

---

# Impact des changements climatiques sur les volumes de crues fréquentielles

Bassins versants de la Côte-Nord du Québec  
RA-2012-0039-01

Préparé par :

par :

---

Nathalie Thiémonge, ing. 103422  
Hydro-Québec

---

Jacinthe Clavet-Gaumont, M.Sc.  
Ouranos

Et par :

---

James Merleau, Ph.D.  
IREQ

Avec la collaboration de :

Luc Perreault, Marie Minville, Catherine Guay et Marco Braun

Avril 2014



# Table des matières

<b>1.</b>	<b>Sommaire .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Glossaire .....</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>Remerciements .....</b>	<b>4</b>
<b>4.</b>	<b>Méthodologie .....</b>	<b>5</b>
<b>5.</b>	<b>Région d'étude .....</b>	<b>6</b>
<b>6.</b>	<b>Étalonnage du modèle hydrologique.....</b>	<b>7</b>
6.1	Données d'entrée.....	7
6.1.1	Apports naturels journaliers .....	7
6.1.2	Données météorologiques: précipitations et températures .....	9
6.1.3	Courbes hypsométriques .....	10
6.2	Méthode d'étalonnage .....	10
6.3	Analyse des résultats .....	12
6.3.1	Calcul du volume de crue printanière .....	12
<b>7.</b>	<b>Simulation des scénarios hydrologiques.....</b>	<b>19</b>
7.1	Données d'entrée.....	19
7.2	Génération des scénarios climatique par post-traitement des simulations climatique.....	20
7.3	Simulation des scénarios hydrologiques.....	20
7.4	Analyse des résultats .....	24
7.4.1	Comparaison entre les distributions volumes des périodes de référence et future.....	24
7.4.2	Influence de la méthode de calcul du volume .....	24
7.4.3	Influence du scénario de gaz à effet de serre .....	28
7.4.4	Influence de la résolution du modèle .....	29
7.4.5	Influence de la méthode de post-traitement .....	31
<b>8.</b>	<b>Analyse fréquentielle.....</b>	<b>32</b>
<b>9.</b>	<b>Conclusions .....</b>	<b>37</b>
<b>10.</b>	<b>Références .....</b>	<b>38</b>
<b>11.</b>	<b>Annexe.....</b>	<b>39</b>
11.1	Apports manquants .....	39
11.2	Étalonnage du modèle SSARR sur les bassins versants : Choix des paramétrisations .....	40
11.3	Débits observés et courbes enveloppe des scénarios hydrologiques en période de référence du 95 <sup>ème</sup> percentile et de l'ensemble des scénarios .....	48

11.3.1	Au Tonnerre .....	49
11.3.2	Godbout .....	50
11.3.3	Saint-Paul .....	51
11.3.4	Magpie.....	52
11.3.5	Natashquan .....	53
11.3.6	Moisie.....	54
11.3.7	Petit-Mécatina.....	55
11.3.8	Manic 5.....	56
11.4	Scénarios hydrologiques : Courbes enveloppes en période de référence (bleue) et en période future (rose).....	57
11.4.1	Au Tonnerre .....	58
11.4.2	Godbout .....	59
11.4.3	Saint-Paul .....	60
11.4.4	Magpie.....	61
11.4.5	Natashquan .....	62
11.4.6	Moisie.....	63
11.4.7	Petit-Mécatina.....	64
11.4.8	Manic 5.....	65
11.5	Comparaison de la médiane des volumes (référence et futurs) entre les différents scénarios de gaz à effet de serre (A2, A1B, B1) .....	66
11.5.1	Au Tonnerre .....	67
11.5.2	Saint-Paul .....	69
11.5.3	Magpie.....	70
11.5.4	Natashquan .....	71
11.5.5	Moisie.....	72
11.5.6	Petit-Mécatina.....	73
11.5.7	Manic 5.....	74
11.6	Comparaison de la médiane des volumes (référence et futurs) entre le MRCC (Modèle régional Canadien du Climat) piloté par le MCCG (Modèle Canadien de Circulation Général) et le MCCG. ....	75
11.6.1	Rivière Au Tonnerre.....	76
11.6.2	Rivière Godbout .....	77
11.6.3	Rivière St-Paul .....	78
11.6.4	Rivière Magpie .....	79
11.6.5	Rivière Natashquan .....	80
11.6.6	Rivière Moisie .....	81
11.6.7	Rivière Petit Mécatina .....	82
11.6.8	Rivière Manic-5.....	83
11.7	Lois d'ajustement choisies.....	84
11.8	Écart relatif entre les volumes de crue future et de référence (fut-ref/ref), pour une période de récurrence .....	86
11.8.1	2 ans.....	86
11.8.2	10 ans.....	87
11.8.3	20 ans.....	88
11.8.4	100 ans.....	89
11.8.5	1000 ans.....	90
11.8.6	10000 ans.....	91

