, qui comportent respectivement les sous-bassins Montagnes Blanches et Péribonka, tel qu'illustré sur la figure 4. Il s'agit de bassins versants majoritairement forestiers et non urbanisés.

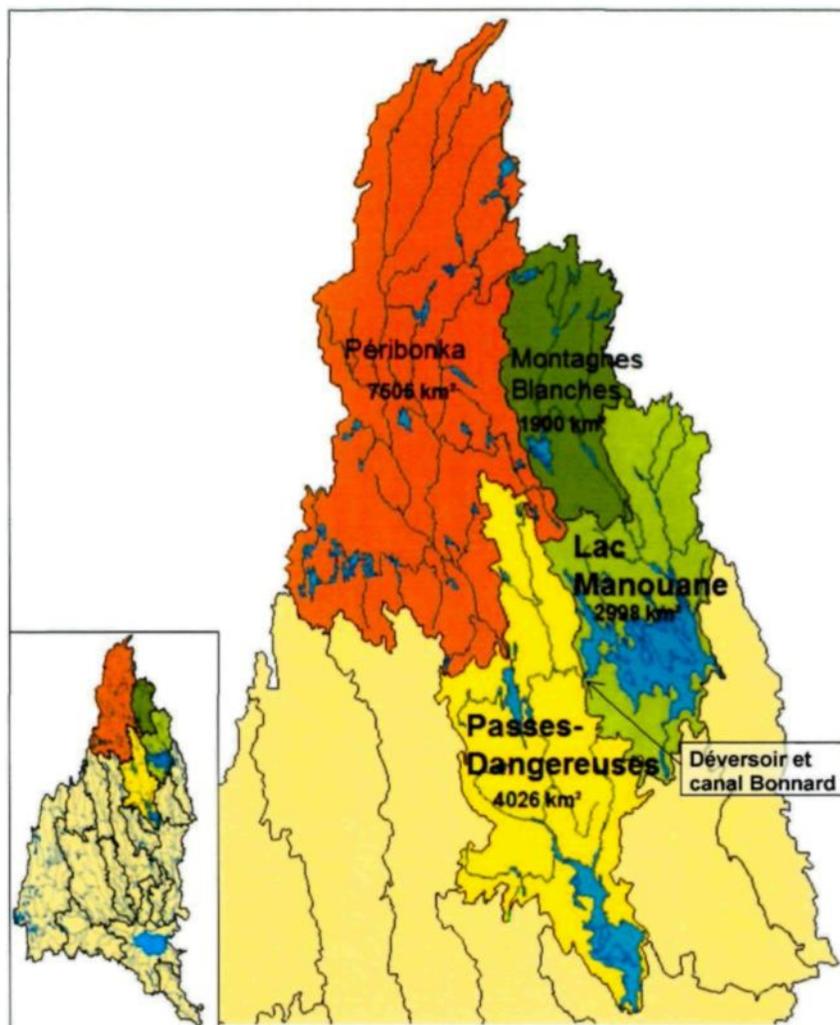


Figure 4 : Carte des bassins versants à l'étude

1.4 DONNÉES UTILISÉES

Les données utilisées dans le cadre de ce projet proviennent principalement de Rio Tinto Alcan. Il s'agit, entre autres, des données météorologiques pour les bassins versants Lac Manouane et Passes-Dangereuses, des débits en rivière, des niveaux des réservoirs, de l'information sur l'ouverture des vannes pour le canal Bonnard et du débit turbiné à la centrale Chute-des-Passes. Pour les données météorologiques, l'interpolation (la moyenne

des stations) est préalablement réalisée afin d'obtenir une moyenne pour chaque bassin versant et également une donnée pour chaque carreau entier dans le modèle CEQUEAU. L'interpolation est réalisée en utilisant la pondération des trois stations les plus proches et une correction est faite pour tenir compte de l'altitude. Le tableau 1 présente les températures maximales et minimales moyennes (mensuelles et annuelles) ainsi que la précipitation totale (mensuelle et annuelle) pour les bassins versants Lac Manouane et Passes-Dangereuses. La précipitation totale est la somme de la pluie et de l'équivalent en eau de la neige. La figure 5 présente les débits moyens, maximums et minimums pour les bassins Lac Manouane et Passes-Dangereuses (apports non-contrôlés) ainsi que pour les sous-bassins Montagnes Blanches et Pérignonka (mesures de débits en rivière).

Tableau 1 : Données météorologiques mensuelles et annuelles moyennes (historique 1995-2012)

	Lac Manouane												
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Température minimale (°C)	-26.7	-25.7	-19.6	-8.8	-0.8	5.7	9.2	8.3	4.2	-1.1	-9.0	-19.9	-6.9
Température maximale (°C)	-14.2	-11.0	-4.2	3.9	11.7	18.5	20.7	19.1	13.9	5.7	-2.0	-9.6	4.5
Précipitation totale (mm)	47.0	40.0	49.0	63.6	73.6	92.9	139.5	121.0	122.3	99.9	96.8	65.1	1010.9
	Passes-Dangereuses												
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Température minimale (°C)	-27.0	-26.1	-19.9	-9.0	-1.1	5.4	8.8	7.9	3.9	-1.4	-9.3	-20.1	-7.2
Température maximale (°C)	-14.1	-10.9	-3.9	4.2	11.9	18.8	20.9	19.2	13.9	5.7	-2.1	-9.6	4.6
Précipitation totale (mm)	48.3	42.7	51.5	65.4	78.1	94.4	142.3	124.7	127.0	105.4	104.0	68.0	1051.9

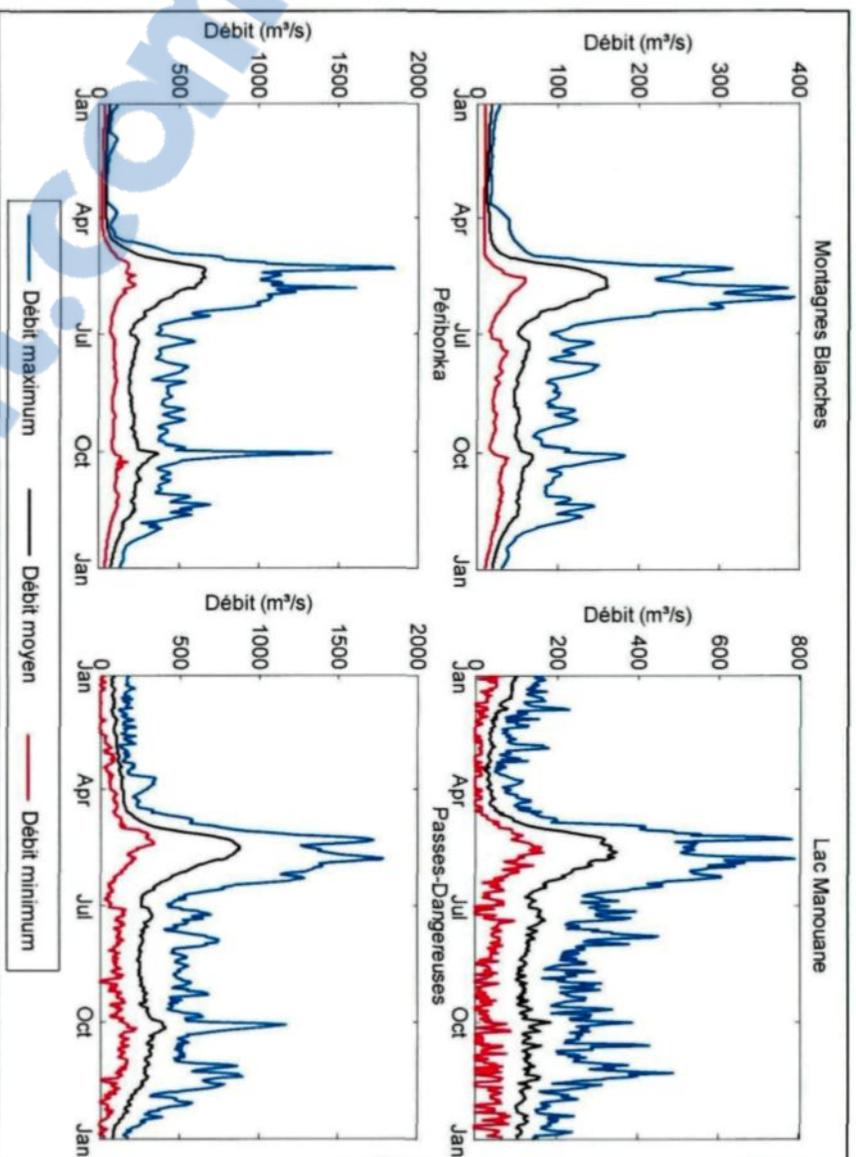


Figure 5 : Débits maximums, minimums et moyens de l'historique 1995-2012

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE ET REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 DESCRIPTION DES MODÈLES HYDROLOGIQUES

La modélisation hydrologique comporte habituellement deux étapes, soient la calibration et la validation. La calibration consiste à utiliser une première série de données météorologiques et de débits afin de déterminer les paramètres du modèle. La détermination de ces paramètres permet de bien représenter les processus hydrologiques pour le bassin versant étudié. Puis, à l'étape de la validation, on utilise les paramètres calibrés pour effectuer une simulation des débits avec une deuxième série de données météorologiques. On peut ainsi comparer les débits simulés avec les débits observés et déterminer la qualité de la modélisation.

Les modèles hydrologiques peuvent être classés en plusieurs catégories. La classification la plus courante consiste à faire la distinction entre global et distribué ainsi que conceptuel et physique. Un modèle est donc soit global ou distribué et soit conceptuel ou physique. Il est également possible de retrouver des hybrides entre les deux catégories, par exemple les modèles semi-distribués. Les modèles globaux prennent en compte la totalité du bassin versant, c'est-à-dire que celui-ci est considéré comme une seule entité. Ainsi, les paramètres et les intrants météorologiques sont les mêmes pour tout le bassin

versant et seule la valeur du débit à l'exutoire est modélisée. Pour les modèles distribués, les paramètres et les données météorologiques peuvent varier sur la superficie du bassin versant, qui est divisé en plus petits éléments (par exemple en carreaux entiers et partiels dans CEQUEAU ou en unités hydrologiques relativement homogènes dans HYDROTEL). De plus, les débits peuvent être modélisés à plus d'un endroit dans le bassin versant. Pour ce qui est des modèles conceptuels, il s'agit de modèles dont les processus hydrologiques sont schématisés par des concepts de réservoirs. Au contraire, dans les modèles physiques, les phénomènes d'échange et de cheminement de l'eau sont modélisés par les équations physiques régissant les processus hydrologiques.

De nos jours, les modèles hydrologiques sont nombreux. Le tout premier modèle a vu le jour en 1850 ; il s'agit de la méthode rationnelle (Mulvany, 1850). Plus tard, il y a eu le modèle de l'hydrogramme unitaire par Sherman (1932), de l'hydrogramme unitaire instantané par Nash (1957) et de l'hydrogramme unitaire généralisé par Dooge (1959). Puis, entre les années 1959 et 1966, le modèle hydrologique de Stanford a été développé (Crawford et Linsley, 1966). Il s'agit là de l'ancêtre des modèles tels que nous les connaissons aujourd'hui. À cette époque, l'informatique en était à ses balbutiements et le développement du modèle hydrologique de Stanford en était dépendant en raison de la puissance de calcul requise. L'évolution de ce modèle a donc suivi de près les améliorations successives apportées aux ordinateurs disponibles sur le marché. L'idée d'inclure certains paramètres à déterminer en fonction des caractéristiques spécifiques du bassin versant ainsi que la calibration des paramètres pour s'ajuster aux données observées

a été proposée dans le modèle de Stanford (Crawford et Burges, 2004). De façon similaire, Dawdy et O'Donnell (1965) ont proposé le concept d'optimisation des paramètres d'un modèle hydrologique. Puis, dans le milieu des années 1970, l'essor connu dans le monde informatique a permis à de nombreux modèles hydrologiques de voir le jour. Citons notamment TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979), HBV (Bergström, 1976), les modèles hydrologiques du Génie Rural – GR (Michel, 1983), SHE - Système Hydrologique Européen (Abbott et al., 1986a, 1986b) et MIKE-SHE (Refsgaard et Storm, 1995). Au Québec, il y a eu CEQUEAU (Morin et al., 1981), HYDROTEL (Fortin et al. 1995; Fortin et al. 2001) et HSAMI (Bisson and Roberge, 1983 ; Fortin, 2000). Ce sont d'ailleurs les modèles hydrologiques les plus utilisés aujourd'hui au Québec. À l'extérieur du Québec, un des modèles que l'on retrouve de plus en plus dans la littérature est SWAT - Soil and Water Assessment Tool (Arnold et al., 1998). Il s'agit d'un modèle qui permet de modéliser l'hydrologie d'un bassin versant, mais également d'autres variables, comme le transport de sédiments et de nutriments ainsi que diverses variables reliées à l'exploitation agricole sur le bassin versant. Une des raisons qui expliquent la popularité du modèle SWAT, outre le fait qu'il intègre de si nombreux processus, est que ses fichiers source (les programmes informatiques constituant le modèle) sont accessibles à tous gratuitement dans la foulée des logiciels libres (« open source » en anglais). Il s'agit par contre d'un modèle extrêmement complexe et lourd à manipuler en raison de son caractère exhaustif. Dans tous les cas, le choix d'un modèle hydrologique est souvent restreint par les données disponibles pour le bassin versant que l'on veut étudier. Dans le cadre de ce projet de recherche, ce sont les

modèles CEQUEAU et HSAMI qui sont utilisés. Le choix de ces modèles provient du fait que ce sont les modèles utilisés par le partenaire industriel (RTA).

Le modèle hydrologique HSAMI (Bisson et Roberge, 1983 ; Fortin, 2000) a été développé chez Hydro-Québec. Le nom «HSAMI» n'est pas réellement un acronyme. Chez Hydro-Québec, les initiales de la division qui s'occupe de la prévision hydrologique sont «HS» pour «Hydrological Service». Pour cette raison, les modèles développés pour la prévision hydrologique débutent toujours par «HS». Ces modèles ont subi des améliorations successives au fil du temps et l'équipe de conception a voulu ajouter au nom du modèle les lettres «AMÉ» pour «amélioré». Or, comme il était impossible d'inclure un accent dans le nom du modèle, il a été décidé de remplacer le «É» par un «I», ce qui donne au final le nom «HSAMI», qui signifie donc «modèle du service hydrologique amélioré». Il s'agit d'un modèle conceptuel et global, c'est-à-dire que les processus sont représentés par des réservoirs et que les paramètres et les données météorologiques sont définis pour tout le bassin versant. C'est un modèle hydrologique qui possède 23 paramètres à calibrer, soient pour les processus de fonte de neige, d'évapotranspiration, de ruissellement de surface, d'écoulement vertical de l'eau dans le sol et d'écoulement horizontal de l'eau vers l'exutoire (Fortin, 2000). Les intrants météorologiques nécessaires rendent ce modèle facilement applicable puisque seules les températures maximales et minimales ainsi que la pluie et la neige sont nécessaires. Ce modèle permet de simuler les apports à un réservoir ou le débit à un exutoire de bassin versant. Il tient également compte de la précipitation directe sur les réservoirs, ce qui est un atout dans le cas de modélisation hydrologique à des

fins de gestion de production hydroélectrique. La figure 6 présente le schéma conceptuel du modèle HSAMI et le tableau 2 présente une description des différents paramètres.

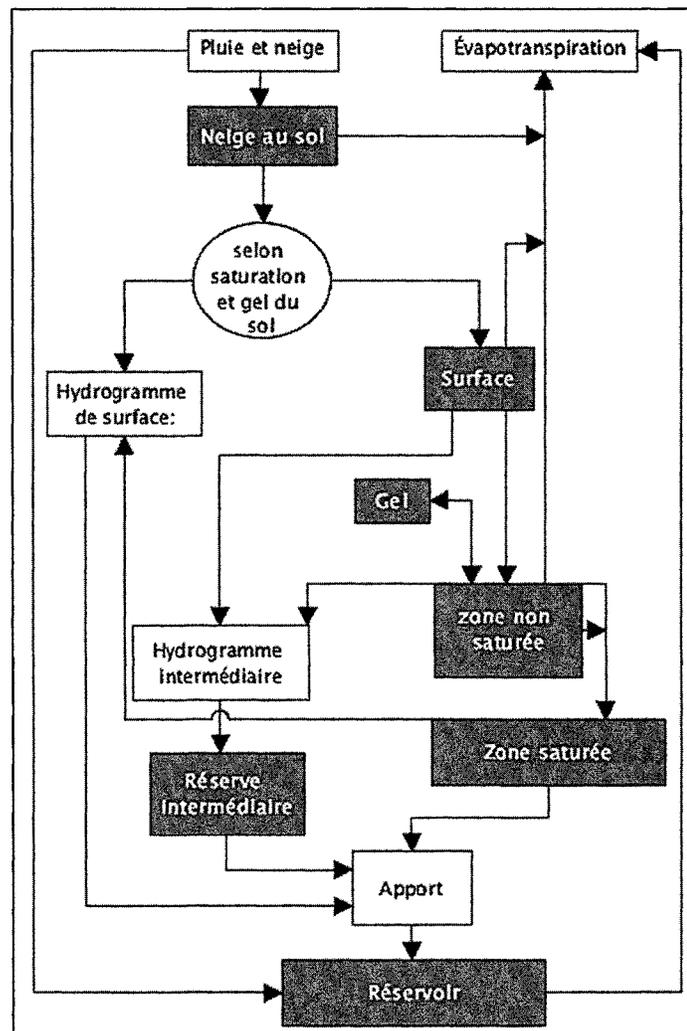


Figure 6 : Schéma du modèle conceptuel HSAMI
(Fortin, 2000)