11.9	Écart entre le volume futur et de référence pour les périodes de retour 2 ans, 20 ans et 100ans pour les scénarios hydrologiques simulés avec les scénarios du CGCM et du MRCC.....	92
11.9.1	2 ans .....	93
11.9.2	20 ans .....	96
11.9.3	100 ans .....	99

## Index des tableaux

Tableau 5-1: Liste des bassins versants de l'étude .....	6
Tableau 6-1: Liste des stations hydrométriques utilisées.....	8
Tableau 6-2: Statistiques descriptives de la météo observée .....	9
Tableau 6-3: Courbes hypsométriques.....	10
Tableau 6-4: Caractéristiques des crues printanières observées pour la méthode à durée fixe .....	13
Tableau 6-5 : Périodes d'étalonnage des bassins.....	18
Tableau 7-1 : Simulations climatiques utilisées.....	19
Tableau 7-2 : Abréviations pour les résultats .....	21
Tableau 7-3: test de Kolmogorov-Smirnov sur les distributions des volumes (durée variable) entre futur et référence .....	24
Tableau 8-1 : Lois d'ajustement choisies pour les volumes printaniers par bassins versant en période de référence et en période future.....	33
Tableau 8-2: Nombre de scénarios dont le volume futur dépasse le volume présent.....	34
Tableau 8-3 : Médiane des écarts relatifs entre le volume printanier futur et celui en période de référence avec scénarios appariés .....	36

## Index des figures

Figure 6-1: Position des stations hydrométriques .....	7
Figure 6-2: Illustration des périodes d'étalonnage .....	11
Figure 6-3: Écart relatif entre le volume printanier annuel calculé par la méthode à durée variable et la méthode à durée fixe .....	15
Figure 6-4: Comparaison annuelle entre le volume de crue printanière calculé par la méthode à durée fixe et par la méthode à durée variable .....	15
Figure 6-5: Choix de la paramétrisation du modèle.....	17
Figure 7-1 : Romaine : Observations et scénarios hydrologiques en période de référence (paramétrisation pour le calcul du volume par la méthode à durée variable).....	21
Figure 7-2 : Romaine : Scénarios hydrologiques en période de référence et en période future .....	23
Figure 7-3 Comparaison des volumes à durée variable (vert) avec les volumes à durée fixe (orange) pour la période de référence et la période future .....	26
Figure 7-4 Rivière Romaine : Comparaison du volume annuel médian en période de référence et en période future selon le scénario de gaz à effet de serre utilisé.....	29
Figure 7-5 : Rivière Romaine : Comparaison du volume médian en période de référence et en période future pour les simulations des modèles global et régional canadien.....	30
Figure 8-1: Écart relatif entre le volume printanier futur et présent pour le bassin Romaine .....	34
Figure 8-2 : Médiane des écarts relatifs entre le volume printanier futur et celui en période de référence avec scénarios appariés .....	35



---

# 1. Sommaire

Les structures de production hydroélectrique, d'évacuation des crues ou de dérivations provisoires sont, entre autre, dimensionnées pour respecter les grandeurs de crues statistiques. Les calculs des périodes de retour des crues, que ce soit les pointes ou les volumes, supposent la stationnarité des observations et l'hypothèse que cette stationnarité perdurera dans l'avenir. Des travaux de recherche montrent que la moyenne annuelle de certaines variables climatiques, tel que la température, n'est plus stationnaire. La modélisation hydrologique faite avec les scénarios climatiques futurs montrent que les événements hydrologiques qui en découlent ne le sont plus non plus. Cette hypothèse de stationnarité est non seulement nécessaire du point de vue des hypothèses statistiques mais elle l'est également pour le choix des grandeurs de dimensionnement. Le dimensionnement des ouvrages hydrauliques établi aujourd'hui pour une construction future ne tient pas compte de ces modifications hydrologiques anticipées s'il est fait avec les apports historiques.

La génération de scénarios hydrologiques futurs permet de vérifier s'il y a modification des grandeurs de pointes et de volume de crues. L'utilisation des scénarios de températures et de précipitations calculés par les modèles de climat utilisés pour alimenter un modèle hydrologique peut nous aider à mieux cerner ces éventuels changements et peut être à les quantifier. Plusieurs scénarios hydrologiques sont produits, pour tenir compte de l'incertitude induite par les modèles de climat et par les hypothèses d'augmentation de concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère et aussi pour tenir compte des incertitudes induites par le modèle hydrologique.