Tableau 2 : Paramètres du modèle HSAMI
(Fortin, 2000)

paramètres liés à l'évapotranspiration	rôle du paramètre
1 <i>efficacite_evapo_ete</i>	facteur multipliant l'ETP permettant d'estimer l'ETR en été
2 <i>efficacite_evapo_hiver</i>	facteur multipliant <i>efficacite_evapo_ete</i> *ETP permettant d'estimer l'ETR en hiver
paramètres liés à la fonte de neige	rôle du paramètre
3 <i>taux_fonte_jour</i> (cm/ Δ C/jour)	taux de fonte du couvert nival, en cm/jour, pour chaque degré Celcius d'écart entre la température maximale et le seuil <i>temp_fonte_jour</i>
4 <i>taux_fonte_nuit</i> (cm/ Δ C/jour)	taux de fonte du couvert nival, en cm/jour, pour chaque degré Celcius d'écart entre la température minimale et le seuil <i>temp_fonte_nuit</i>
5 <i>temp_fonte_jour</i> (C)	seuil de température maximale à partir duquel le couvert de neige peut fondre
6 <i>temp_fonte_nuit</i> (C)	seuil de température minimale à partir duquel la fonte du couvert de neige est accélérée
7 <i>temp_ref_pluie</i> (C)	température de référence par rapport à laquelle on calcule la chaleur apportée par la pluie au couvert nival
8 <i>effet_redoux_sur_aire_enneigee</i>	paramètre empirique utilisé pour relier les variables d'état <i>neige_au_sol_totale</i> et <i>fonte_totale</i> à la proportion du bassin couvert par de la neige
paramètres liés à l'estimation du ruissellement de surface	rôle du paramètre
9 <i>effet_gel</i>	paramètre empirique utilisé pour relier l'écart entre les variables d'état <i>gel</i> et <i>degel</i> à la proportion de l'eau de fonte qui ruisselle en surface
10 <i>effet_sol</i> (cm)	quantité de pluie sur 24h nécessaire pour que 50% de cette eau ruisselle en surface lorsque le sol est complètement sec (i.e. la réserve <i>sol</i> est égale à zéro)
11 <i>seuil_min</i> (cm)	quantité de pluie sur 24h nécessaire pour que 50% de cette eau ruisselle en surface lorsque le sol est saturé (i.e. la réserve <i>sol</i> est égale à <i>sol_max</i>)

Tableau 2 : Paramètres du modèle HSAMI (suite)
(Fortin, 2000)

paramètres liés à l'écoulement vertical de l'eau dans le sol	rôle du paramètre
12 sol_min (cm)	quantité d'eau dans la zone non-saturée qui ne peut s'écouler par gravité
13 sol_max (cm)	quantité maximale d'eau que peut contenir la zone non-saturée du sol
14 nappe_max (cm)	quantité maximale d'eau que peut contenir l'aquifère avant de générer un ruissellement de surface
15 portion_ruissellement_surface	proportion de l'eau en surface qui ruisselle via l'hydrogramme intermédiaire au lieu de cheminer à travers la colonne de sol
16 portion_ruissellement_sol_max	proportion de l'eau qui ruisselle via l'hydrogramme intermédiaire lorsque la réserve non-saturée déborde (le reste est acheminé vers la nappe)
17 taux_vidange_sol_min (24h ⁻¹)	taux de vidange de la zone non-saturée vers la nappe
18 taux_vidange_nappe (24h ⁻¹)	taux de vidange de la nappe, cette vidange constituant le débit de base
paramètres liés à l'écoulement horizontal de l'eau vers l'exutoire	rôle du paramètre
19 taux_vidange_inter (24h ⁻¹)	taux de vidange de la réserve intermédiaire, cette vidange constituant l'apport intermédiaire
20 mode_hydrogramme_surface (jour)	pointe de l'hydrogramme unitaire de surface
21 forme_hydrogramme_surface	paramètre de forme de l'hydrogramme de surface (selon une fonction de distribution gamma)
22 mode_hydrogramme_inter (jour)	pointe de l'hydrogramme intermédiaire
23 forme_hydrogramme_inter	paramètre de forme de l'hydrogramme de surface (selon une fonction de distribution gamma)

Le modèle hydrologique CEQUEAU (Morin et Paquet, 2007) a été développé à l'Institut National de Recherche Scientifique – Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE), qui était anciennement le Centre Québécois des sciences de l'Eau (CEQUEAU). Il s'agit d'un modèle conceptuel permettant de simuler les débits et cinq paramètres de qualité de l'eau. Le modèle est considéré comme semi-distribué, c'est-à-dire que le bassin versant est divisé en éléments carrés, ce qui permet de faire varier les caractéristiques physiques et les intrants météorologiques sur la superficie du bassin. Par contre, certains paramètres sont globaux. Le nombre de carreaux dépend du nombre de stations météorologiques disponibles, de la topographie et de la superficie du bassin versant à modéliser. Puis, les carreaux sont divisés en carreaux partiels avec les lignes de partage des eaux pour représenter l'écoulement de l'eau à l'intérieur du bassin versant. Les processus d'écoulement de l'eau sont schématisés par des réservoirs. (Morin et al., 1994) La figure 7 présente le schéma du modèle hydrologique CEQUEAU. De plus, le tableau 3 présente les paramètres et constantes du modèle CEQUEAU.

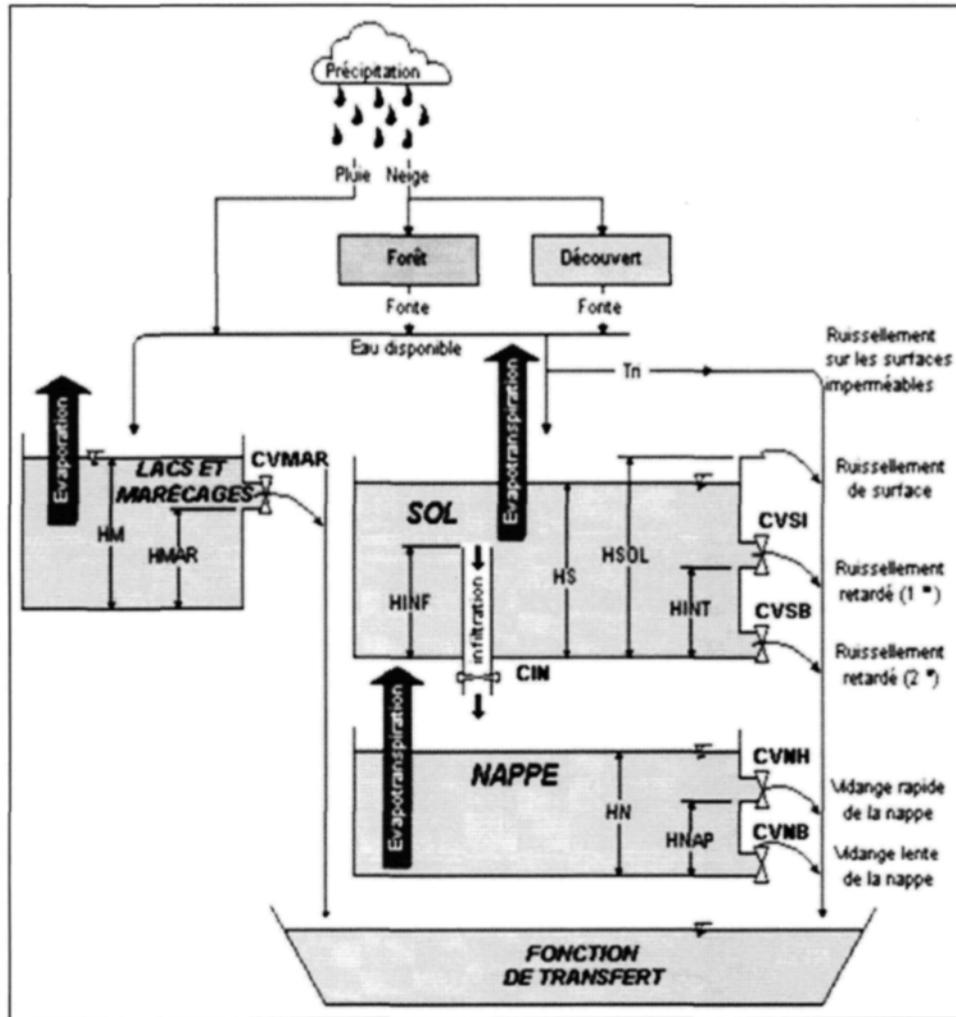


Figure 7 : Schéma de production du modèle CEQUEAU
(Morin et Paquet, 2007)

Tableau 3 : Paramètres et constantes intervenant dans le modèle CEQUEAU
(Morin et al., 2002)

Paramètres	Paramètre déterminé par essai et erreur		
	Paramètre déterminé selon la physique du phénomène		
	Constante déterminée à l'aide des caractéristiques hydrologiques et physiographiques		
		Description	
Paramètres des réservoirs SOL-NAPPE-MARAIS			
CIN	●		coefficient d'infiltration du réservoir SOL au réservoir NAPPE
CVMAR	●		coefficient de vidange du réservoir LACS et MARÉCAGES
CVNB	●		coefficient de vidange du réservoir NAPPE (vidange basse)
CVNH	●		coefficient de vidange du réservoir NAPPE (vidange haute)
CVSB	●		coefficient de vidange du réservoir SOL (vidange basse)
CVSI	●		coefficient de vidange du réservoir SOL (vidange intermédiaire)
HINF	●		seuil d'infiltration vers le réservoir NAPPE
HINT	●		seuil de vidange intermédiaire du réservoir SOL
HMAR	●		seuil de vidange du réservoir LACS et MARÉCAGES
HNAP	●		seuil de vidange du réservoir NAPPE
HRIMP	●		hauteur de précipitation pour qu'il y ait ruissellement sur des surfaces imperméables
HSOL	●		hauteur du réservoir SOL
Paramètres régissant le fonte de neige			
STRNE		●	seuil de transformation pluie-neige
TFC		●	taux de fonte en forêt
TFD		●	taux de fonte en clairière
TSC		●	seuil de température de fonte en forêt
TSD		●	seuil de température de fonte en clairière
TTD		●	coefficient de déficit calorifique de la neige
TTS		●	seuil de mûrissement du stock de neige
Paramètres qui gouvernent l'évapotranspiration			
EVNAP	●		pourcentage d'évapotranspiration pris dans le réservoir NAPPE
HPOT	●		seuil de prélèvement de l'eau à taux potentiel
XAA		●	exposant de la formule de Thornthwaite
XIT		●	valeur de l'index thermique de Thornthwaite
Paramètre et constante du transfert			
EXXKT	●		paramètre d'ajustement du coefficient de transfert
ZN		●	temps de concentration du bassin
Paramètres et constantes divers			
COET		●	coefficient de correction des températures avec l'altitude
COEP		●	coefficient de correction des précipitations avec l'altitude
FACT	●		facteur modifiant les précipitations moyennes sur un ensemble de carreaux entiers
JOEVA	●		variables décalant la date d'insolation potentielle maximale respectivement pour
JONEI	●		l'évapotranspiration et pour la neige
XINFMA		●	infiltration maximale par jour
XLA		●	latitude moyenne du bassin versant
TRI		●	pourcentage de surface imperméable

2.2 DESCRIPTION DE LA MÉTHODE D'OPTIMISATION

La méthode d'optimisation utilisée dans ce projet lors de la calibration des modèles hydrologiques s'appelle Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES) et il s'agit de la méthode d'optimisation utilisée par RTA suite aux travaux d'Arsenault et al. (2013). C'est une méthode qui cherche la solution optimale globale et qui est basée sur une stratégie de minimisation d'une fonction objectif définie selon les besoins de l'utilisateur. Il s'agit d'un processus itératif qui se termine lorsque le critère d'arrêt est atteint, critère qui peut être défini par l'utilisateur (par exemple, le nombre d'itérations). La description qui suit constitue un résumé de l'article de Hansen (2006) décrivant cette méthode d'optimisation. Une population désigne l'ensemble des éléments faisant l'objet de la mesure statistique. Ainsi, à chaque itération, une nouvelle population est déterminée par un échantillonnage multivarié de la valeur des variables de décision, provenant d'une distribution normale. Cette nouvelle population est fonction de la valeur moyenne de la distribution, de l'écart-type global («step size» en anglais) et de la matrice de covariance. La moyenne de la population future provient de la population sélectionnée de l'itération actuelle. Pour la matrice de covariance, celle de l'itération future est un estimateur du maximum de vraisemblance non-biaisé de la matrice de l'itération actuelle (des étapes sélectionnées pour leur succès). Cette matrice permet d'estimer la variance des étapes sélectionnées. Il s'agit d'un estimateur des dérivées secondes de la fonction objectif, lesquelles permettent de déterminer le chemin évolutif. Le concept de chemin d'évolution (séquence d'étapes successives, «evolution path» en anglais) permet d'augmenter la rapidité de la méthode en utilisant les corrélations entre des étapes consécutives.

Également, ce chemin permet d'ajuster la grandeur des incréments («step size» en anglais) selon la somme des incréments consécutifs des étapes précédentes. Ainsi, si le chemin d'évolution cumulatif est long, c'est que les étapes consécutives sont dans la même direction et que le chemin est bon, donc que la longueur des incréments devrait être augmentée. Au contraire, si le chemin d'évolution cumulatif est court, alors les étapes ne sont pas corrélées et s'annulent. Il faudrait donc diminuer la longueur des incréments puisque les chemins évolutifs divergent. La population de l'itération suivante provient d'étapes sélectionnées selon leur succès, en comparaison à des points sélectionnés pour d'autres méthodes, ce qui diminue le risque de convergence prématurée.

2.3 INCERTITUDE LIÉE À LA PARAMÉTRISATION DES MODÈLES

Les travaux à réaliser sont répartis en deux volets, comme mentionné précédemment. Le premier volet consiste à calibrer le modèle hydrologique HSAMI (Bisson et Roberge, 1983 ; Fortin, 2000) sur les deux bassins versants étudiés afin d'estimer l'erreur attribuable à la paramétrisation du modèle. La calibration du modèle HSAMI, permettant de déterminer les 23 paramètres, est effectuée en utilisant la méthode Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES) (Hansen, 2006). Dans un premier temps, une analyse de l'incertitude attribuable à la méthode d'optimisation est effectuée. En effet, cette méthode d'optimisation possède une incertitude sur les paramètres qui sont trouvés. On sait que les paramètres peuvent varier plus ou moins d'une calibration à l'autre puisque la méthode d'optimisation, bien que possédant toujours les mêmes paramètres de départ, peut évoluer dans toutes les directions en cherchant le minimum de la

fonction objectif (élément à minimiser, par exemple le biais). Pour évaluer l'incertitude de la paramétrisation due à la méthode d'optimisation, une série de 20 répétitions de la même calibration est lancée et les 23 paramètres obtenus pour chacune des calibrations sont comparés entre eux d'après les écarts-types et les quartiles afin de caractériser l'incertitude.

Également, l'incertitude sur les débits attribuable à la paramétrisation du modèle sera évaluée en portant attention aux récessions hivernales. Il est possible de connaître le débit en temps réel d'un cours d'eau. La méthode la plus couramment utilisée consiste à mesurer le niveau d'eau, pour ensuite calculer le débit à partir d'une relation niveau-débit préalablement établie. Cette relation a été établie en prenant une série de mesures sur le terrain, c'est-à-dire des mesures de débits avec les niveaux d'eau correspondants. Cependant, cette relation n'est plus valide lorsqu'il y a un couvert de glace puisque celui-ci fait augmenter le niveau d'eau et modifie les conditions hydrauliques de la section d'écoulement. Les débits sous glace doivent donc être corrigés. La façon de corriger les débits hivernaux la plus couramment utilisée consiste à prendre des mesures de débit ponctuelles en période hivernale afin de connaître avec exactitude le débit pour une station de mesure. Puis, une interpolation est effectuée entre les points de mesure par des techniciens expérimentés. (Turcotte et al., 2005) Or, pour les stations de RTA, ces corrections n'ont été effectuées que pour la période de 1994-1999. Quelques études se sont penchées sur les méthodes employées pour effectuer la correction des débits sous glace afin d'améliorer la méthodologie, et plus particulièrement faciliter la correction en temps réel. Citons notamment Huttunen et al. (1997) qui ont utilisé une approche basée sur une

modélisation conceptuelle et sur un réseau de neurones ainsi qu'un modèle hybride pour modéliser l'épaisseur de la glace et l'effet de la glace sur le débit. Des données de température, de précipitations, mais également d'épaisseur de glace sont nécessaires. Ils ont démontré que ces trois approches donnaient des résultats satisfaisants et que le modèle hybride est le plus performant. Il y a également Hamilton et al. (2000) qui proposent une méthode de correction des débits en hiver par modélisation hydrologique basée sur le modèle HBV. Ils évaluent également l'incertitude associée à l'interprétation des techniciens et concluent que le modèle n'améliore pas la précision des données par rapport à la méthode d'interpolation faite par les techniciens. Par contre, elle comporte l'avantage d'être indépendante de l'interprétation des techniciens, donc plus objective. Muleta (2012) a mené une étude sur l'analyse de la sensibilité des paramètres et la calibration du modèle SWAT selon les saisons pour le Little River Experimental Watershed (LREW), un bassin versant du Agricultural Research Service - U.S. Department of Agriculture (USDA-ARS), situé en Géorgie aux États-Unis. La distinction des saisons se fait entre la saison sèche et la saison humide. La calibration dont les paramètres sont variables selon les saisons a permis d'améliorer de façon significative les résultats en calibration et en validation. L'analyse des deux séries de paramètres montre que les valeurs obtenues concordent bien avec les phénomènes physiques selon la saison sèche ou humide.

Pour les bassins versants étudiés ici, soient Lac Manouane et Passes-Dangereuses, les données disponibles sont les corrections effectuées pour les années 1994 à 1999 et il n'est pas possible d'obtenir d'autres mesures. Il est donc proposé d'utiliser la modélisation

avec HSAMI pour effectuer la correction des débits au-delà de l'année 1999 en se servant des années dont les corrections sont disponibles pour calibrer le modèle. Le choix du modèle HSAMI plutôt que CEQUEAU provient du fait que HSAMI est un modèle global alors que CEQUEAU est semi-distribué. HSAMI est donc facilement applicable sur plusieurs bassins versants alors que le modèle CEQUEAU nécessite de nombreuses données physiques sur les bassins versants et beaucoup de temps de mise en place pour chaque bassin. La méthodologie sera évaluée sur quelques bassins versants au Québec pour des périodes d'analyse variant entre 5 et 20 ans (incluant la calibration et la validation). Le choix des bassins versants s'est fait en utilisant les bassins dont les données météorologiques sont disponibles de même que le débit avant et après correction. Il est à noter qu'il faut fournir à HSAMI une série météo complète comme intrant, ce qui rend la tâche plus difficile puisque pour la plupart des stations, il y a des données manquantes. Les bassins versants retenus pour cette analyse sont cités dans le tableau 4. Contrairement à l'étude de Hamilton et al.(2000), qui a montré qu'il était possible d'obtenir la même précision avec un modèle qu'avec l'interpolation faite par les techniciens expérimentés, mais en utilisant moins de points de mesures, le projet de recherche présenté ici vise à corriger les débits sous glace dans le contexte où aucune mesure de débit sous glace en cours d'hiver n'est disponible. De plus, une analyse sera effectuée selon les saisons, soit la détermination d'une série de paramètres pour l'hiver (présence de glace) et une autre série de paramètres pour le reste de l'année. Les résultats de la correction des débits sous glace seront analysés selon le critère de l'erreur relative (équation 4), où le débit corrigé réel

correspond au débit corrigé par des mesures en cours d'hiver et le débit corrigé estimé correspond au débit corrigé par la méthode de correction suggérée.

$$\text{Erreur relative (\%)} = \frac{|\text{Débit corrigé estimé} - \text{Débit corrigé réel}|}{\text{Débit corrigé réel}} \cdot 100 \quad \text{Équation 4}$$

Tableau 4 : Bassins versants utilisés pour valider la méthodologie de correction des débits sous glace

Bassin versant	Localisation	Superficie (km ²)	Débit moyen* (m ³ /s)	Période à l'étude
Péribonka	Nord du lac Saint-Jean	7 505	177,18	1994/09/19 – 1999/06/30
Montagnes Blanches	Nord du lac Saint-Jean	1 900	42,03	1994/09/19 - 1999/06/30
Manouane	Nord du lac Saint-Jean	3 685	83,27	1980/01/01 – 1999/12/31
Ashuapmushuan amont	Nord-Ouest du lac Saint-Jean	11 100	246,76	1993/09/01 – 2006/12/01
Ashuapmushuan aval	Nord-Ouest du lac Saint-Jean	15 300	297,27	1980/01/01 – 1999/12/31
Mistassini	Nord-Ouest du lac Saint-Jean	9 631	202,18	1984/08/01 – 2006/12/01
Petite Péribonka	Nord du lac Saint-Jean	1 020	18,79	1983/11/01 – 2006/12/01

*Le débit moyen est calculé sur la période à l'étude.