---

## 2. Glossaire

**MCG:** Modèle climatique global (aussi modèle de circulation générale): Comme leur nom l'indique, la grille de calcul des MCG offre une couverture globale c'est-à-dire de la planète entière. Les MCG furent les tout premiers modèles physiques de climat ; ils ne comprenaient à l'époque que la partie atmosphérique du système climatique et ses interactions avec la surface terrestre continentale. Ce genre de MCG est appelé aujourd'hui modèle de circulation générale atmosphérique (MCGA). Ces derniers, lorsqu'utilisés en mode couplé avec des modèles physiques océaniques deviennent des modèles de circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO) et constituent la seconde génération de MCG, en opération depuis plusieurs années. Les MCG de troisièmes générations, utilisées depuis peu, sont des « Earth system model » (ESM). Il s'agit de MCGAO auxquels s'ajoutent les interactions et cycles biogéochimiques. Le cycle du carbone est le seul qui est présentement implanté dans la plupart des modèles. Les recherches s'intensifient afin d'en inclure plusieurs autres. Les ESM sont les tout premiers modèles climatiques pouvant inclure des organismes vivants dans le système climatique (Coté, 2012).

**MRC:** Modèle régional de climat: Lorsque le domaine ne couvre qu'une sous-région de la planète, on a affaire à un modèle régional de climat (MRC) à aire limitée. En focalisant sur une partie du globe, l'utilisation de ce type de modèle à aire limitée permet de raffiner la résolution horizontale des simulations climatiques sur une région d'intérêt pour un temps de calcul moindre comparativement à ce que requiert un modèle global de même résolution. Pour rester en lien avec le climat planétaire, les frontières du domaine d'intégration d'un MRC doivent être alimentées par des données climatiques globales provenant d'un MCG ou de réanalyses. Cette procédure s'appelle le pilotage du modèle régional de climat (Coté, 2012).

**Scénario d'émission SRES:** Représentation plausible de l'évolution future des émissions de substances susceptibles d'avoir des effets radiatifs (gaz à effet de serre, aérosols, par exemple), fondée sur un ensemble cohérent et homogène d'hypothèses relatives aux éléments moteurs (évolution démographique et socio-économique, progrès technologique, etc.) et à leurs interactions principales. Les *scénarios de concentration*, découlant des scénarios d'émissions, servent d'entrées dans les modèles climatiques pour le calcul des projections climatiques (GIEC, 2007)

**Méthode de post-traitement:** Transformation apportée aux variables des simulations climatiques dans le but de corriger le biais entre elles et les observations. Les méthodes sont décrites à la section 7.2. **Il existe deux catégories de méthode de post-traitement (Chen et al., 2013?): la première nommée méthode des perturbations (daily translation) consiste à transformer les observations en leur ajoutant la différence entre la simulation future et celle de référence. La seconde nommée méthode de correction de biais (daily scaling) des variables consiste à enlever le biais existant entre les observations et la simulation en période de référence. La distinction principale entre les deux méthodes est qu'avec la perturbation des observations, on remplace en quelque sorte les simulations de la période de référence par les observations. Ainsi, peu importe le nombre de simulations climatiques utilisé, il n'existe qu'une seule réalisation de l'état de référence. En corrigeant le biais de la série simulée on dispose aussi d'autant de réalisation en période de référence qu'en période future. Le biais observé entre les observations et la simulation de référence**

---

est reporté sans modification au futur. Une sous-méthode de correction de biais nommée LOCI (local intensity scaling method) intègre en plus une correction de l'occurrence des précipitations.

Il existe plusieurs méthodes de correction de l'écart entre les séries, que ce soit pour la perturbation ou bien la correction de biais. La plus simple est nommée delta et consiste à calculer l'écart mensuel moyen entre deux séries et à appliquer cet écart aux données journalières de la série à corriger. Il est aussi possible de prendre en considération l'intensité de la donnée pour estimer la correction à apporter en créant plusieurs classes au lieu d'une seule. L'écart entre les données mensuelles est estimé par classes et la correction est faite sur les classes de données journalières. C'est la méthode des quantiles.

**Scénario hydrologique:** Série de débits simulés par un modèle hydrologique alimenté avec des scénarios climatiques.

**Simulation climatique:** Sortie directe du modèle de climat.

**Scénario climatique:** Sortie du modèle de climat post-traitée ou transformée pour les besoins d'utilisation dans un modèle subséquent.

---

### 3. Remerciements

Les simulations climatiques issues de modèles globaux utilisés pour cette étude proviennent de l'ensemble CMIP3. Les simulations régionales du MRCC sont faites chez Ouranos et les autres proviennent de l'ensemble NARCAP. Le post-traitement de toutes les simulations climatiques a été réalisé à Ouranos par Marco Braun dans le cadre du projet  $-(cQ)^2$ .

Nous tenons à remercier nos collaborateurs de L'IREQ, Luc Perreault, Marie Minville et Catherine Guay de leurs conseils et leurs recommandations. Luc, en ce qui a trait aux analyses fréquentielles et aussi d'avoir partagé ses scripts Matlab pour nous aider dans nos analyses, Marie et Catherine pour leur assistance dans nos réflexions sur la modélisation hydrologique et l'utilisation des scénarios climatiques pour les études hydrologiques.

---

## 4. Méthodologie

Pour faire l'analyse fréquentielle des volumes de crues printanières il est nécessaire d'avoir une série observée ou reconstituées d'apports naturels à partir de laquelle les volumes des crues sont calculés. Le calcul se fait sur les apports observés dans le passé. Si l'on souhaite étudier l'impact des changements climatiques sur les volumes de crues futurs, il est nécessaire d'avoir une série d'apports futurs. On voit facilement qu'un problème se pose.

Une façon de régler ce problème est d'utiliser des séries d'apports simulés pour le passé et pour le futur. Pour les débits simulés nommés scénarios hydrologiques, la période de référence représente le passé récent. En effet, des simulations de climat existent et permettent d'obtenir des scénarios de température et de précipitation pour la période 1960 à 1999 pour le passé. Pour le futur, la période disponible varie de 20 ans à 30 ans selon les modèles de climat utilisés, par contre l'année centrale de la période simulée est 2050, on identifie cette période comme étant l'horizon 2050. Les scénarios de température et de précipitation sont ensuite utilisés en intrant dans un modèle hydrologique qui simule une série d'apport.

Il est important de rappeler que les températures et les précipitations simulées par les modèles climatiques pour la période de référence ne sont pas comparables aux observations au jour le jour. La météo dépend d'un ensemble de phénomènes physiques qu'il est impossible de représenter parfaitement en modélisation. Toutefois, les modèles simulent des séries chronologiques de variables climatiques qui sont ensuite post-traitées pour les rendre statistiquement équivalentes aux observations en période de référence.

On dispose d'un certain nombre de séries d'apports simulés en période de référence et en période future, les scénarios hydrologiques. Les volumes de crues printanières sont calculés sur les périodes de référence et sur la période future de ces scénarios. Les échantillons de volumes sont ensuite ajustés par une loi statistique et quantiles des volumes de crues sont calculées, comme on le fait pour les séries d'apports observés historiques. La comparaison de l'analyse fréquentielle entre les volumes en période de référence et en période future peut être faite.

L'étude porte sur 9 bassins versants de la Côte-Nord du Québec. Les explications et les résultats données dans le texte réfèrent au bassin versant de la rivière Romaine afin d'alléger la présentation. Toutefois, les mêmes résultats sont en annexe pour tous les autres bassins.

## 5. Région d'étude

L'étude de l'impact des changements climatiques sur les crues statistiques est faite pour 9 bassins de la région de la Côte-Nord. Le bassin le plus à l'ouest est celui de la rivière Manicouagan à Manic5 et celui le plus à l'est est celui de la rivière St-Paul. Les superficies des bassins sont très variables, le plus petit étant de 684 km<sup>2</sup> (Au Tonnerre) et le plus grand de 29162 km<sup>2</sup> (Manicouagan). Ce sont tous des bassins naturels sauf celui de Manic 5 dont le débit est contrôlé par un ouvrage régulateur et une centrale.

Les précipitations totales annuelles pour la période 1941-1970 du 90<sup>ème</sup> et du 10<sup>ème</sup> percentile pour la région sont de 1150 mm et 850 mm dont 400 mm en moyenne tombent en neige (Centre Canadien de cartographie, 1991). La précipitation diminue du sud vers le nord. La température moyenne journalière est de 12,5 °C en juillet et de -17,5 en janvier. Il y a un gradient de température du sud au nord en hiver. La température moyenne journalière de janvier indique une différence autour de -10°C entre le sud et le nord des bassins versants de grande superficie et d'environ -5°C pour ceux de superficie moyenne. Ce gradient de température n'apparaît pas en été.

**Tableau 5-1: Liste des bassins versants de l'étude**

Bassin versant	Km 0 du bassin pour l'étude	Superficie (km <sup>2</sup> )	latitude	longitude
Manicouagan	Manic 5	29162		
Godbout	071401	1570	49°19'51"	67°39'17"
Moisie	072301	19000	50°21'09"	66°11'12"
Au Tonnerre	073301	684	50°16'57"	64°46'55"
Magpie	073503	7230	50°41'08"	64°34'43"
Romaine	073801	13036	50°25'39"	61°42'44"
Natashquan	074903	15600	50°40'51"	59°36'07"
Petit-Mécatina	075705	19200	51°46'15"	57°36'04"
St-Paul	076601	6630	51°30'3"	57°15'03"

Note : Les numéros inscrits comme km 0 du bassin pour les rivières autres que Manicouagan sont les identifiants des stations limnimétriques du CEHQ.

## 6. Étalonnage du modèle hydrologique

Le modèle hydrologique utilisé est le modèle SSARR [USACE, 1987]. C'est un modèle global déterministe qui utilise la précipitation totale et la température moyenne sur le pas de temps choisi pour la simulation du débit ruisselé. La plus petite fraction du pas de temps utilisé par SSARR est horaire. En général on utilise le pas de temps journalier, principalement car c'est le pas de temps pour lequel les intrants météorologiques et hydrologiques sont le plus facilement disponibles.