2.4 SEGMENTATION DES BASSINS VERSANTS

Avec le modèle CEQUEAU, une analyse est effectuée sur la pertinence de segmenter chacun des bassins versants à l'étude en deux sous-bassins. Le choix de ce modèle provient du fait que CEQUEAU est un modèle distribué et qu'il est possible de connaître le débit à chacun des carreaux partiels du modèle, en plus d'être le modèle en opération chez RTA. Le bassin versant Lac Manouane comporte le sous-bassin Montagnes

Blanches à l'amont et le bassin versant Passes-Dangereuses comporte le sous-bassin Pérignon à l'amont (voir figure 4). Actuellement, la modélisation hydrologique est effectuée globalement pour chacun des bassins versants (sans segmentation) et seul le débit à l'exutoire est considéré dans le choix des paramètres et pour l'analyse de la performance du modèle. Dans le cadre de ce projet de recherche, une modélisation avec le débit des sous-bassins sera effectuée dans le but de déterminer si cette segmentation améliore la modélisation hydrologique. Il s'agit d'appliquer le critère d'optimisation pour la recherche des paramètres à l'exutoire de chacun des deux sous-bassins, c'est-à-dire de paramétrer le modèle pour que ces deux débits soient bien représentés. Cela peut se faire en adoptant le même jeu de paramètres pour les deux sous-bassins ou, si un seul jeu de paramètres ne permet pas d'obtenir des résultats satisfaisants, deux séries de paramètres différents seront appliquées pour les deux sous-bassins. Actuellement, les mêmes paramètres sont utilisés pour tout le bassin versant et seul le débit à l'exutoire est optimisé. Dans la littérature, de nombreuses études ont été menées pour évaluer la pertinence de segmenter un bassin versant en deux sous-bassins et vérifier l'amélioration de la prévision du débit à l'exutoire, dont Loumagne et al. (1999), Morvan (2000), Boyle et al. (2001) et Plantier (2003). Ces études ont conclu à des résultats mitigés. Dans certains cas, l'approche globale est la meilleure alors que pour d'autres, c'est l'approche distribuée qui est préférable. Des modèles globaux conceptuels sont généralement utilisés dans ces études. Baudez et al. (1999) ont montré que l'approche globale était supérieure pour des bassins versants de plus petite taille alors que l'approche semi-distribuée était préférable pour les plus grands bassins versants. Les superficies des 15 bassins versants de leur étude varient de 192 à 5460

km². Une étude plus complète a été menée par Oddos (2002) sur 4500 bassins versants virtuels composés chacun de deux sous bassins versants réels indépendants qui se jettent vers le même exutoire, c'est-à-dire que les deux sous-bassins réels sont juxtaposés de façon virtuelle (sous-bassins qui ne se jettent pas vers le même exutoire en réalité). Cette étude a été menée avec quatre modèles globaux conceptuels. La conclusion de cette étude est que le facteur déterminant dans la performance des approches est la corrélation des pluies sur les deux sous-bassins et que le choix de la meilleure approche demeure spécifique à chaque bassin versant. Cette conclusion souligne le besoin d'étudier de façon spécifique les bassins gérés par RTA à l'aide du modèle hydrologique en opération. Pour l'étude dont il est question ici, le premier sous-bassin est situé à l'amont du deuxième, c'est-à-dire que contrairement à toutes les études citées précédemment, il ne s'agit pas de deux bassins versants indépendants se jetant vers le même exutoire, mais plutôt un premier bassin versant se déversant vers le second. Les superficies totales sont de l'ordre de 5000 km² pour Lac Manouane (incluant le sous-bassin Montagnes Blanches) et 11500 km² pour Passes-Dangereuses (incluant le sous-bassin Péribonka).

Aussi, des études se sont penchées sur la calibration spatialisée d'un modèle hydrologique (Qi et Grunwald, 2005 ; Santhi et al., 2008). Dans ces études, le modèle utilisé, qui est SWAT dans les deux cas, est calibré et validé à la fois sur le débit à l'exutoire du bassin versant et sur les débits des sous-bassins versants. Dans la première étude, quatre sous-bassins sont utilisés ainsi que l'exutoire du bassin versant. Cette

approche permet de mieux représenter les processus hydrologiques à l'intérieur d'un bassin versant. Par contre, le modèle a donné des résultats insatisfaisants, notamment en raison de la difficulté à modéliser l'accumulation de la neige et le processus de fonte. Dans la deuxième étude, il s'agit plutôt d'adapter certains paramètres du modèle selon la variabilité spatiale pour mieux représenter certains processus, comme l'évapotranspiration, au niveau des sous-bassins. Dans ce cas, la calibration spatialisée a permis de mieux capter la variation dans le régime hydrique des différents sous-bassins. Les analyses de débits sont faites au pas de temps mensuel et annuel. Dans le projet présenté ici, le pas de temps est plutôt journalier. Une autre étude (Lerat et al., 2012) a montré que la calibration des paramètres sur les débits des sous-bassins en plus du débit à l'exutoire du bassin versant principal n'améliore pas les résultats de façon significative. Dans le projet de recherche présenté ici, il s'agit de comparer la qualité des simulations obtenues lorsque le modèle CEQUEAU est calibré en optimisant uniquement le débit à l'exutoire du bassin versant global (Passes-Dangereuses ou Lac Manouane) ou en optimisant à la fois le débit à l'exutoire et le débit du sous-bassin (Passes-Dangereuses et Péribonka ou Lac Manouane et Montagnes Blanches), tout en permettant l'utilisation de différents paramètres pour les deux sous-bassins. Le débit du sous-bassin est connu puisqu'une station de mesure en rivière est située à l'exutoire du sous-bassin. Trois calibrations ont été effectuées, soit une calibration optimisant uniquement le débit à l'exutoire, uniquement le débit du sous-bassin et les deux débits à poids égal. Ainsi, il a été possible de calibrer le modèle selon les différentes alternatives en modifiant la fonction objectif (par exemple, minimiser l'écart entre le débit simulé et observé au sous-bassin) de la méthode d'optimisation CMA-ES.

De plus, cette première analyse se fait uniquement en calibration, c'est-à-dire que toutes les années disponibles sont utilisées pour la détermination des paramètres optimaux. Cela provient du fait qu'on veut avoir le plus d'années possibles pour la détermination des paramètres et qu'on s'intéresse à déterminer si une méthode peut améliorer les performances par rapport à ce qui est utilisé actuellement, et non pas à la performance absolue de la méthode retenue. De plus, l'entreprise va poursuivre le travail selon ces besoins pour obtenir les bons paramètres en mode opérationnel, ce qui inclut de travailler sur la séparation des données selon une période de calibration et de validation, tout en faisant un compromis pour maximiser le nombre d'années et pour tenir compte de la variabilité du climat au fil des années.

Comme mentionné précédemment, le modèle hydrologique CEQUEAU dans sa forme actuelle permet de connaître le débit à chaque carreau partiel pour tous les pas de temps lors d'une simulation. La figure 8 illustre la représentation des bassins amont dans CEQUEAU. On y voit la séparation en carreaux et les flèches représentant le sens d'écoulement et le cheminement d'un carreau à l'autre. Les lettres A, B et C représentent la division d'un carreau en carreaux partiels par la ligne de partage des eaux.

Les critères retenus pour l'analyse de la performance des calibrations sont le critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970) et le biais relatif. Ce choix provient de l'importance du biais pour la gestion opérationnelle chez RTA, puisqu'il permet de vérifier si le bilan en eau est bon dans la modélisation, c'est-à-dire si les volumes d'eau prévus

correspondent aux volumes d'eau observés, ce qui est important pour une bonne gestion en prévision des apports. De plus, le critère de Nash-Sutcliffe est utilisé puisqu'il s'agit d'un indicateur reconnu en hydrologie. Les équations permettant le calcul de ces indicateurs de performance sont présentées ci-dessous (équations 5 et 6). Il est à noter que la fonction objectif pour la détermination des paramètres considère seulement le critère de Nash-Sutcliffe dans tous les cas. Pour ces calibrations, cela permet une meilleure optimisation des paramètres. Cette étude est réalisée pour les années 1995 à 2012 pour les deux bassins versants.

$$\text{Nash-Sutcliffe} = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad \text{Équation 5}$$

$$\text{Biais relatif} = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})}{\sum_{i=1}^N Q_{obs_i}} \quad \text{Équation 6}$$

Avec :

Q_{obs_i} : Débit observé au $i^{\text{ème}}$ pas de temps [m^3/s]

Q_{sim_i} : Débit simulé au $i^{\text{ème}}$ pas de temps [m^3/s]

$\overline{Q_{obs}}$: Débit observé moyen [m^3/s]

N: Nombre de pas de temps [m^3/s]

Il est à noter que les valeurs de Nash-Sutcliffe sont exprimées par NASH dans les figures de résultats de ce document, alors que les valeurs de biais relatif sont exprimées par BIAIS.

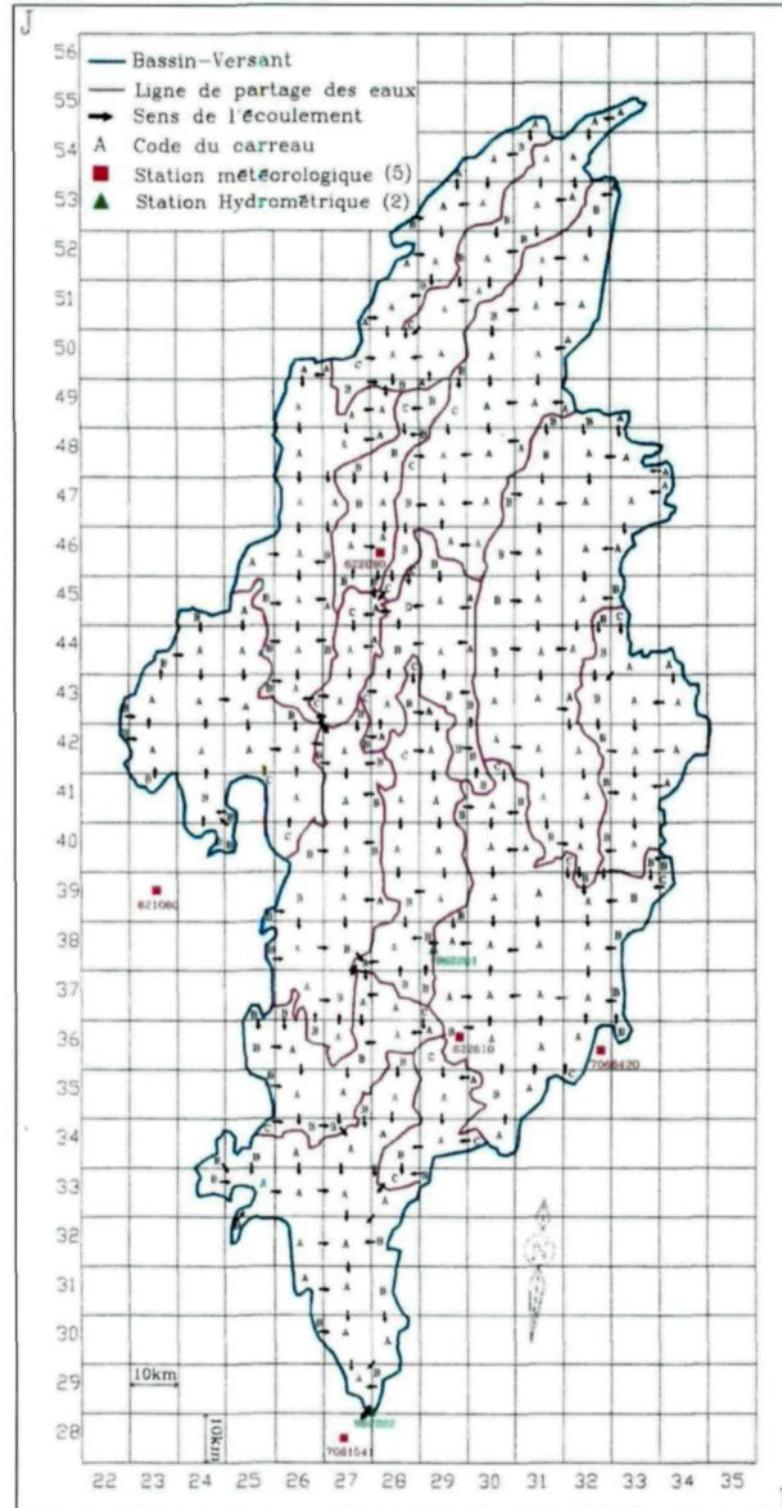


Figure 8 : Représentation des bassins versants amont dans CEQUEAU

(Morin et al., 2002)

2.5 CORRECTION DES APPORTS NON-CONTRÔLÉS

Comme le débit évacué à Bonnard est nécessaire pour la détermination des ANC des bassins amonts (voir équations 1 et 2), celui-ci sera analysé afin d'en valider les valeurs. Une analyse des ANC à Passes-Dangereuses indique que le débit évacué à Bonnard semble problématique. Ainsi, la première portion de la correction des ANC consiste à valider les valeurs de débits évacués à Bonnard en utilisant la modélisation hydrologique avec le modèle CEQUEAU.

De plus, le délai de deux jours pour l'écoulement entre le déversoir Bonnard et le réservoir Passes-Dangereuses a été estimé par RTA. Cependant, on croit que ce délai n'est pas adéquat pour toutes les périodes de l'année. Ainsi, afin de remédier à l'utilisation d'un délai pour le cheminement de l'eau entre le déversoir Bonnard et le réservoir Passes-Dangereuses, une modélisation est faite avec le modèle CEQUEAU. En effet, le modèle actuel permet d'implanter un type de barrage qui a des intrants de débits provenant d'un bassin versant voisin. Une modélisation sera donc effectuée avec un intrant de débit où est situé le canal Bonnard, et l'écoulement de ce débit sera modélisé par CEQUEAU jusqu'au réservoir. Cette modélisation sera comparée à la fonction de transfert à délai fixe de deux jours présentement utilisée.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION HYDROLOGIQUE AVEC HSAMI ET CORRECTION DES DÉBITS HIVERNAUX

3.1 CARACTÉRISATION DE L'INCERTITUDE DES PARAMÈTRES

3.1.1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

La connaissance de l'incertitude entourant la valeur des paramètres déterminés par l'optimisation automatique est importante dans le processus de modélisation hydrologique. Le premier aspect du projet consiste à calibrer le modèle HSAMI sur chacun des bassins versants afin d'en améliorer la modélisation hydrologique.

L'analyse de l'incertitude liée à la méthode d'optimisation montre une grande variabilité dans les paramètres obtenus. La figure 9 montre la distribution des valeurs des divers paramètres obtenus au cours des 20 essais pour la même calibration. Les numéros des paramètres tels que présentés sur la figure 9 font référence à ceux du tableau 2. Il est important de mentionner que les différentes valeurs des paramètres entraînent une performance pratiquement égale pour les 20 essais.

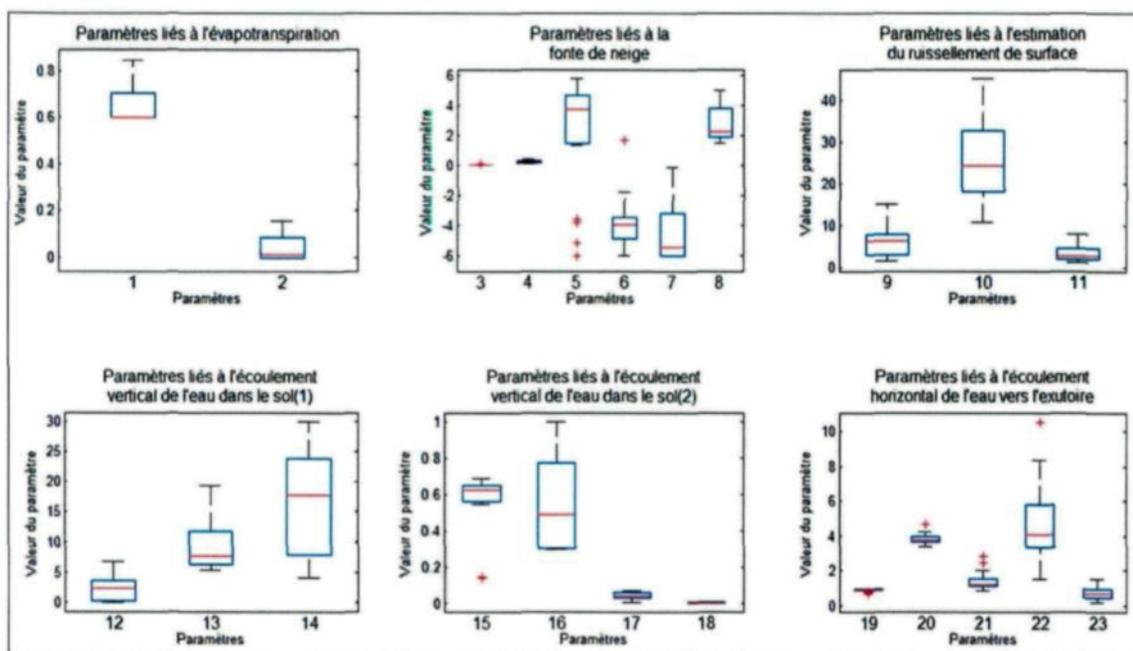


Figure 9 : Variabilité des paramètres du modèle HSAMI pour le bassin versant de la rivière Péribonka

3.1.2 ANALYSE DES RÉSULTATS

En analysant la figure 9, on constate que la variabilité des paramètres est assez importante dans toutes les catégories de paramètres, quoique un peu moins importante pour les paramètres liés à l'évapotranspiration. Cette variabilité représente un problème d'équifinalité tel qu'étudié par Beven (Beven et Freer, 2001; Beven, 2006) L'équifinalité se manifeste par des jeux de paramètres complètement différents mais donnant des résultats en simulation de performance égale. Par contre, ce ne sont pas tous les jeux de paramètres qui représentent bien la réalité d'un point de vue physique pour les différents phénomènes interagissant sur le cheminement de l'eau à l'intérieur du bassin versant. Cela pose donc problème au moment de la mise en place d'une modélisation hydrologique pour un bassin versant puisque le choix des paramètres devient ardu. En effet, on doit poser des critères

pour déterminer le meilleur jeu de paramètres, notamment sur le réalisme des valeurs obtenues, mais l'interprétation des paramètres et la détermination des valeurs maximales et minimales réalistes pour un paramètre est parfois difficile.

3.2 CORRECTION DES DÉBITS HIVERNAUX

3.2.1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Cette section présente les résultats pour la correction des débits sous glace pour les trois méthodes citées dans la méthodologie. La modélisation hydrologique avec HSAMI nécessite la calibration du modèle pour déterminer les paramètres spécifiques aux bassins versants étudiés. Il y a donc une période de calibration et une période de validation, déterminées selon les années disponibles. La calibration est effectuée sur les débits corrigés en hiver. La période de validation permet de simuler le débit en hiver, et ce dernier est considéré comme le débit corrigé. Pour la méthode par facteur de correction, plusieurs calibrations/validations ont été réalisées puisque la période n'a pas besoin d'être continue. Ainsi, toute la période sauf un an sert à la calibration et l'autre année sert à la validation (méthode de rééchantillonnage Jackknife (Quenouille, 1956; Tukey, 1958)). Le pourcentage d'erreur présenté est la moyenne de tous les essais calibration/validation. Pour la correction avec HSAMI, il faut des périodes de temps continu, c'est pourquoi un seul essai calibration/validation est effectué. De plus, la méthode par facteur de correction nécessite la connaissance du débit corrigé et du débit non corrigé. Ainsi, un rapport est calculé entre ces deux débits pour chaque journée de la période hivernale. Le facteur de correction utilisé correspond à la moyenne des années disponibles pour chacune des

jours de la période hivernale. Les résultats obtenus pour les trois méthodes de correction de débits sous glace sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Résultats de la correction des débits sous glace

Bassin versant	Erreur relative moyenne*	Période à l'étude		Erreur relative moyenne*		Période à l'étude		Erreur relative moyenne*			
	Données non-corrigées	Période à l'étude		Facteur de correction moyen		Période à l'étude		Correction avec HSAMI		Correction HSAMI (2 séries)	
		Période à l'étude	Calibration	Validation	Calibration	Validation	Calibration	Validation	Calibration	Validation	Calibration
Rivière Péribonka	117.62%	1994-09-19/ 1999-05-31	1 an	18.67%	24.55%	1994-09-19/ 1998-05-31	1998-06-01/ 1999-05-31	28.82%	40.16%	31.34%	40.36%
Rivière Montagnes Blanches	23.34%	1994-09-19/ 1999-05-31	1 an	9.70%	12.52%	1994-09-19/ 1998-05-31	1998-06-01/ 1999-05-31	26.68%	37.70%	19.52%	31.11%
Rivière Manouane	23.64%	1980-06-01/ 2000-05-31	1 an	14.02%	14.86%	1980-01-01/ 1989-12-31	1990-01-01/ 1999-12-31	40.77%	29.19%	24.97%	23.58%
Rivière Ashuapmushum (aval)	15.28%	1980-06-01/ 2000-05-31	1 an	11.70%	12.56%	1980-01-01/ 1989-12-31	1990-01-01/ 1999-12-31	20.50%	21.83%	28.83%	24.63%
Rivière Ashuapmushum (amont)	89.11%	1993-09-01/ 2006-08-31	1 an	87.43%	94.20%	1993-09-01/ 2001-12-31	2002-01-01/ 2006-12-01	22.82%	26.80%	27.10%	29.06%
Rivière Mistassini	43.28%	1984-08-01/ 2001-07-31	1 an	31.35%	33.59%	1984-08-01/ 1992-07-31	1992-08-01/ 2001-08-01	44.77%	46.44%	23.88%	31.75%
Rivière Petite Péribonka	46.23%	1983-11-01/ 2006-10-31	1 an	33.28%	35.16%	1983-11-01/ 1995-10-31	1995-11-01/ 2006-10-31	23.57%	28.83%	28.61%	29.17%

* Valeur de l'erreur relative calculée du 1er décembre au 30 avril

3.2.2 ANALYSE DES RÉSULTATS

On constate que la méthode pour corriger les débits hivernaux par facteur de correction donne de meilleurs résultats pour la majorité des bassins versants étudiés, soit cinq des sept bassins versants. Par contre, pour deux bassins, c'est la modélisation avec le modèle HSAMI comportant un seul jeu de paramètres qui donne de meilleurs résultats. Cela s'explique par le fait que, pour certains bassins, la correction à apporter est semblable d'une année à l'autre, où l'on remarque que la méthode par facteur de correction est optimale. C'est ce qui se produit pour les bassins versants Péribonka, Montagnes Blanches, Manouane, Ashuapmushuan aval et Mistassini. La figure 10 montre un exemple pour les trois méthodes de correction pour la rivière Péribonka. Sur cette figure, on peut voir que la

méthode par facteur de correction est celle qui donne les meilleurs résultats pour toutes les années, et ce tout au long de l'hiver. De plus, on constate que les deux modélisations avec HSAMI sont similaires. Pour ce qui est des bassins versants Ashuapmushuan amont et Petite Péribonka, la meilleure approche est celle de la modélisation hydrologique avec le modèle HSAMI puisque la correction à apporter diffère grandement d'une année à l'autre, ce qui rend l'application d'un facteur de correction inapproprié. Un exemple est présenté à la figure 11 pour la rivière Ashuapmushuan amont. On constate que la méthode par facteur de correction donne des débits estimés très éloignés des débits réels, alors que les deux modélisations avec HSAMI prévoient des débits très près des débits réels.

D'un autre côté, on note que l'approche par modélisation selon les saisons, c'est-à-dire avec deux jeux de paramètres, n'est pas concluante pour aucun des bassins versants étudiés. Bien qu'elle surpasse parfois la modélisation à un jeu de paramètres, elle demeure moins efficace que la méthode par facteur de correction dans ces cas-là. Le problème d'équifinalité ne permet pas d'analyser facilement les paramètres et d'utiliser une approche basée sur la modification des paramètres selon les saisons pour la correction des débits hivernaux dans le cadre de cette recherche. Il semble que l'incertitude liée à la méthode d'optimisation surpasse l'incertitude sur les saisons. Il est également très difficile de se baser uniquement sur une modification des paramètres selon les saisons pour effectuer la correction puisque ce ne sont pas toutes les stations de mesure de débit qui nécessitent une correction, d'où l'importance d'avoir au moins quelques années corrigées pour comprendre l'ampleur et la variabilité interannuelle de la correction à effectuer.

Ainsi, pour la suite du projet qui porte sur les bassins versants Montagnes Blanches et Péribonka, les débits en période hivernale sont corrigés par l'application d'un facteur de correction, et ce du 1^{er} décembre au 30 avril. Par contre, cette méthode suppose que le facteur de correction déterminé à partir des années 1994 à 1999 est valide pour les années futures (2000 à 2012), ce qu'il n'est pas possible de vérifier en l'absence de mesures. Malgré cette hypothèse, il est possible de faire confiance à cette approche puisque les résultats ont démontré une nette amélioration de la valeur des débits corrigés par cette méthode par rapport aux débits non-corrigés. Il est également à noter que le débit corrigé comporte toujours une erreur plus ou moins importante selon le bassin. Aucune des méthodes n'est parfaite, mais en l'absence de mesures en cours d'hiver, c'est la méthode par facteur de correction qui permet d'améliorer le plus la valeur du débit par rapport au débit non corrigé pour les rivières Péribonka et Montagnes Blanches.

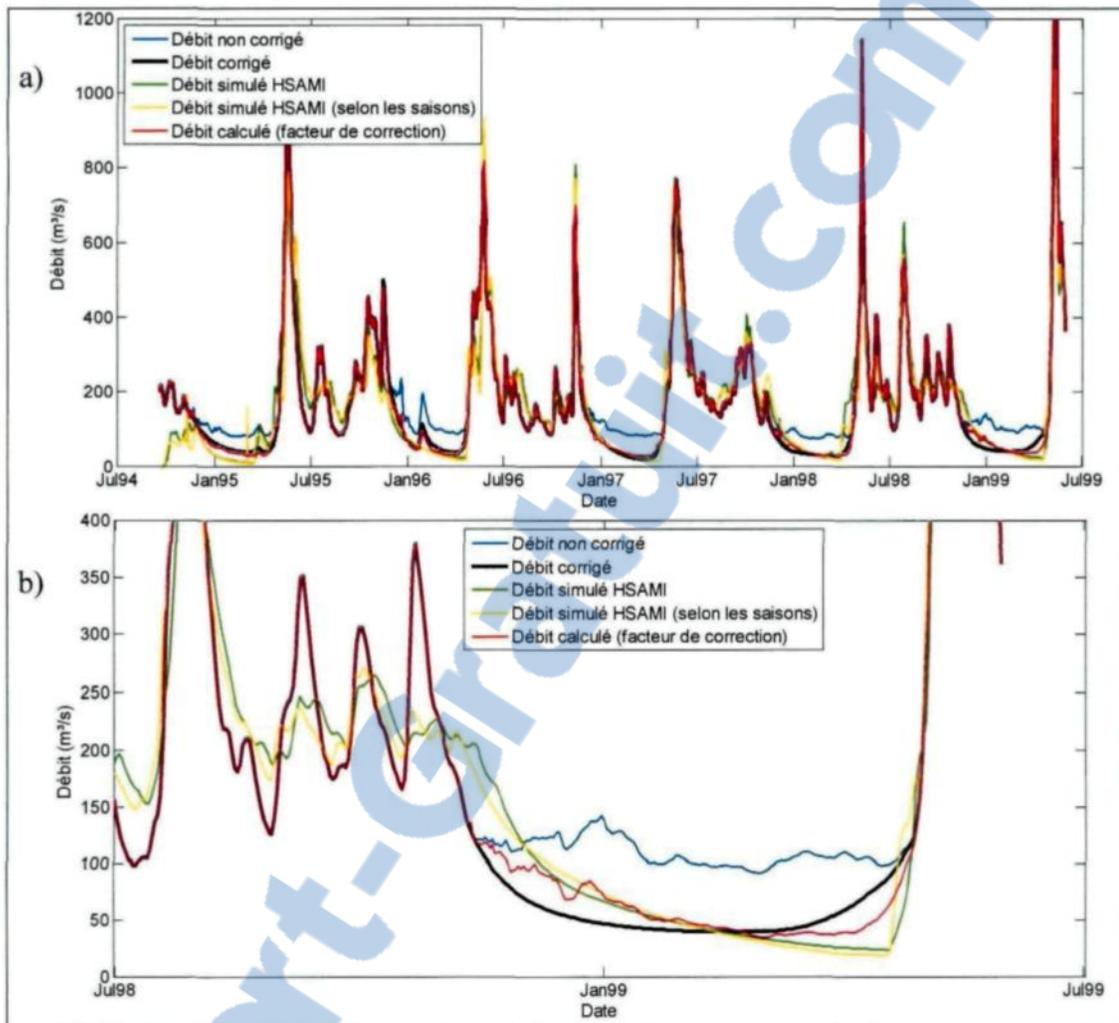


Figure 10 : Comparaison des méthodes de correction des débits hivernaux: bassin versant de la rivière Péribonka a) pour la période 1994-1999 b) pour l'hiver 1998-1999

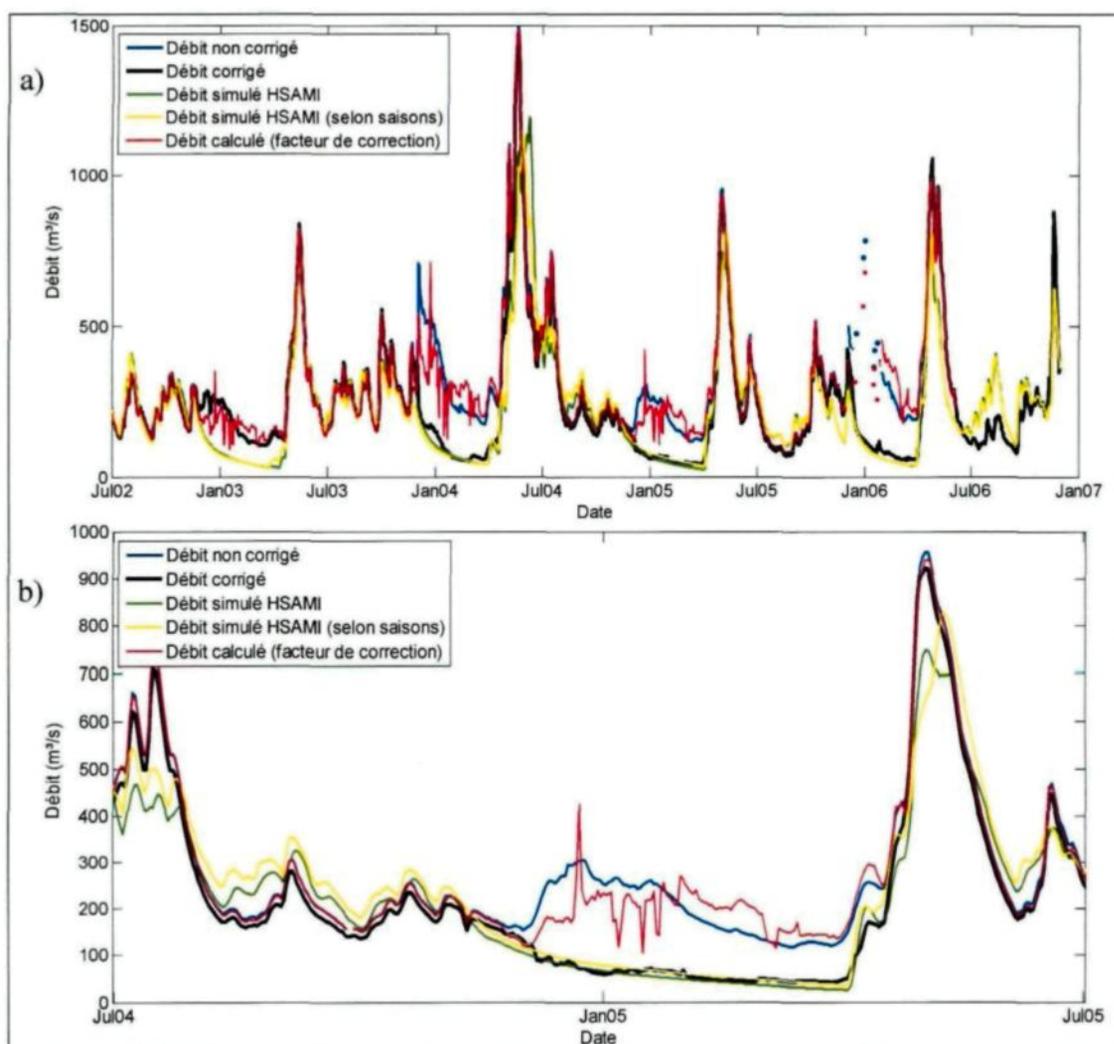


Figure 11 : Comparaison des méthodes de correction des débits hivernaux : bassin de la rivière Ashuapmushuan amont a) pour la période 2002-2006 b) pour l'hiver 2004-2005

CHAPITRE 4

CALIBRATION DU MODÈLE CEQUEAU SUR LES SOUS-BASSINS

4.1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les résultats pour la calibration du modèle CEQUEAU sur les sous-bassins sont analysés selon leur performance au sous-bassin et à l'exutoire. Une analyse de sensibilité sur les paramètres a été effectuée et seuls les paramètres les plus sensibles ont été utilisés pour les trois calibrations nécessaires à ce volet de l'étude, soit la calibration des paramètres en optimisant le débit à l'exutoire seulement, en optimisant le débit au sous-bassin seulement et en optimisant les deux débits à poids égal. Ainsi, les paramètres qui ont varié pour ces calibrations sont CIN, CVNB, CVSB, CVSI, HINF, HINT, HNAP et HPOT (se référer au tableau 3 et à la figure 7 pour la signification des paramètres). Il est important de mentionner que ces calibrations sont réalisées en adoptant les mêmes paramètres pour toute la superficie du bassin versant, c'est-à-dire au sous-bassin amont et aval.

Les résultats des calibrations sont présentés aux figures 12 et 13 pour le sous-bassin amont Montagnes Blanches et pour le sous-bassin aval Lac Manouane. De même, les figures 14 et 15 présentent les résultats pour le sous-bassin amont Péribonka et le sous-bassin aval Passes-Dangereuses. De plus, le tableau 6 présente un résumé des performances obtenues en termes de coefficient de Nash-Sutcliffe et de biais relatif. Les valeurs des

paramètres calibrés selon les trois méthodes discutées précédemment sont présentées dans le tableau 7.