### 6.1 Données d'entrée

Le pas de temps utilisé pour l'étude est journalier.

#### 6.1.1 Apports naturels journaliers

Les apports naturels sont mesurés par le CEHQ. La position des stations est illustrée ci-dessous sur la figure tirée du site du CEHQ. Les stations sont identifiées par le nom de la rivière. Pour la correspondance numérique consulter le tableau 5.1.

Figure 6-1: Position des stations hydrométriques



Les stations hydrométriques sont situées assez près de l'embouchure de la rivière en général mais celles sur les rivières Magpie et St-Paul sont un peu plus en amont.

Dans le cas de Manicouagan et Outardes, qui sont régularisées par des barrages, la série d'apport est reconstituée par bilan hydrique aux sites des aménagements Manic 5 et Outardes 4.

Pour certaines rivières, la série d'apports naturels finale est la concaténation de plusieurs stations. Dans ce cas, les stations sont transposées vers la station la plus récente, sauf dans le cas de la rivière Au Tonnerre où ils sont transposés vers la station la plus ancienne. Les apports sont pondérés par le rapport de la superficie des bassins lors de la transposition.

Les stations utilisées sont au tableau suivant.

**Tableau 6-1: Liste des stations hydrométriques utilisées**

Rivière	Station	Altitude (m)	Superficie jaugée (km <sup>2</sup> )	Date début	Date fin
Godbout	071401	3	1570	14-09-1974	02-05-2011
Moisie	072301		19000	17-06-1965	02-05-2011
Au Tonnerre	073301	15	684	19-07-1947	18-07-1986
Au Tonnerre	073303		676	29-08-1984	17-11-1993
Magpie	073501		7610	16-05-1946	30-06-1959
Magpie	073202		7590	29-07-1965	09-08-1979
Magpie	073503	210	7230	01-10-1978	29-04-2011
Romaine	073801		13000	01-10-1956	29-04-2011
Romaine	073802		6550	01-01-1972	19-06-1982
Natashquan	074901		16000	13-05-1962	31-12-1971
Natashquan	074902		11600	28-09-1966	13-06-1983
Natashquan	074903	43	15600	08-06-1980	29-04-2011
Petit Mécatina	075701		19100	31-07-1965	30-09-1980
Petit Mécatina	075702		12100	13-08-1979	05-08-1993
Petit Mécatina	075705	275	19200	04-08-1994	30-04-2011
St-Paul	076601	31	6630	20-02-1967	30-04-2011
Bradior	076801	64	206	17-01-1969	19-07-1988

Note: les stations écrites en rouge sont celles où est faite la transposition des apports des autres stations

Les périodes d'apports manquants entre la date de début et de fin d'enregistrement indiquée au tableau 6.1 sont en annexe. Les apports manquants n'ont pas été reconstitués.

### 6.1.2 Données météorologiques: précipitations et températures

Les précipitations et les températures observées utilisées sont celles d'environnement Canada krigées sur une grille de 10 km. Ce travail a été fait à l'IREQ par Dominique Tapsoba. Les données sont disponibles du 1 janvier 1960 au 31 décembre 2005.

Le tableau suivant présente quelques statistiques sur ces données. Les calculs sont faits du 1 octobre au 30 septembre.

**Tableau 6-2: Statistiques descriptives de la météo observée (mm)**

Bassin versant	Précipitations totales			Pluie	neige	Température	
	Moy	P10	P90	Moy	Moy	P10 annuelle	P90 annuelle
Au Tonnerre	1043	897	1220	575	467	0,2	0,3
Godbout	1012	851	1196	562	450	-3,0	-1,0
Saint Paul	1063	919	1153	511	553	-0,2	1,6
Magpie	951	805	1069	488	463	-2,4	-0,1
Romaine	948	829	1051	489	458	-2,2	-0,2
Natashquan	981	873	1069	508	474	-1,8	0,2
Outardes 4	929	799	1050	506	423	-1,5	0,6
Moisie	949	815	1095	478	472	-1,0	1,4
Petit-Mecatina	1011	895	1133	515	496	-2,4	-0,8
Manic 5	927	765	1062	472	455	-3,9	-2,3

### 6.1.3 Courbes hypsométriques

Les courbes hypsométriques des rivières Godbout, Au Tonnerre, Magpie, Natashquan, Petit Mécatina, St-Paul ont été calculées par Frédéric Guay à partir de la cartographie 1:50000 avec une équidistance de 100m. La courbe hypsométrique de la rivière Moisie n'a pas été calculée. Celle de la rivière Romaine a été utilisée à la place. Il faut éventuellement refaire l'étalonnage pour la Moisie lorsque la courbe hypsométrique aura été calculée.