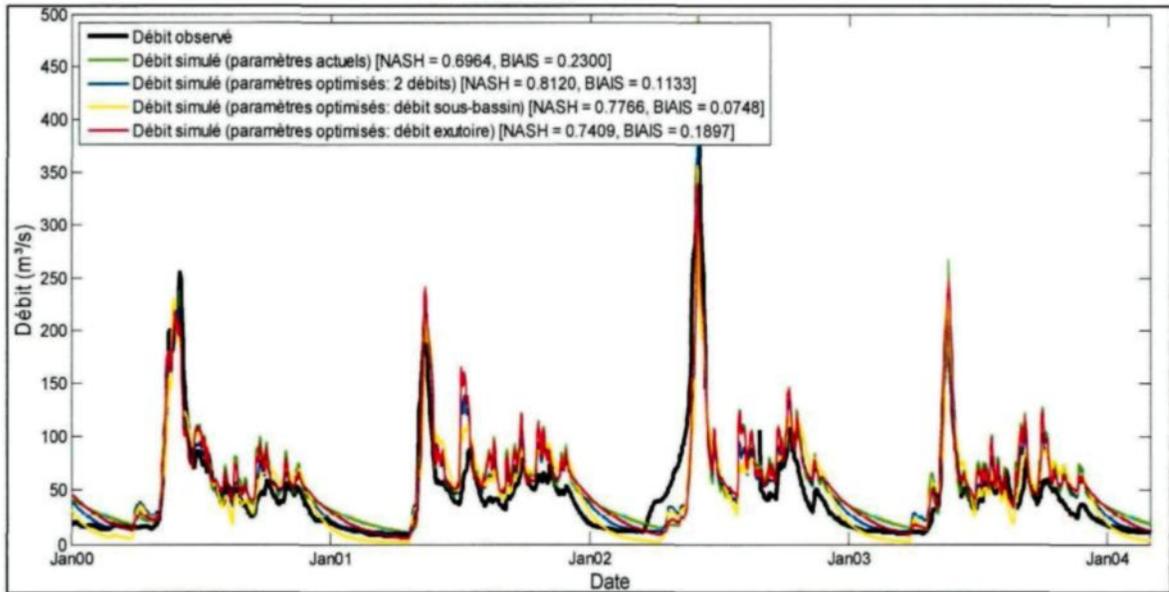


Figure 12 : Débits observés et simulés pour les différentes calibrations du sous-bassin amont Montagnes Blanches

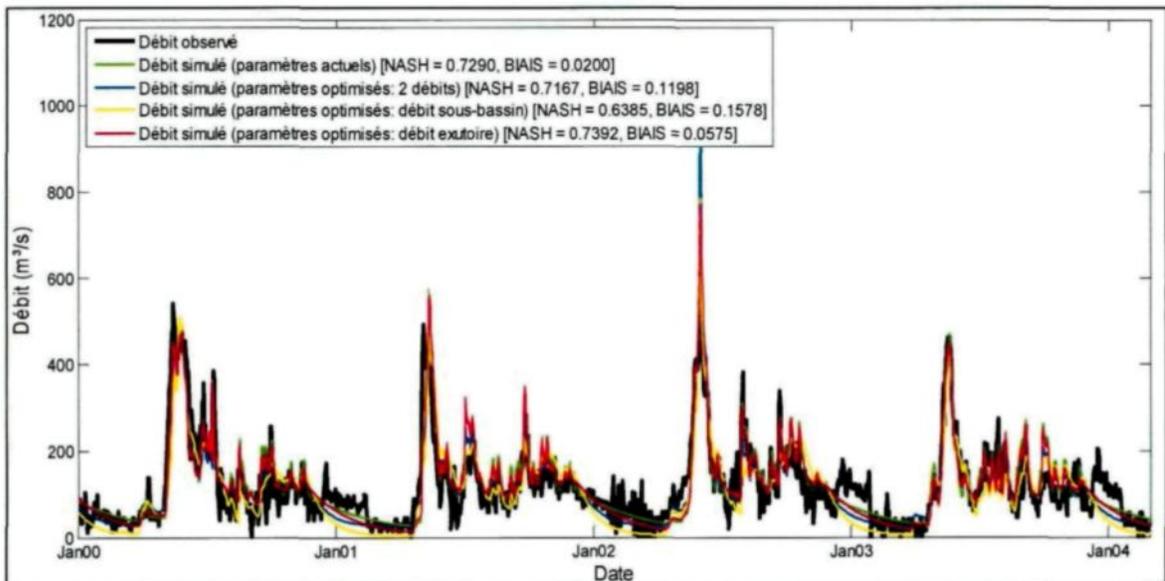


Figure 13 : Débits observés et simulés pour les différentes calibrations du sous-bassin aval (exutoire) Lac Manouane

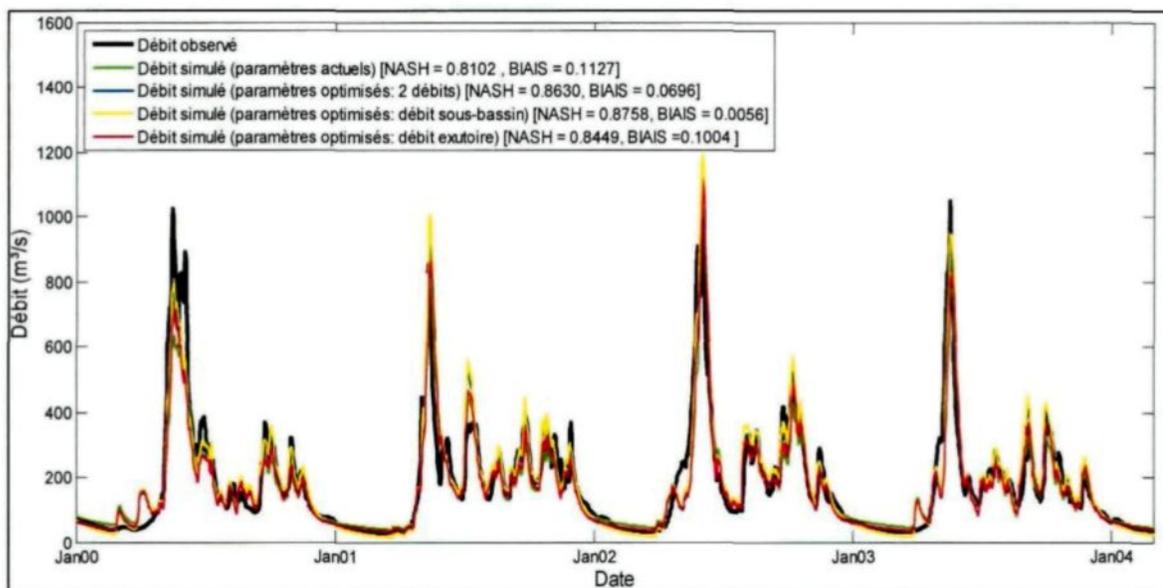


Figure 14 : Débits observés et simulés pour les différentes calibrations du sous-bassin amont Pérignonka

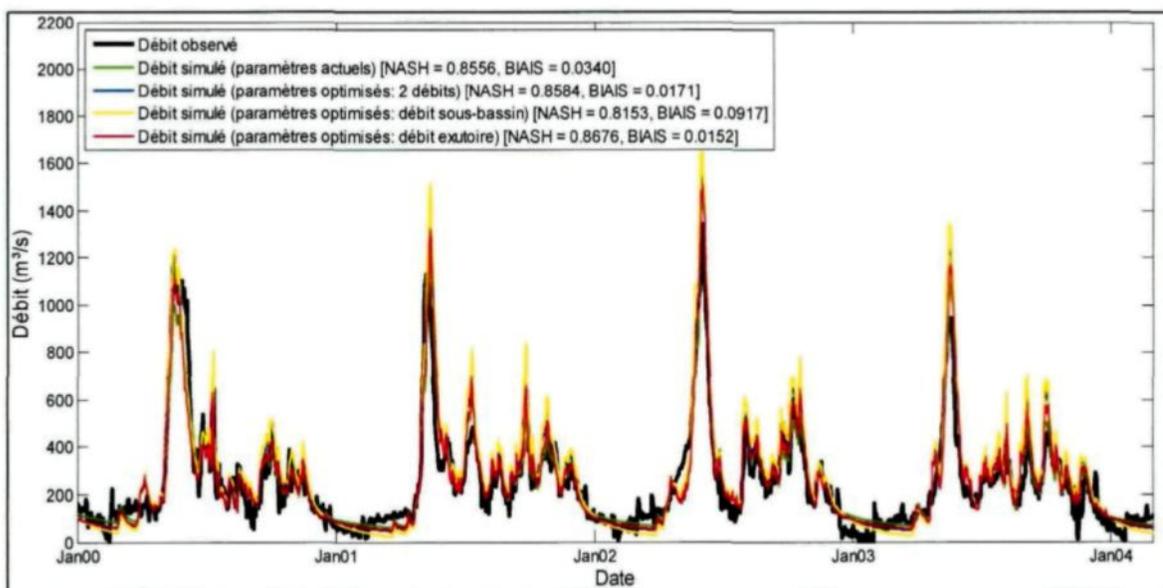


Figure 15 : Débits observés et simulés pour les différentes calibrations du sous-bassin aval (exutoire) Passes-Dangereuses

Tableau 6 : Tableau comparatif de la performance des trois calibrations selon le(s) débit(s) optimisé(s)

Sous-bassin	Débit(s) optimisé(s) lors de la calibration	NASH- SUTCLIFFE	BIAIS RELATIF
Montagnes Blanches (amont)	Paramètres actuels	0,6964	0,2300
	2 débits	0,8120	0,1133
	Sous-bassin	0,7766	0,0748
	Exutoire	0,7409	0,1897
Lac Manouane (aval)	Paramètres actuels	0,7290	0,0200
	2 débits	0,7167	0,1198
	Sous-bassin	0,6385	0,1578
	Exutoire	0,7392	0,0575
Péribonka (amont)	Paramètres actuels	0,8102	0,1127
	2 débits	0,8630	0,0696
	Sous-bassin	0,8758	0,0056
	Exutoire	0,8449	0,1004
Passes- Dangereuses (aval)	Paramètres actuels	0,8556	0,0340
	2 débits	0,8584	0,0171
	Sous-bassin	0,8153	0,0917
	Exutoire	0,8676	0,0152

Tableau 7 : Valeurs des paramètres optimisés pour les trois méthodes de calibration

Lac Manouane				
Description du paramètre	Paramètres actuels	Paramètres optimisés selon:		
		Les deux débits	Le débit à l'exutoire	Le débit au sous-bassin
Coefficient d'infiltration du réservoir SOL au réservoir NAPPE (CIN)	0.0827	0.0457	0.0813	0.5804
Coefficient de vidange du réservoir NAPPE, vidange basse (CVNB)	0.0112	0.0012	0.0010	0.0018
Coefficient de vidange du réservoir SOL, vidange basse (CVSB)	0.0036	0.0331	0.0178	0.0388
Coefficient de vidange du réservoir SOL, vidange intermédiaire (CVSI)	0.1137	0.0706	0.1153	0.4844
Seuil d'infiltration vers le réservoir NAPPE (HINF)	66.3336	17.3010	33.9741	146.8592
Seuil de vidange intermédiaire du réservoir SOL (HINT)	78.5866	55.5895	54.3304	141.2614
Seuil de vidange su réservoir NAPPE (HNAP)	126.1011	363.9810	12.0000	44.6655
Seuil de prélèvement de l'eau (évapotranspiration) à taux potentiel (HPOT)	200.0000	68.2276	124.3198	23.4031
Passes-Dangereuses				
Description du paramètre	Paramètres actuels	Paramètres optimisés selon:		
		Les deux débits	Le débit à l'exutoire	Le débit au sous-bassin
Coefficient d'infiltration du réservoir SOL au réservoir NAPPE (CIN)	0.1301	0.1853	0.1123	0.1675
Coefficient de vidange du réservoir NAPPE, vidange basse (CVNB)	0.0035	0.0004	0.0004	0.0004
Coefficient de vidange du réservoir SOL, vidange basse (CVSB)	0.0064	0.0089	0.0093	0.0205
Coefficient de vidange du réservoir SOL, vidange intermédiaire (CVSI)	0.1418	0.5073	0.2894	0.8276
Seuil d'infiltration vers le réservoir NAPPE (HINF)	74.7440	82.8819	70.1192	53.2413
Seuil de vidange intermédiaire du réservoir SOL (HINT)	83.9848	85.0019	78.0005	56.3165
Seuil de vidange su réservoir NAPPE (HNAP)	150.9812	766.1228	1628.2499	1520.1512
Seuil de prélèvement de l'eau (évapotranspiration) à taux potentiel (HPOT)	102.2960	118.1291	96.6206	86.1369

4.2 ANALYSE DES RÉSULTATS

Pour le premier bassin versant, on constate que la meilleure performance en termes de critère de Nash-Sutcliffe est obtenue en calibrant le modèle avec les deux débits pour Montagnes Blanches et en le calibrant avec le débit à l'exutoire pour Lac Manouane. Pour le deuxième bassin versant, la meilleure performance est obtenue en calibrant le modèle avec le débit du sous-bassin pour Péribonka et en le calibrant avec le débit à l'exutoire pour Passes-Dangereuses. De plus, la calibration du modèle avec le débit au sous-bassin uniquement détériore la performance à l'exutoire dans les deux cas. Cela porte à croire que le débit observé (ANC calculés par bilan hydrique) pourrait être erroné, puisque pour un même bassin versant (les deux sous-bassins possèdent en général les mêmes caractéristiques), les mêmes paramètres devraient donner des performances assez similaires pour la simulation de chacun des débits. Cependant, le coefficient de Nash-Sutcliffe à l'exutoire diminue de 0,1 et 0,05 entre la calibration avec le débit au sous-bassin et la calibration avec le débit à l'exutoire. On peut s'attendre à une diminution du coefficient de Nash-Sutcliffe à l'exutoire lorsqu'on calibre le modèle uniquement avec le débit au sous-bassin, mais l'importance de cette diminution laisse croire que les ANC sont parfois erronés.

De façon globale, on remarque que la calibration des deux débits semble l'option donnant les meilleurs résultats. D'un point de vue hydrologique, cette façon de faire est optimale puisque la modélisation représente mieux le cheminement de l'eau à l'intérieur du bassin versant complet. Le débit est mieux représenté sur l'ensemble du bassin versant, et

non pas uniquement à l'exutoire. Ainsi, il est préférable d'avoir une légère baisse de performance à chacun des sous-bassins, et de posséder une meilleure estimation des phénomènes d'échange et de cheminement de l'eau à l'intérieur du bassin versant. Cela permet d'avoir une meilleure confiance envers le modèle et ce dernier risque de mieux représenter de futurs événements qui pourraient diverger des conditions présentes lors de la calibration, comme des crues ou des étiages importants, puisque les paramètres sont optimisés de manière à bien représenter les cheminements de l'eau. Également, le débit du sous-bassin est plus précis puisqu'il provient d'une mesure en rivière, alors que le débit à l'exutoire provient d'un calcul par bilan hydrique (apports non-contrôlés). L'incertitude relative aux observations de débit (apports non-contrôlés) est particulièrement marquée sur la figure 13. Ainsi, il est donc préférable d'accorder une importance au débit du sous-bassin amont lors de la calibration afin d'obtenir des paramètres plus représentatifs du bassin versant, et donc anticiper une modélisation plus performante en prévision des débits.

De plus, c'est en optimisant les deux débits que l'on représente le mieux le débit en période hivernale pour les sous-bassins amonts, soit le débit qui a été corrigé par un facteur de correction (voir la section 3.2). Cela laisse donc croire que les paramètres ainsi optimisés sont mieux adaptés, notamment aux phénomènes d'échanges verticaux entre le sol et la nappe, puisque ce sont ces phénomènes qui interviennent en période de récession hivernale (débit de base).

CHAPITRE 5

CORRECTION DES APPORTS NON-CONTRÔLÉS (ANC)

Pour ce volet du projet, les courbes d'évacuation du déversoir Bonnard sont revues ainsi que la fonction de transfert à délai fixe présentement utilisée. Ces deux aspects sont présentés dans les sections qui suivent.

5.1 VALIDATION DU DÉBIT À BONNARD

5.1.1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

La première étape consiste à tracer les ANC à Lac Manouane et à Passes-Dangereuses afin de comprendre si les erreurs soupçonnées dans ces valeurs sont fonction du débit évacué à Bonnard. La figure 16 présente les ANC à Lac Manouane et à Passes-Dangereuses de même que le débit évacué à Bonnard. Pour des bassins versants possédant des caractéristiques de sol et d'occupation du territoire ainsi que des données météorologiques similaires, on peut s'attendre à ce que leurs apports non contrôlés soient proportionnels à leur superficie. Ainsi, pour les bassins versants Lac Manouane et Passes-Dangereuses, on peut s'attendre à ce que les ANC de Lac Manouane soit le l'ordre de 0.4 fois les ANC de Passes-Dangereuses (rapport de superficie). Cette valeur est une approximation générale et il est normal de ne pas toujours l'obtenir. Par contre, on peut s'attendre à ce que les ANC de Passes-Dangereuses soient toujours supérieurs à ceux de Lac Manouane vu leur superficie. Or, comme le montre la figure 16, cette proposition est

respectée la majorité du temps, sauf lorsqu'un débit important est évacué à Bonnard. Dans ce cas, les ANC à Passes-Dangereuses deviennent presque égaux à ceux de Lac Manouane, voir même inférieurs. On comprend alors que les erreurs dans les ANC semblent directement reliées à l'ouverture des vannes du déversoir Bonnard.

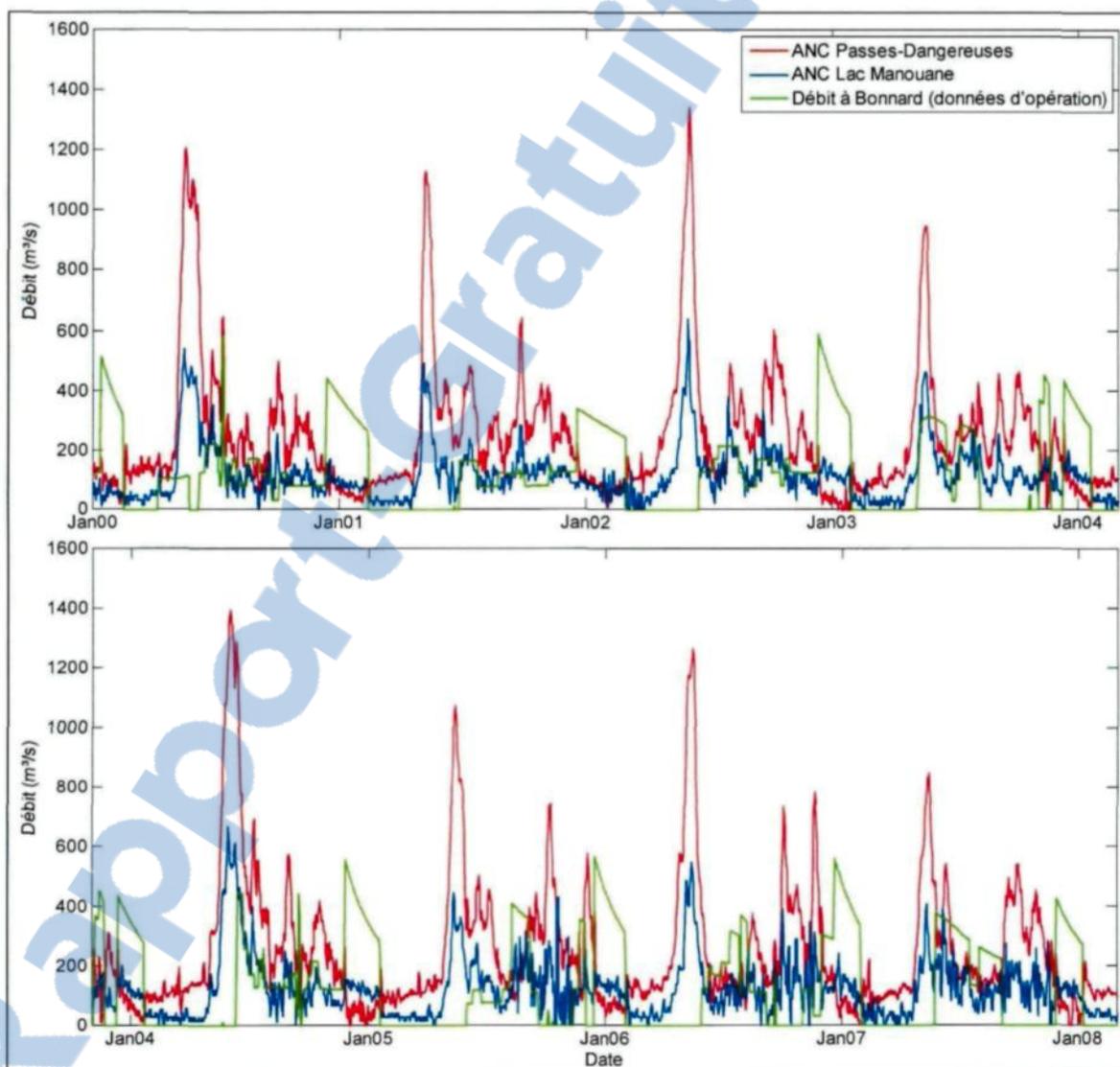


Figure 16 : Comparaison des ANC de Lac Manouane et Passes-Dangereuses par rapport au débit à Bonnard

La figure 17 montre les ANC et le débit simulé avec le modèle CEQUEAU à Lac Manouane. De plus, le débit évacué à Bonnard y est superposé. Le débit simulé avec le modèle CEQUEAU provient de l'étude précédente, c'est-à-dire que les paramètres du modèle ont été optimisés en utilisant à la fois le débit observé pour le sous-bassin amont et pour le sous-bassin aval (exutoire).

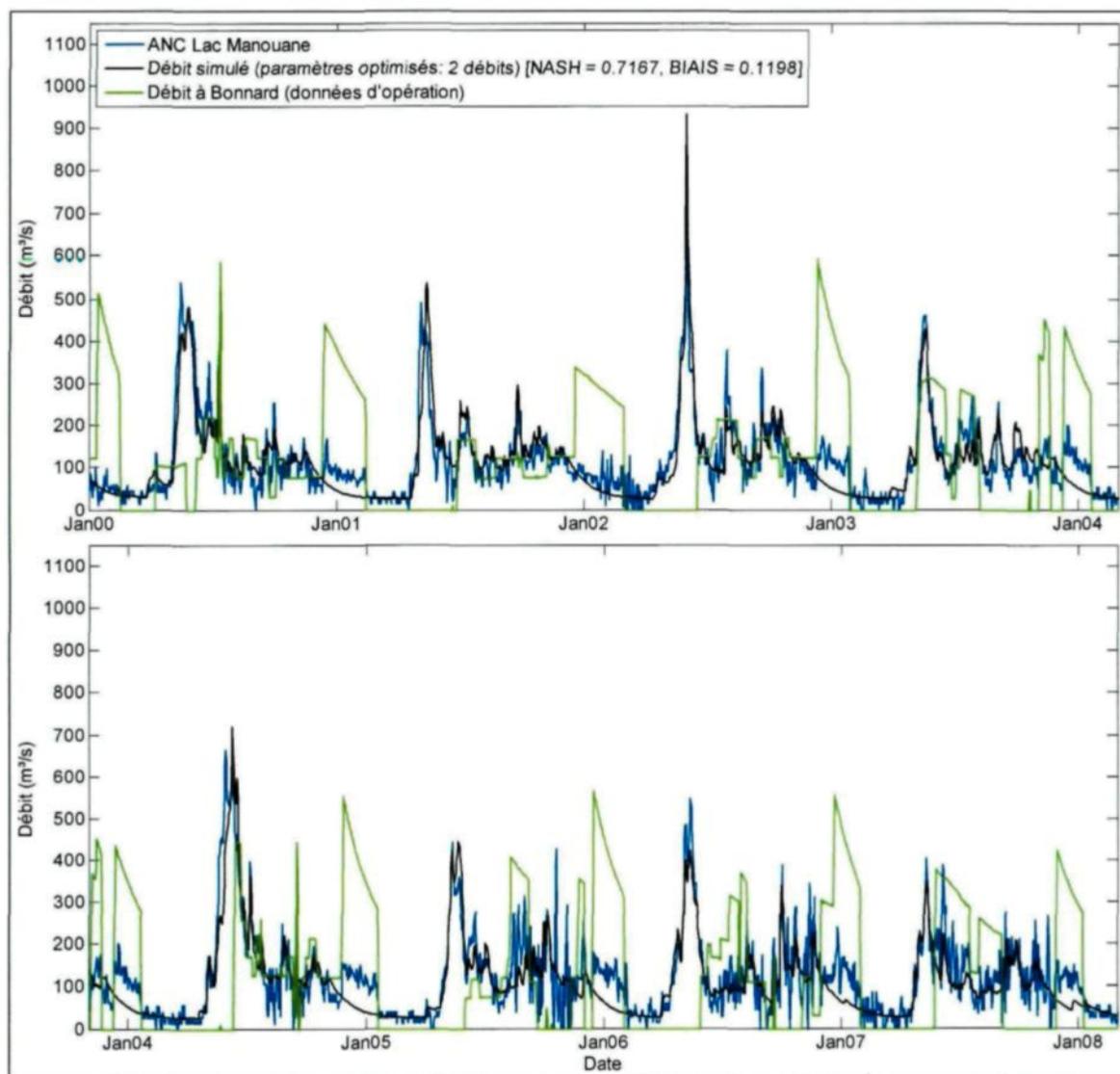


Figure 17 : Comparaison des ANC historiques et simulés (CEQUEAU) pour Lac Manouane par rapport au débit à Bonnard

En analysant la figure 17, on comprend que l'erreur dans les ANC, ou une partie importante de l'erreur, semble provenir davantage de la valeur du débit évacué à Bonnard que du délai de deux jours considéré pour le transfert de l'eau d'un réservoir à l'autre, puisque ce délai n'intervient pas dans le calcul des ANC à Lac Manouane. Il semble donc que les courbes d'évacuation du canal Bonnard soient erronées. Il est à noter que le débit évacué à Bonnard n'est pas directement mesuré. En effet, les courbes d'évacuation permettent de déterminer le débit évacué en fonction du niveau du lac Manouane et de la hauteur d'ouverture des vannes du déversoir. La figure 18 présente un exemple schématisé des courbes d'évacuation.

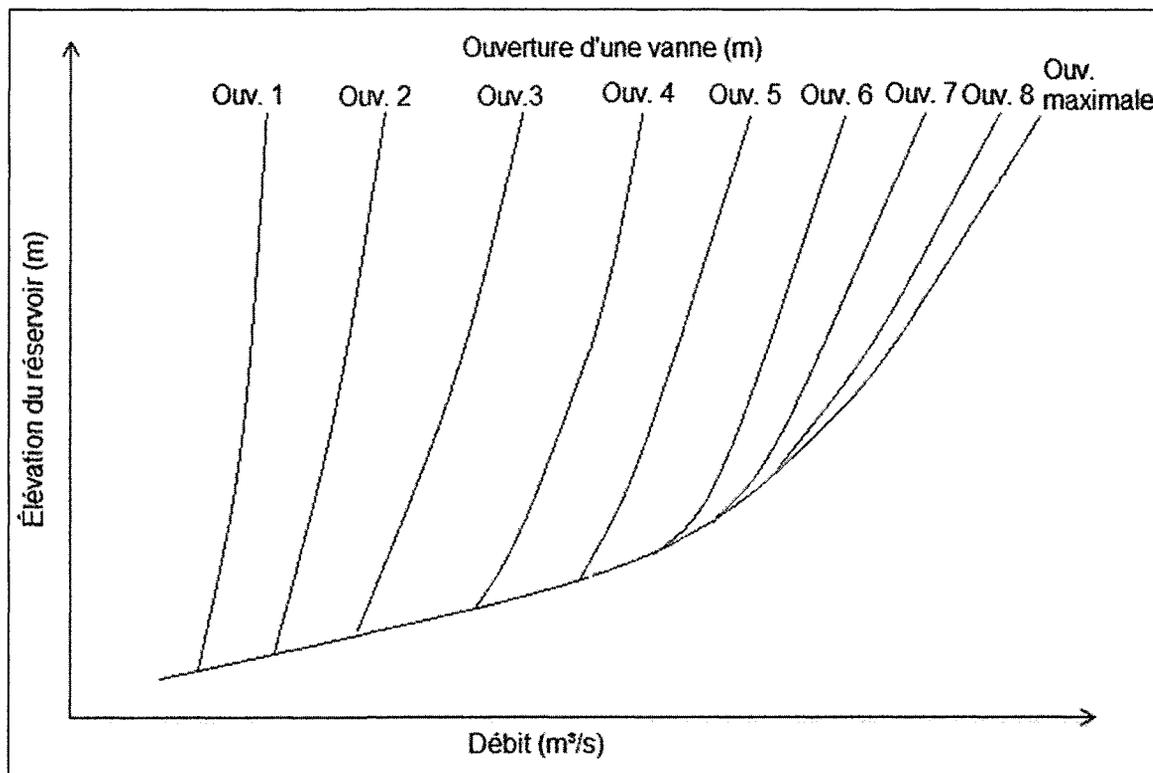


Figure 18 : Exemple schématisé des courbes d'évacuation du déversoir



Pour corriger le débit évacué à Bonnard, on propose d'utiliser la modélisation hydrologique avec CEQUEAU. Ainsi, tel que démontré au chapitre 4, la modélisation du bassin versant Lac Manouane est très bonne, notamment pour son sous-bassin Montagnes Blanches. De plus, la modélisation est bonne à l'exutoire lorsque le débit évacué à Bonnard est nul, comme le montre la figure 17. Puisqu'on fait confiance à cette modélisation pour le sous-bassin amont ainsi que pour l'exutoire lorsque le débit évacué à Bonnard est nul, on croit que la modélisation des apports est également bonne à l'exutoire lorsqu'il y a déversement d'eau à Bonnard. On considère donc le débit modélisé à Lac Manouane comme étant les ANC « réels » de ce même bassin. En se référant à l'équation 1, on calcule un nouveau débit à Bonnard, connaissant les niveaux du lac. Le nouveau débit calculé à Bonnard est appelé « débit à Bonnard calculé par modélisation » pour la suite du document. La figure 19 présente le débit à Bonnard calculé par modélisation par rapport au débit à Bonnard provenant des données d'opération. Il est à noter que pour le débit à Bonnard calculé par modélisation, les valeurs de débit nulles provenant des données d'opération ont été conservées, c'est-à-dire qu'on a imposé un débit nul au débit calculé par modélisation aux dates où le débit provenant des données d'opération était nul, puisqu'on connaît les moments où les vannes sont fermées et on sait alors que le débit évacué est nul.

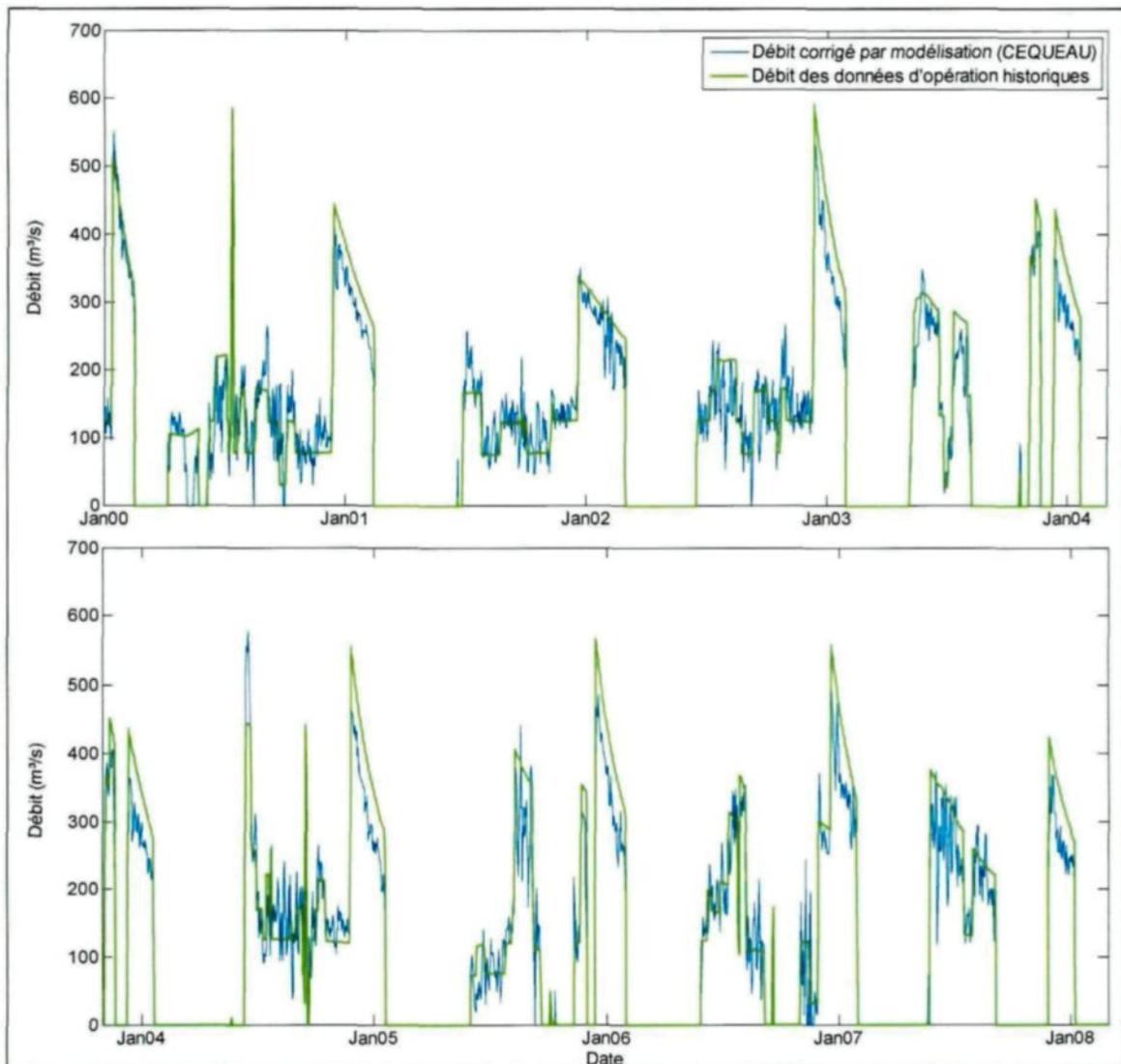


Figure 19 : Comparaison du débit à Bonnard des données d'opération et calculé par modélisation

En utilisant le débit à Bonnard calculé par modélisation, on peut recalculer les ANC à Passes-Dangereuses puisqu'on connaît les autres termes de l'équation 2. À cette étape, on conserve le délai de deux jours pour l'écoulement entre les deux réservoirs. La figure 20 présente les ANC à Passes-Dangereuses ainsi recalculés, que l'on superpose aux ANC des données d'opération et au débit simulé par CEQUEAU. La figure 21 présente le nouveau

pourcentage des ANC amont à Passes-Dangereuses. Les données utilisées dans ce calcul du pourcentage des ANC à Passes-Dangereuses sur les ANC amont totaux sont les valeurs recalculées pour Passes-Dangereuses et les valeurs modélisées par CEQUEAU pour les ANC à Lac Manouane (se référer à l'équation 3 pour le calcul).

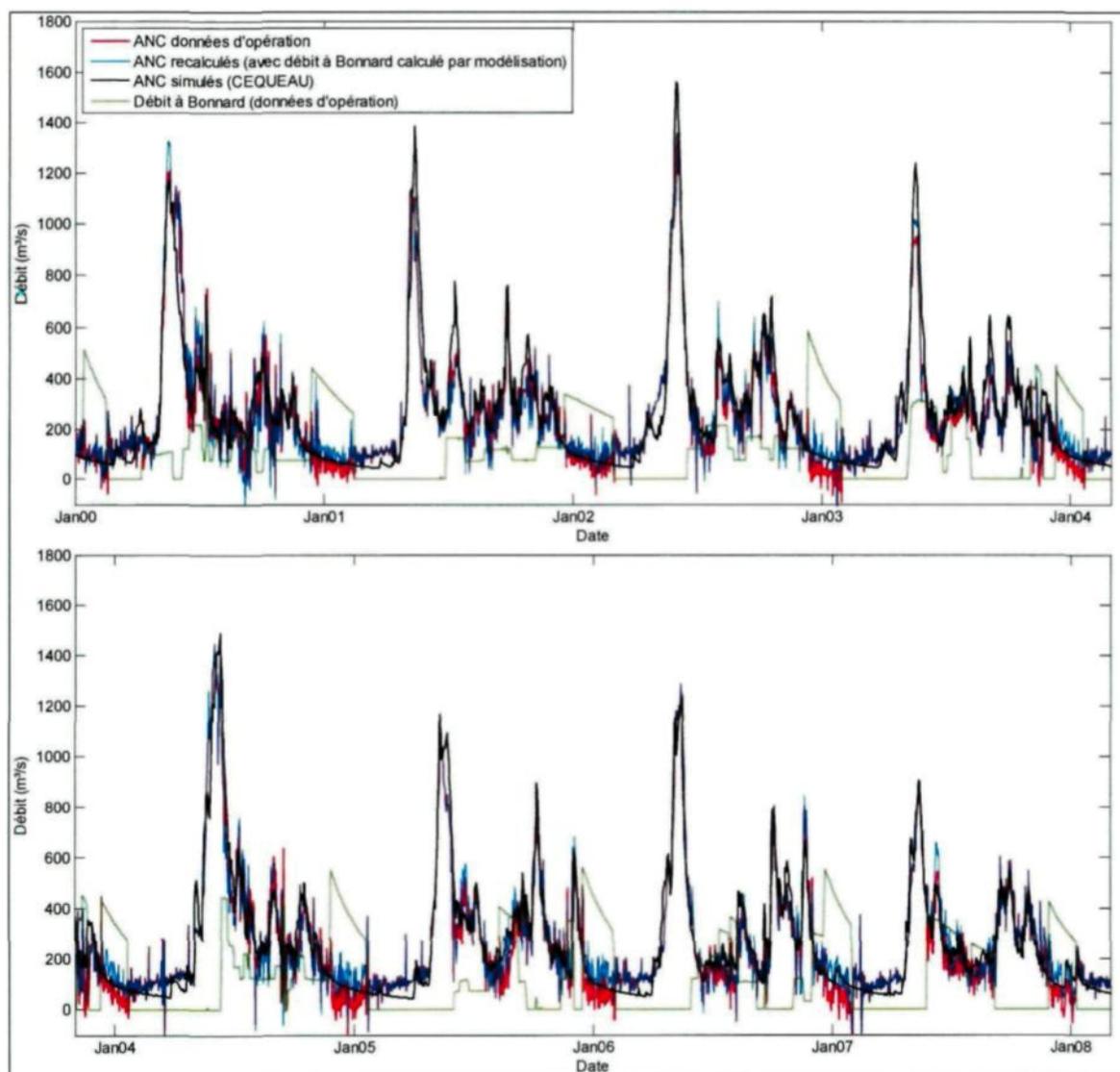


Figure 20 : Comparaison des ANC à Passes-Dangereuses historiques et recalculés avec le débit à Bonnard calculé par modélisation