Tableau 6-3: Courbes hypsométriques

Rivière	Pourcentage du bassin versant compris entre les cotes				
	0-200m	0-400m	0-600m	0-800m	0-1080m
Godbout	9	63	99	100	100
Au Tonnerre	28	86	98	100	100
Magpie	1	9	41	92	100
Natashquan	7	27	97	100	100
Petit Mécatina	3	44	99	100	100
St-Paul	3	72	100	100	100,
Romaine	4	9	82	88	100
Moisie	4	9	82	88	100
Manic 5	0	14	62	97	100

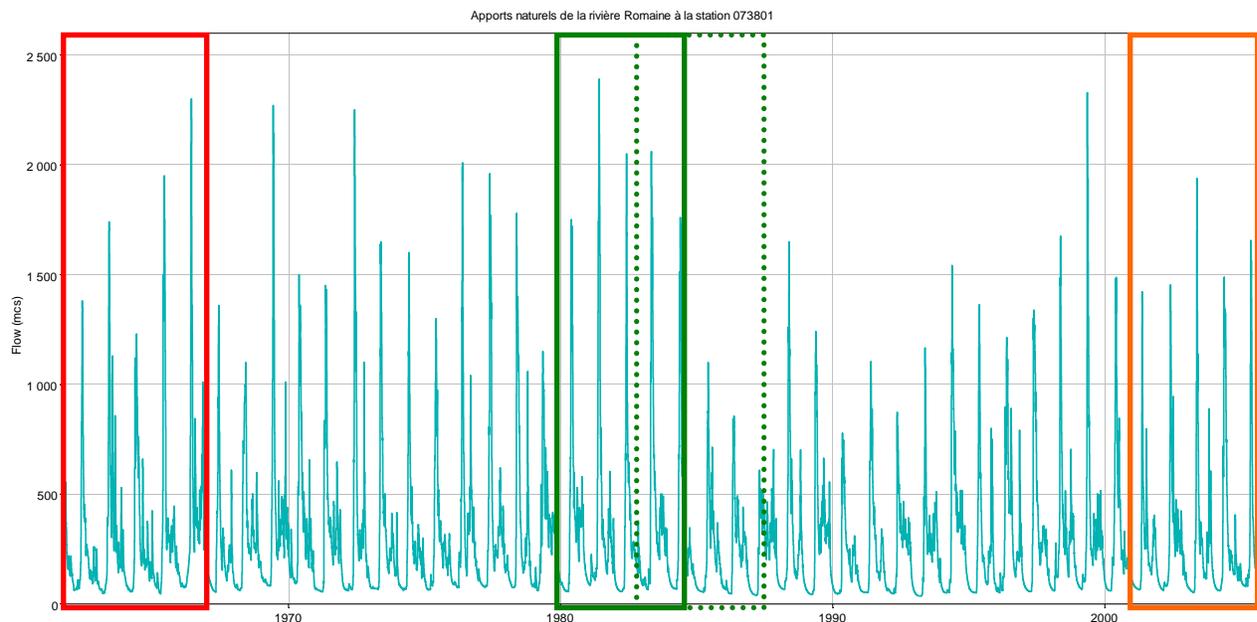
## 6.2 Méthode d'étalonnage

Le modèle hydrologique SSARR a été étalonné sur les bassins versants de la Côte-Nord en utilisant l'algorithme d'étalonnage automatique [Daigle, 2010].

La météo observée est disponible de 1960 à 2005. La disponibilité des apports sur cette période varie pour chaque bassin. Le modèle est étalonné sur plusieurs périodes de 5 ans qui débutent le 1 octobre. Elles se chevauchent sur deux ans. Cette façon de faire aide à avoir des périodes de forte et faible hydraulicité dans chaque période de calibration. Par exemple, pour la rivière Romaine, les quatorze périodes d'étalonnages testées sont: 1961-1966, 1964-1969, 1967-1972, 1970-1975, 1973-1978, 1976-1981, 1979-1984, 1982-1987, 1985-1990, 1988-1993, 1991-1996, 1994-1999, 1997-2002, 2000-2005. En ayant plusieurs ensembles de paramètres on peut tester la variabilité causée par la modélisation.

Sur la figure 6.2 on remarque que la variabilité des hydrogrammes est fonction de la période choisie. Pour la période du rectangle rouge l'hydraulicité est forte et les hydrogrammes sont différents en amplitude tandis que pour la période en orange les hydrogrammes ont la même amplitude que pour le rectangle vert. La période en vert est aussi une période de forte hydraulicité mais si on décale de trois ans alors on chevauche une période de faible hydraulicité.