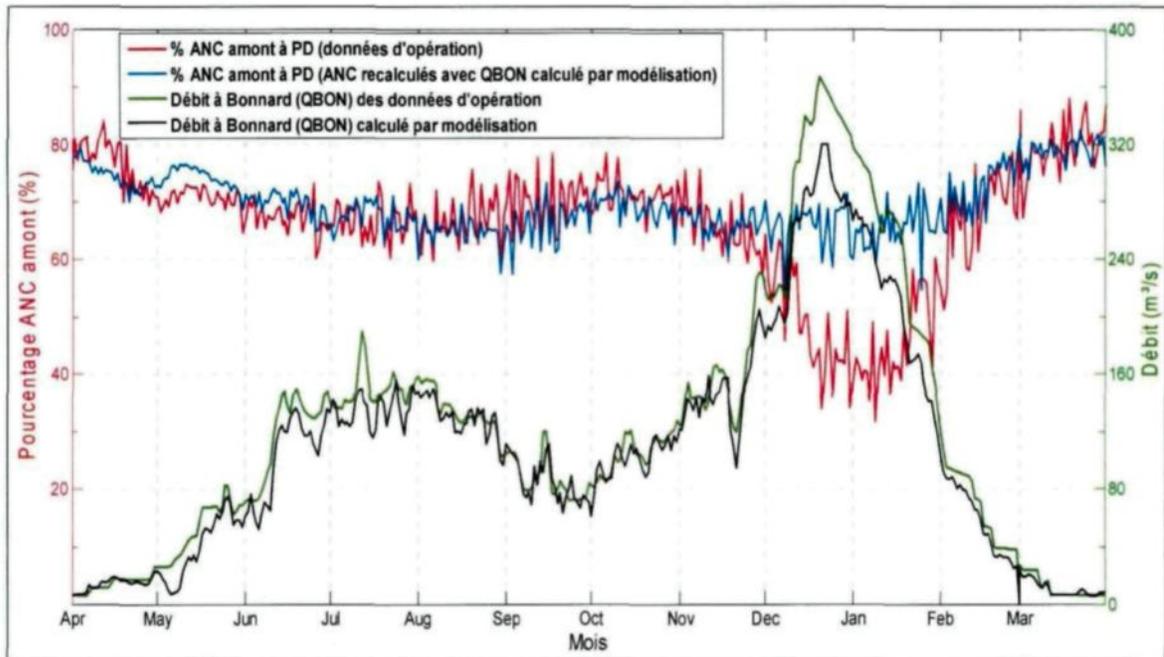


Figure 21 : Pourcentage des apports non contrôlés amonts à Passes-Dangereuses (données d'opération et recalculés) par rapport au débit évacué à Bonnard (Moyenne de 1995 à 2012)

5.1.2 ANALYSE DES RÉSULTATS

En observant la figure 20, on constate que les ANC des données d'opération chutent par rapport au débit simulé lorsque le débit à Bonnard est important, ce qui n'est pas le cas avec les ANC recalculés. En effet, les ANC recalculés demeurent plus près du débit simulé lorsque le débit à Bonnard est important. Sur la figure 21, on constate que les ANC recalculés pour Passes-Dangereuses avec le débit à Bonnard calculé par modélisation représentent environ 70% des ANC amont et ce pourcentage demeure à peu près constant tout au long de l'année. En effet, il n'y a plus de diminution dans le pourcentage des ANC à Passes-Dangereuses lorsque le déversoir de Bonnard est ouvert. Cela indique donc que la correction du débit à Bonnard améliore de façon considérable les valeurs des apports non-

contrôlés des bassins amonts. Cependant, le débit à Bonnard calculé par modélisation comporte beaucoup de petites fluctuations comparativement au débit provenant des données d'opération. De plus, la correction semble avoir une tendance générale, c'est-à-dire que les débits corrigés sont généralement inférieurs aux débits des données d'opération historiques. Ainsi, en traçant les débits calculés par modélisation en fonction des débits des données d'opération, on peut voir cette tendance et déterminer s'il est possible de corriger les débits de façon systématique. La figure 22 présente cette relation entre les débits calculés par modélisation (y) et les débits des données d'opération (x). Sur cette figure, la relation $y = x$ est tracée, ce qui représente une situation idéale, où aucune correction ne serait nécessaire. Or, on constate que le nuage de points est inférieur à cette relation. Une analyse est effectuée afin de déterminer une régression qui permettrait de représenter les débits calculés par modélisation selon les débits des données d'opération. Les régressions polynomiales et la régression linéaire sont étudiées de même que la possibilité d'avoir deux droites, c'est-à-dire une régression linéaire qui serait différente pour deux groupes de débits, mais ayant la même valeur au point de jonction des deux droites. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 8 et la meilleure solution pour chaque groupe de régressions est présentée sur la figure 22. Le critère retenu pour l'analyse de performance des différentes méthodes est la somme des erreurs au carré. Il est à noter que les valeurs correspondant à un débit de $0 \text{ m}^3/\text{s}$ ont été enlevées pour la détermination de la régression, car ces valeurs sont très nombreuses et influencent de façon trop importante la régression. Il est aussi à noter que les valeurs de débits corrigées sont imposées à $0 \text{ m}^3/\text{s}$ lorsque les données d'opération historiques sont de $0 \text{ m}^3/\text{s}$.

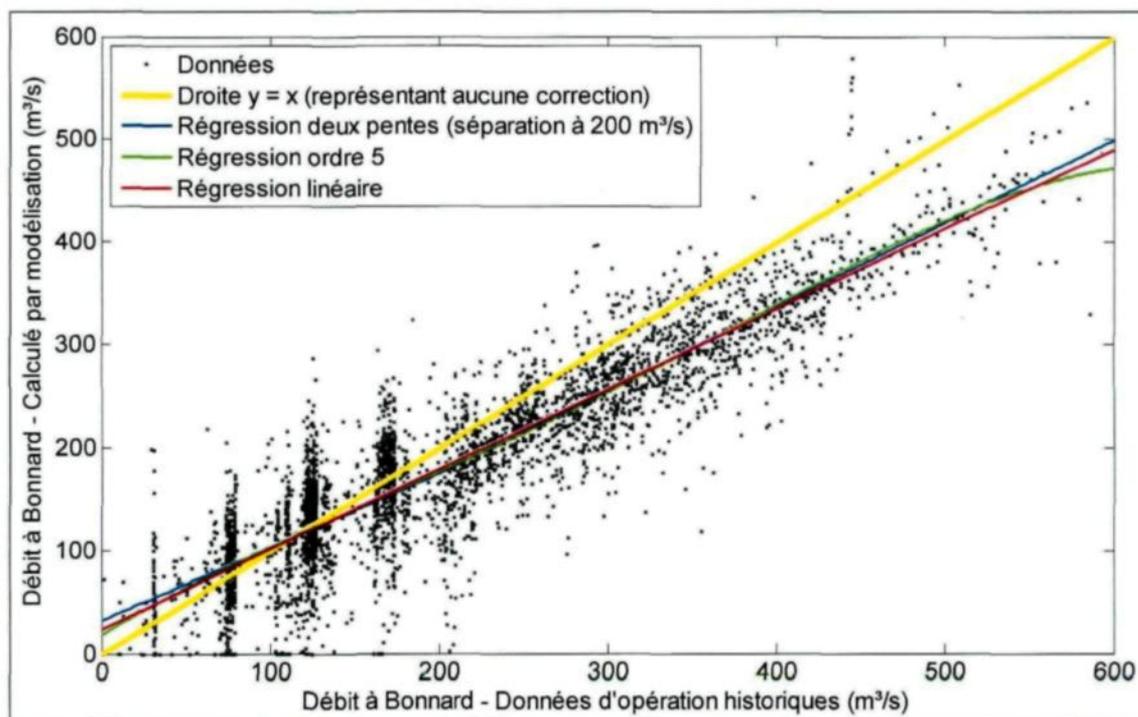


Figure 22 : Débits calculés par modélisation en fonction des débits des données d'opération

Tableau 8 : Performance des différentes régressions analysées pour corriger le débit à Bonnard

		Σ Erreurs au carré
Régressions polynomiales	Régression ordre 2	6.8367E+06
	Régression ordre 3	6.8366E+06
	Régression ordre 4	6.8213E+06
	Régression ordre 5	6.8212E+06
Deux droites $\left\{ \begin{array}{l} y_1 = a_1x + b_1 \quad 0 \leq x \leq C \\ y_2 = a_2x + b_2 \quad C \leq x \leq Q_{\max} \end{array} \right\}$ Avec C : point de coupure variable par intervalle de 50 m ³ /s	50 m ³ /s	6.8507E+06
	100 m ³ /s	6.8509E+06
	150 m ³ /s	6.8482E+06
	200 m³/s	6.8235E+06
	250 m ³ /s	6.8295E+06
	300 m ³ /s	6.8373E+06
	350 m ³ /s	6.8409E+06
	400 m ³ /s	6.8399E+06
	450 m ³ /s	6.8505E+06
	500 m ³ /s	6.8510E+06
550 m ³ /s	6.8496E+06	
Régression linéaire		6.8516E+06

Sur la figure 22, on voit que la meilleure régression polynomiale, soit celle d'ordre 5, que la meilleure régression à deux droites, soit celle où les débits sont séparés à 200 m³/s, et que la régression linéaire classique, c'est-à-dire à une seule droite, sont très semblables. À la suite de cette analyse, la solution retenue est la régression linéaire valide pour tous les débits, telle que présentée à l'équation 7. En effet, les autres types de régressions ne fournissent que de légères améliorations de performance, qui ne justifient pas l'augmentation de la complexité de la régression. De plus, la différence sur les valeurs de débits corrigées ne serait pas perceptible, car trop faible.

$$y = ax + b$$

Équation 7

avec

y = Débit à Bonnard corrigé par régression linéaire

x = Débit à Bonnard des données d'opération historiques

a = 0.7779

b = 24.1

La figure 23 présente la comparaison entre les débits à Bonnard calculés par modélisation, corrigés par régression linéaire et provenant des données d'opération. On constate que la correction des débits par régression linéaire permet de retrouver les débits calculés par modélisation pour la grande majorité de la période étudiée, mais avec un débit beaucoup plus constant.

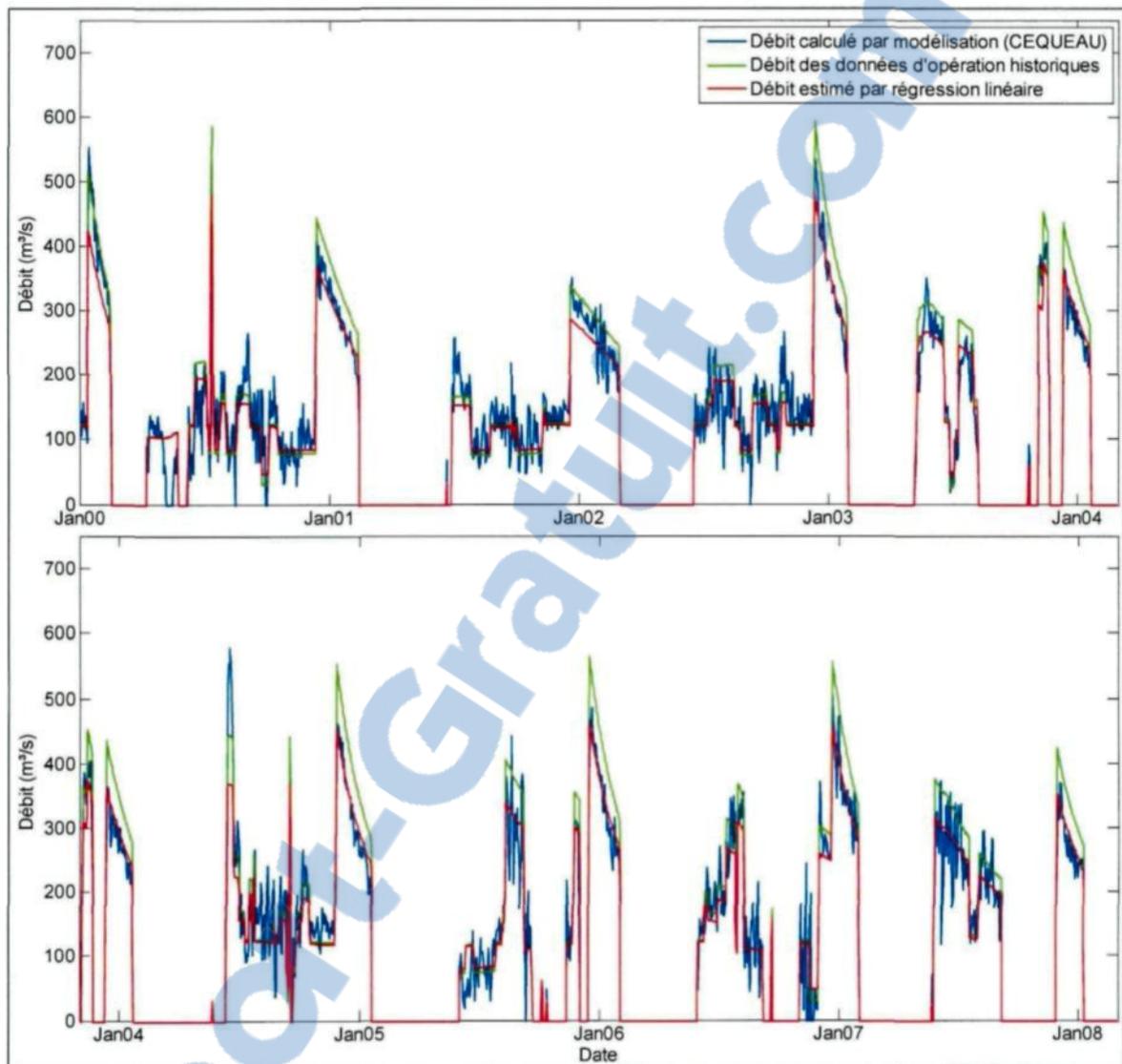


Figure 23 : Comparaison du débit à Bonnard calculé par modélisation, corrigé par régression linéaire et provenant des données d'opération

5.2 FONCTION DE TRANSFERT DE DÉBIT ENTRE LAC MANOUANE ET PASSES-DANGEREUSES

5.2.1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Tel que mentionné dans la méthodologie, il est proposé de comparer la fonction de transfert à délai fixe de deux jours à un transfert de débit modélisé à l'intérieur du modèle hydrologique CEQUEAU. Ainsi, au carreau partiel où est située l'arrivée de débit du canal Bonnard dans le bassin Passes-Dangereuses, un barrage est modélisé avec les débits évacués à Bonnard corrigés comme intrant. Alors, pendant la simulation, ce débit est ajouté au débit du carreau partiel et son cheminement est modélisé par CEQUEAU jusqu'au carreau partiel de l'exutoire. Pour faire cette simulation, ce sont les paramètres actuellement en opération chez RTA qui ont été utilisés. Cette option a été choisie afin de mener deux études indépendantes pour que l'on puisse utiliser les conclusions de l'une ou l'autre pour la mise en opération. Il est également à noter qu'il reste du travail à faire au niveau de la 1^{ère} étude pour la détermination des paramètres du modèle CEQUEAU qui seront en opération au sein de l'entreprise. Les apports ainsi simulés par CEQUEAU avec le barrage sont comparés aux apports simulés sans barrage (sans intrant de débit) additionnés du débit évacué à Bonnard deux jours plus tôt. Ceux-ci sont également comparés aux apports observés. Ces résultats sont présentés sur les figures 24 et 25 pour les deux séries de débit à Bonnard, soient les débits calculés par modélisation et corrigés par régression linéaire.

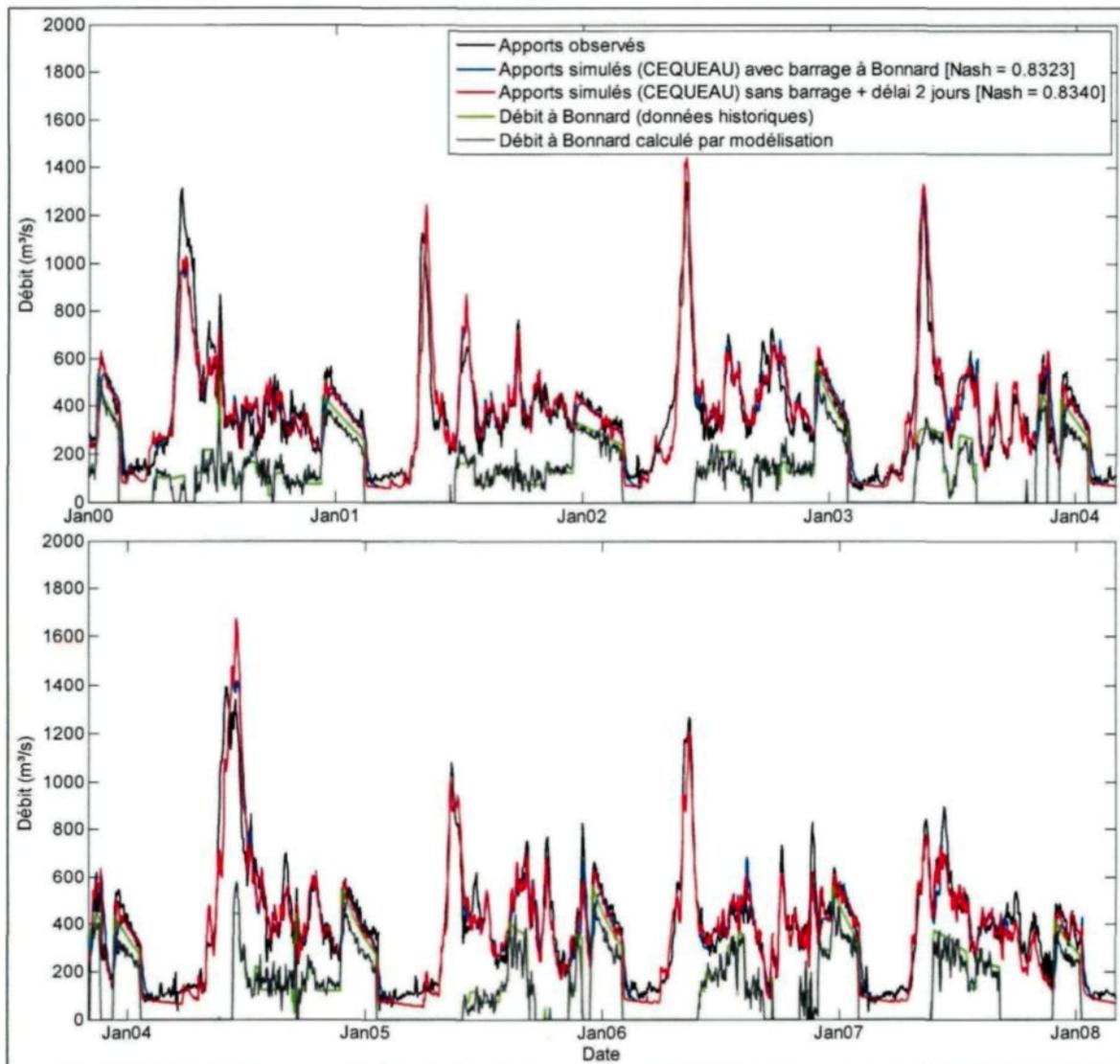


Figure 24 : Comparaison des apports à Passes-Dangereuses selon la méthode utilisée pour le transfert de débit entre Lac Manouane et Passes-Dangereuses avec le débit à Bonnard calculé par modélisation

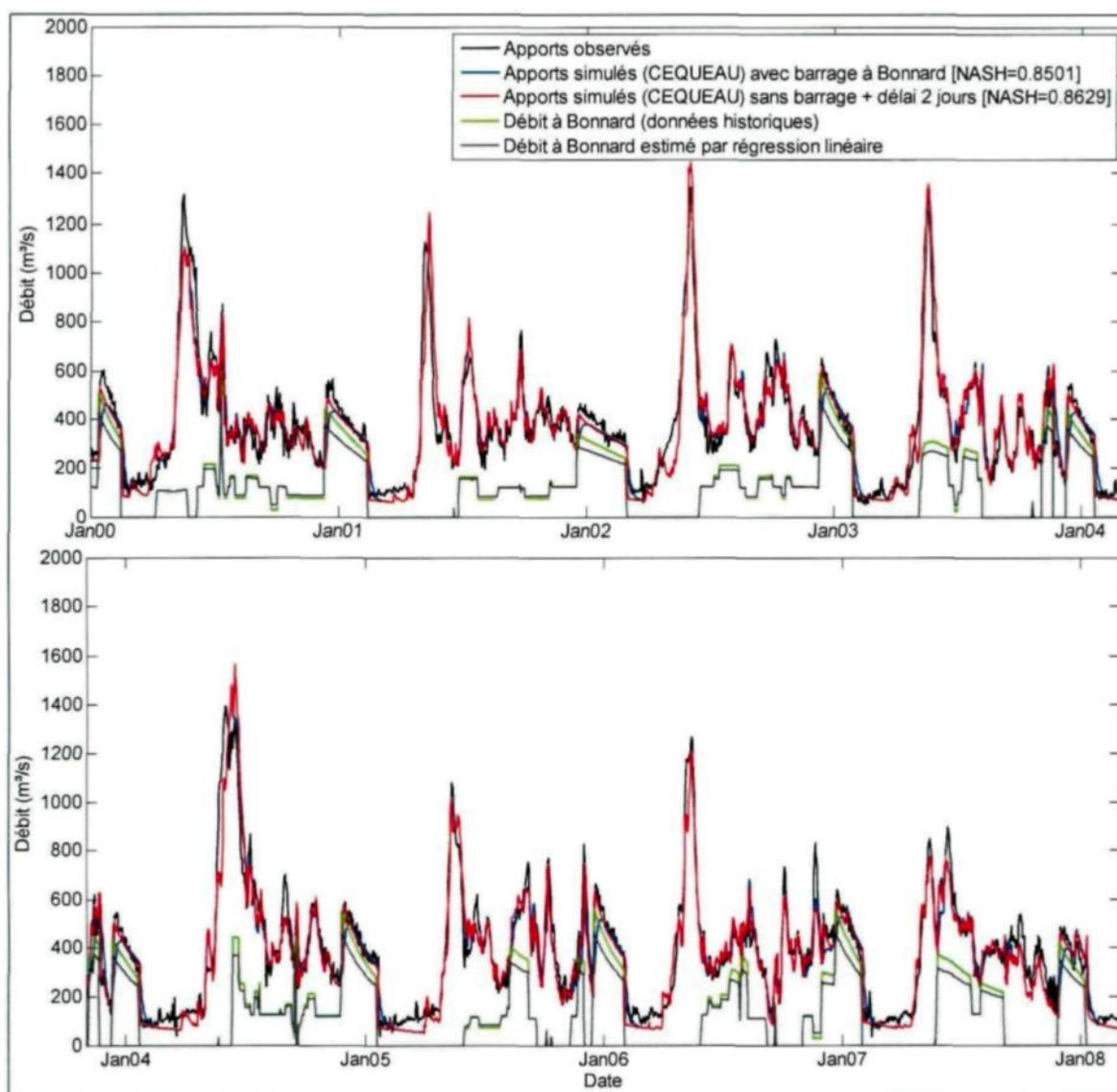


Figure 25 : Comparaison des apports à Passes-Dangereuses selon la méthode utilisée pour le transfert de débit entre Lac Manouane et Passes-Dangereuses avec le débit à Bonnard estimé par régression linéaire

5.2.2 ANALYSE DES RÉSULTATS

Suite à ces modélisations, on constate que la fonction de transfert à délai fixe de deux jours permet de mieux représenter les apports. En effet, lors de l'augmentation du débit évacué à Bonnard, le modèle CEQUEAU avec barrage, et donc avec cheminement à

l'intérieur du modèle, ne modélise pas bien la pointe de débit qui se produit dans les apports observés. Il est donc possible de croire que le modèle lamine trop les débits. Le même problème survient lors de la fermeture des vannes, c'est-à-dire que les apports modélisés avec un barrage dans CEQUEAU ne diminuent pas assez rapidement. La réponse aux variations de débits en provenance de Bonnard semble trop lente lorsque le cheminement est modélisé à l'intérieur du modèle CEQUEAU.

De plus, en comparant les performances obtenues en termes de critère de Nash-Sutcliffe pour les simulations représentées aux figures 24 et 25, on constate que la méthode de correction des débits par régression linéaire donne de meilleurs résultats en simulation des apports. En effet, pour la prévision des apports avec fonction de transfert à délai fixe de deux jours, la valeur du coefficient de Nash-Sutcliffe passe de 0,8340 à 0,8629. Il serait donc concluant d'utiliser la régression linéaire pour corriger les débits évacués à Bonnard.

CONCLUSION

Ce projet avait pour objectif de réduire l'incertitude sur la prévision des apports d'eau aux réservoirs amonts. Cela a été réalisé en travaillant sur divers aspects de la modélisation hydrologique des bassins amonts.

Tout d'abord, une étude a été réalisée sur la méthode à employer pour corriger les débits en rivière en période hivernale. La méthode ayant donné les meilleurs résultats pour la majorité des bassins versants utilisés, dont les deux bassins versants de la présente étude, consiste à corriger les débits en utilisant un facteur de correction (en pourcentage), défini à partir de quelques années déjà corrigées. Il est à noter que la modélisation avec HSAMI a donné de bons résultats pour certains bassins versants. De plus, pour le volet sur la modélisation d'un bassin versant en deux sous-bassins, l'étude a permis de démontrer qu'il était préférable de calibrer les paramètres en utilisant à la fois le débit à l'exutoire et le débit au sous-bassin. Cette façon de faire permet d'améliorer la performance, mesurée par le critère de Nash-Sutcliffe et par le biais relatif, par rapport aux paramètres actuellement en opération. Cette façon de faire permet aussi de mieux représenter les divers phénomènes régissant l'écoulement de l'eau dans le bassin versant.

Quant au volet concernant les apports non-contrôlés, il a été démontré que l'erreur sur la prévision de ceux-ci provenait majoritairement de la valeur du débit évacué au déversoir Bonnard. En effet, les courbes d'évacuation, permettant de connaître le débit en fonction de la hauteur d'ouverture des vannes et du niveau du lac Manouane, seraient erronées pour l'ensemble des débits, mais de façon plus marquée pour les débits importants. Cela a été démontré en utilisant la modélisation hydrologique (prévision des ANC à Lac Manouane) pour recalculer les valeurs du débit évacué à Bonnard. Ainsi, il faudrait utiliser la régression linéaire pour corriger le débit provenant des courbes d'évacuation afin d'obtenir le débit réellement évacué. En faisant cela, on retrouve des ANC à Passes-Dangereuses de l'ordre de ceux prévus par le modèle hydrologique pour ce bassin. Au niveau de la fonction de transfert de débit entre Lac Manouane et Passes-Dangereuses, on conclut que la méthode actuellement utilisée, soit de considérer un délai fixe de deux jours pour le temps de parcours entre l'évacuateur de Bonnard (à l'exutoire de Lac Manouane) et le réservoir Passes-Dangereuses est la meilleure méthode pour la prévision des ANC. En effet, on a comparé cette méthode à un cheminement de débit intégré à l'intérieur de la modélisation avec CEQUEAU, mais cette méthode donne de moins bons résultats que le délai de deux jours pour les quelques jours suivants l'ouverture ou la fermeture des vannes. Cependant, pour le reste de la période où les vannes sont ouvertes, les deux méthodes donnent des résultats similaires.

La prévision des apports comporte beaucoup d'incertitude. Or, on a vu dans ce projet qu'il y a également des sources d'erreurs dans les données dites « observées », notamment pour le débit évacué à Bonnard. En effet, les courbes d'évacuation de Bonnard comporteraient un biais systématique et il faudrait apporter une correction à ces courbes. Après avoir éliminé cette source d'erreur, il resterait tout de même des sources d'incertitudes au niveau des mesures, par exemple le niveau du lac, au niveau du transfert de débit entre lac Manouane et Passes-Dangereuses et au niveau de la modélisation hydrologique. Cependant, on peut réduire l'incertitude sur la modélisation en calibrant les paramètres sur les débits des deux sous-bassins versants (amont et aval), et en utilisant les apports non-contrôlés corrigés pour calibrer le modèle, c'est-à-dire les apports non-contrôlés qui ont été recalculés avec le débit à Bonnard corrigé.

Pour la suite des choses, on recommande donc de corriger les débits hivernaux dans les données historiques et futures de débit en rivière en utilisant un facteur de correction. De plus, on recommande de calibrer les paramètres du modèle CEQUEAU en optimisant le débit à l'exutoire et le débit du sous-bassin, tout en utilisant les ANC corrigés à Passes-Dangereuses et à Lac Manouane pour réaliser la calibration. Ainsi, on recommande donc aussi de corriger le débit à Bonnard des données historiques et des futures données en utilisant la régression linéaire. Cependant, si cela est possible, il serait intéressant de produire de nouvelles courbes d'évacuation à l'aide de mesures prises sur le terrain. L'utilisation du débit corrigé à Bonnard permettra d'avoir une meilleure prévision des apports aux bassins amonts. Il serait aussi bon de valider la valeur maximale de débit qu'il

est possible d'évacuer à Bonnard, pour une meilleure gestion, mais également pour des raisons de sécurité en cas de crues importantes. De façon globale, pour tout gestionnaire d'ouvrages hydrauliques, il serait important de s'assurer que les courbes d'évacuation des déversoirs soient toujours valides quelques années après leur réalisation pour effectuer une bonne gestion des réservoirs. Il est aussi important de vérifier que ces courbes soient valides pour toutes les périodes de l'année.

BIBLIOGRAPHIE

ABBOTT, M.B., BATHURST, J.C., CUNGE, J.A., O'CONNELL, P.E. et RASMUSSEN, J. (1986a). An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, 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 – Système Hydrologique Européen, SHE, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, 87(1-2), p.61-77.

ARNOLD, J.G., SRINIVASAN, R., MUTTIAH, R.S. et WILLIAMS, J.R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment - Part 1: Model development, *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), p.73-89.

ARSENAULT, R., POULIN, A., CÔTÉ, P. et BRISSETTE, F. (2013). A comparison of stochastic optimization algorithms in hydrological model calibration, *Journal of Hydrologic Engineering*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000938.

BAUDEZ, J.C., LOUMAGNE, C., MICHEL, C., PALAGOS, B., GOMENDY, V. et BARTOLI, F. (1999). Modélisation hydrologique et hétérogénéité spatiale des bassins : vers une comparaison de l'approche globale et de l'approche distribuée, *Étude et Gestion des Sols*, 6(4), p.165-184.

BERGSTRÖM, S. (1976). *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian Catchments*, SMHI Report, RHO No.7. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Sweden, 134p.

BEVEN, K. (2006). A manifesto for the equifinality thesis, *Journal of Hydrology*, 320(1-2), p.18-36.

BEVEN, K. et FREER, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty in mechanistic modeling of complex environmental systems using the GLUE methodology, *Journal of Hydrology*, 249(1-4), p.11– 29.

BEVEN, K.J. et KIRKBY, M.J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), p.43-69.

BISSON, J.-L. et ROBERGE F. (1983). *Prévisions des apports naturels : Expérience d'Hydro-Québec*. Compte-rendu de l'Atelier sur la prévision du débit, Toronto, Canada.

BOYLE, D.P., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., KOREN, V., ZHANG, Z.Y. et SMITH, M. (2001). Toward improved streamflow forecasts: Value of semidistributed modeling, *Water Resources Research*, 37(11), p.2749-2759.

CRAWFORD, N.H. et BURGESS, S.J. (2004). History of the Stanford Watershed Model, *Water Resources Impact*, 6(2), p.3-5.

CRAWFORD, N.H. et LINSLEY R.K. (1966). *Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV*. Technical Report No. 39, Department of Civil Engineering, Stanford University, 210p.

DAWDY, D.R. et O'DONNELL, T. (1965). Mathematical Models of Catchment Behaviour, *Journal of the Hydraulics Division*, 91(4), p.123-137.

DOOGE, J.C.I. (1959). A general theory of the unit hydrograph, *Journal of Geophysical Research*, 64(2), p.241-256.

FORTIN, J.-P., MOUSSA R., BOCQUILLON C. et VILLENEUVE J.-P. (1995). HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique, *Revue des Sciences de l'Eau*, 8(1), p.97-124.

FORTIN, J.-P., TURCOTTE R., MASSICOTTE S., MOUSSA R., FITZBACK J. et VILLENEUVE, J.-P. (2001). A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data, part I : Description of the model, *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineering, 6(2), p.91-99.

FORTIN, V. (2000). *Le modèle météo-apport HSAMI : historique, théorie et application*, Rapport de recherche (Révision 1.5), Institut de recherche d'Hydro-Québec, 68p.

HAMILTON, A.S., HUTCHINSON, D.G. et MOORE R.D. (2000). Estimating winter streamflow using conceptual streamflow model, *Journal of Cold Regions Engineering*, 14(4), p.158-175.

HANSEN, N. (2006). The CMA Evolution Strategy: A Comparing Review. In J.A. Lozano, P. Larrañaga, I. Inza and E. Bengoetxea (Eds.). *Towards a new evolutionary computation. Advances in estimation of distribution algorithms*. Springer, p.75-102.

HUTTUNEN, M., VEHVILAINEN, B. et UKKONEN, E. (1997). Neural networks in the ice-correction of discharge observations, *Nordic Hydrology*, 28(4-5), p.283-296.

LERAT, J., ANDREASSIAN, V., PERRIN, C., VAZE, J., PERRAUD, J.M., RIBSTEIN, P. et LOUMAGNE C. (2012). Do internal flow measurements improve the calibration of rainfall-runoff models?, *Water Resources Research*, 48(2), W02511, 18p.

LOUMAGNE, C., MICHEL, C., PALAGOS, B., BAUDEZ, J. C. et Bartoli, F. (1999). From a global to a semi-distributed approach in rainfall-runoff modelling, *La Houille Blanche*, 54(6), p.81-88.

MICHEL, C. (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre?, *La Houille Blanche*, 1, p.39-44.

MORIN G., FORTIN, J.P., LARDEAU J.P., SOCHANSKA W. et PAQUETTE, S. (1981). *Modèle CEQUEAU : manuel d'utilisation*, INRS-Eau, Rapport scientifique No 93, 449p.

MORIN, G., NZAKIMUENA T.-J. et SOCHANSKI, W. (1994). Prévision des températures de l'eau en rivières à l'aide d'un modèle conceptuel : le cas de la rivière Moisie, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21(1), p.63-75.

MORIN, G. et PAQUET, P. (2007). *Modèle hydrologique CEQUEAU*, INRS-ETE, rapport de recherche no R000926, 458p.

MORIN, G., SOCHANSKA, W. et PAQUET, P. (2002). *Modélisation hydrologique et prévision en temps réel des apports des bassins versants en amont de la centrale Shipshaw à l'aide du modèle CEQUEAU*, INRS-Eau, rapport de recherche no 611, 491p.

MORVAN, X. (2000). *Comparaison de deux approches de modélisation hydrologique : l'une globale, l'autre distribuée, en s'appuyant sur les données du bassin du Rhône*, Mémoire de DEA, Université Pierre et Marie Curie / Université Paris-Sud Orsay / ENSMP/ENGREF, 77p.

MULETA, M.K. (2012). Improving Model Performance Using Season-Based Evaluation, *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(1), p.191-200.

MULVANY, T.J. (1850). On the use of self-registering rain and flood gauges, *Proceedings – Institution of Civil Engineers*, 4(2), p.1-8.

NASH, J.-E. (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph, *International Association of Scientific Hydrology Publication*, 45(3), p.114-121.

NASH, J.-E. et SUTCLIFFE, J.-V. (1970). River flow forecasting through conceptual models : Part I : A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), p.282-290.

ODDOS, A. (2002). *Intérêt d'une approche semi-distribuée par rapport à une approche globale en modélisation pluie-débit*, DEA ULP Strasbourg, rapport Cemagref, 97p.

PLANTIER, M. (2003). *Prise en compte de caractéristiques physiques du bassin versant pour la comparaison des approches globale et semi-distribuée en modélisation pluie-débit*, DEA ULP Strasbourg, Cemagref, 93p.

QI, C. et GRUNWALD, S. (2005). GIS-Based Hydrologic Modeling in the Sandusky Watershed Using SWAT, *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineering*, 48(1), p.169-180.

QUENOUILLE, M. H. (1956). Notes on bias in estimation, *Biometrika*, 43(3-4), p.353-360.

REFSGAARD, J.C. et STORM, B. (1995). MIKE SHE (Chapitre 23). In : *Computer models of watershed hydrology*, Editions V.P. Singh, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA.

SANTHI, C., KANNAN, N., ARNOLD, J.G. et LUZIO, M. Di. (2008). Spatial calibration and temporal validation of flow for regional scale hydrologic modeling, *Journal of the American Water Resources Association*, 44(4), p.829-846.

SHERMAN, L.K. (1932). Streamflow from rainfall by the unit graph method, *Engineering News Record*, 108, p.501-505.

TUKEY, J. W. (1958). Bias and confidence in not quite large samples, *Annals of Mathematical Statistics*, 29(2), p.614.

TURCOTTE, R., FAVRE, A.-C., LACOMBE, P., POIRIER, C. et VILLENEUVE, J.-P. (2005). Estimation des débits sous glace dans le sud du Québec : comparaison de modèles neuronal et déterministe, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(6), p.1039-1050.