Figure 6-2: Illustration des périodes d'étalonnage



Tous les paramètres de SSARR ont été optimisés sauf certains qui ont été fixés à l'avance. Ces paramètres ou variables sont fixés car ce sont des valeurs physiques propres au bassin ou bien il n'y a pas assez d'observations pour bien les estimer. Les valeurs théoriques ou empiriques ont été choisies. Ces paramètres fixés sont:

- Le nombre de bandes pour la fonte de neige: 3 pour tous les bassins
- La pondération de la précipitation en fonction de l'altitude (EWP): 100%
- L'altitude maximale du bassin: dépend du bassin
- La pondération de l'évapotranspiration potentielle en fonction du mois (ETM): dépend de la latitude. Des tables de pondérations ont été calculées et sont disponibles [USACE,1987].
- L'interception: elle est en relation avec l'évapotranspiration. Les valeurs fixées en été et en hiver sont dans l'ordre de grandeur préconisé [USACE,1987].
- La fonte à l'interface sol/neige: prise du manuel SSARR [USACE,1987].
- La pondération de l'évapotranspiration potentielle en fonction de l'altitude (ETE): 100%
- La pondération des observations de températures: 100%
- Le seuil de température sous lequel les précipitations sont pondérées : 0°C

L'étalonnage des paramètres est fait en 5 étapes. Cette manière de procéder évite le plus possible de tomber sur un maximum local, ce qui tend à arriver si on tente d'optimiser un trop grand nombre de paramètres à la fois.

---

Les premiers paramètres optimisés influencent le bilan hydrique annuel. Ces paramètres influencent le taux de ruissellement, l'évapotranspiration et la pondération des précipitations liquides et solides. Ce sont ROP/SMI, EKE, ETP, DKE, la pondération des précipitations et la pondération de la neige. Le critère de convergence utilisé pour l'optimisation est la différence entre le volume ruisselé annuel observé et simulé.

Le second ensemble de paramètres optimisé concerne la fonte. Les paramètres optimisés influent sur l'occurrence de la crue printanière, la répartition entre l'écoulement de base et de surface, la pente de l'hydrogramme. Ce sont le MCR, TIPMR, TIPM, Lt, BFP/BII, Pmax et MRP. Le critère de convergence utilisé pour l'optimisation est le coefficient de Nash-Sutcliffe.

Le troisième ensemble de paramètres optimisé concerne aussi la fonte. Ce sont des paramètres qui ont une influence moindre que ceux du second ensemble sur l'hydrogramme. Ces paramètres sont RMR, PLWHC, SNETF, BASE, PXTEMP, PMIN, WEMIN, WEPCT, WEMAX. Le critère de convergence utilisé pour l'optimisation est le coefficient de Nash-Sutcliffe.

Le quatrième ensemble de paramètres ajuste la courbe de récession de l'hydrogramme, soit les débits d'hiver. Il s'agit de la couche nommée LowerZone de SSARR. Ces paramètres sont le nombre de phases pour le LowerZone et le temps de résidence, PBLZ et DGWLIM. Le critère de convergence utilisé pour l'optimisation est le coefficient de Nash-Sutcliffe calculé sur le logarithme des débits.

Enfin le cinquième ensemble de paramètres concerne l'ajustement du temps de réponse du bassin. Les paramètres ajustés influent sur les trois couches d'écoulement supérieures au LowerZone, soit l'écoulement de surface, l'écoulement hypodermique et l'écoulement de base. Les paramètres ajustés concernent le nombre de phase et le temps de résidence pour chacune de ces couches. Le critère de convergence utilisé pour l'optimisation est le coefficient de Nash-Sutcliffe.

Lorsque les ensembles de paramètres sont obtenus pour chaque calibration, les apports sont simulés avec toute la météorologie observée, soit du 1 octobre 1960 au 30 septembre 2005. L'analyse des résultats est faite sur ces apports simulés.

## **6.3 Analyse des résultats**

L'ensemble de paramètres choisi est celui qui permet de simuler le plus adéquatement les volumes de crues printanières et l'occurrence de la crue. La première étape est donc de calculer le volume de la crue printanière.

### **6.3.1 Calcul du volume de crue printanière**

Deux méthodes de calcul sont possibles. La méthode traditionnelle, dite à durée fixe, où le volume maximal pour une durée définie est estimé entre la date de début de crue la plus hâtive et la date de fin de crue la plus tardive pour la période de données observées. La méthode à durée variable qui détermine le volume de crue annuelle selon sa durée propre. La méthode a été développée et automatisée par Guenther Pacher [Pacher, 2008], [Pacher, 2009], [Merleau, 2012]. Cette méthode est intégrée au logiciel Extrêmes développé par L'IREQ.

Les deux méthodes ont leurs forces et faiblesses. La méthode à durée fixe est celle utilisée en ingénierie. Elle permet d'associer une forme d'hydrogramme observé au volume de crue fréquentielle et d'ajuster cette forme au volume estimé pour la durée de crue déduite des observations d'apports. En étude de changements climatiques cette méthode est plus difficilement applicable car elle nécessite l'analyse des hydrogrammes annuels et la détermination du début et de fin de crue de façon visuelle. En ayant plus de 400 scénarios en période de référence et le même nombre en période future on se rend compte rapidement des limites de la méthode. Une manière de contourner le problème est d'estimer le nombre de jours de translation de la crue printanière dans le futur pour redéfinir les bornes de calcul du volume et de conserver la durée établie selon les observations. Le volume en période de référence est calculé selon les critères établis avec les observations.

La méthode à durée variable étant automatisée, elle permet un traitement rapide des scénarios hydrologiques et une prise en considération de la translation du début de la crue et de la modification de la durée pour la période future.

On verra que les deux méthodes donnent des résultats similaires pour les apports observés.

#### 6.3.1.1 Comparaison de volumes de crue printanière observée calculés sur une durée fixe et sur une durée variable

Les volumes printaniers sur les bassins étudiés dans la présente étude ont été calculés jusqu'en 1996 par la méthode à durée fixe lors de l'étude de régionalisation des débits de crues de la Côte-Nord. Le fichier de calcul Excel [Roy, 1996] compilant les informations de calcul a été utilisé comme base et les informations ont été complétées pour les périodes disponibles supplémentaires. Les volumes de crues pour le bassin Manic 5 provient de l'étude de CMP.

Les volumes printaniers par bassins sont en annexe. Le tableau 6.4 résume les informations recueillies pour le calcul du volume de crue printanière par la méthode à durée fixe.

**Tableau 6-4: Caractéristiques des crues printanières observées pour la méthode à durée fixe**

Bassin versant	durée	Début de crue	Fin de crue
Au Tonnerre	47	26 mars	5 juillet
Godbout	45	30 mars	19 juin
Saint Paul	47	5 avril	1 juillet
Magpie	62	3 avril	19 juillet
Romaine	60	1 avril	17 juillet
Natashquan	59	4 avril	13 juillet
Moisie	55	31 mars	5 juillet
Petit-Mécatina	54	5 avril	13 juillet
Manic 5	70	1 avril	1 juillet

---

La comparaison de la dispersion des écarts annuels entre le volume calculé selon une durée variable et une durée fixe est montrée à la figure 6.3. Le trait rouge représente la médiane, les extrémités de la boîte représentent le 25<sup>ème</sup> et 75<sup>ème</sup> percentile et les traits noirs les valeurs maximales et minimales comprises dans les limites définies comme étant 1,5 fois la distance interquartile ajoutées au 25<sup>ème</sup> et 75<sup>ème</sup> percentile. Les valeurs excédent cette dispersion maximale sont représentées comme des valeurs à l'écart.

Figure 6-3: Écart relatif entre le volume printanier annuel calculé par la méthode à durée variable et la méthode à durée fixe

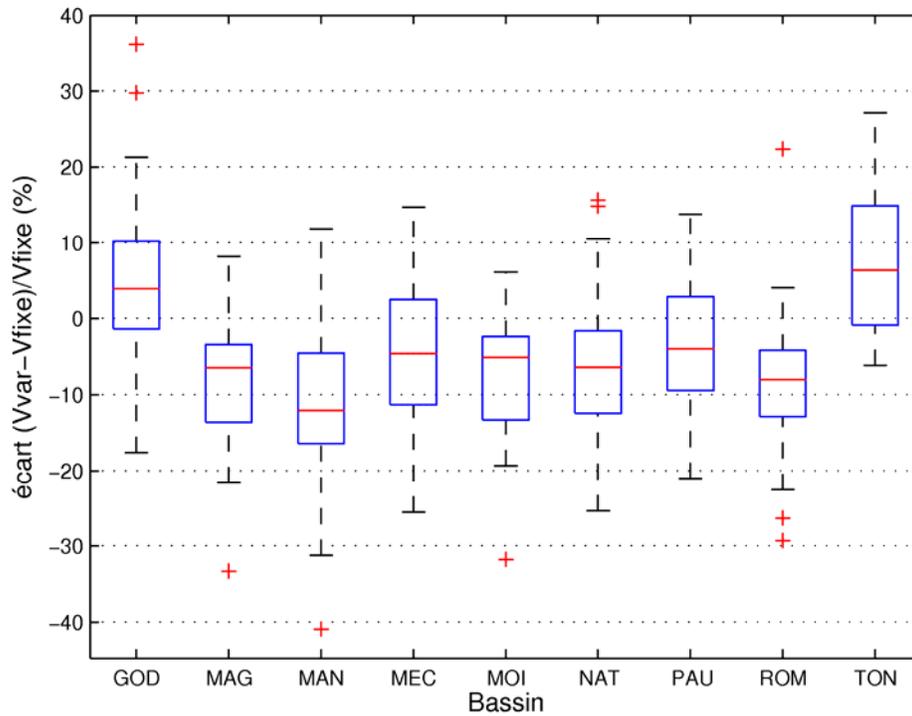
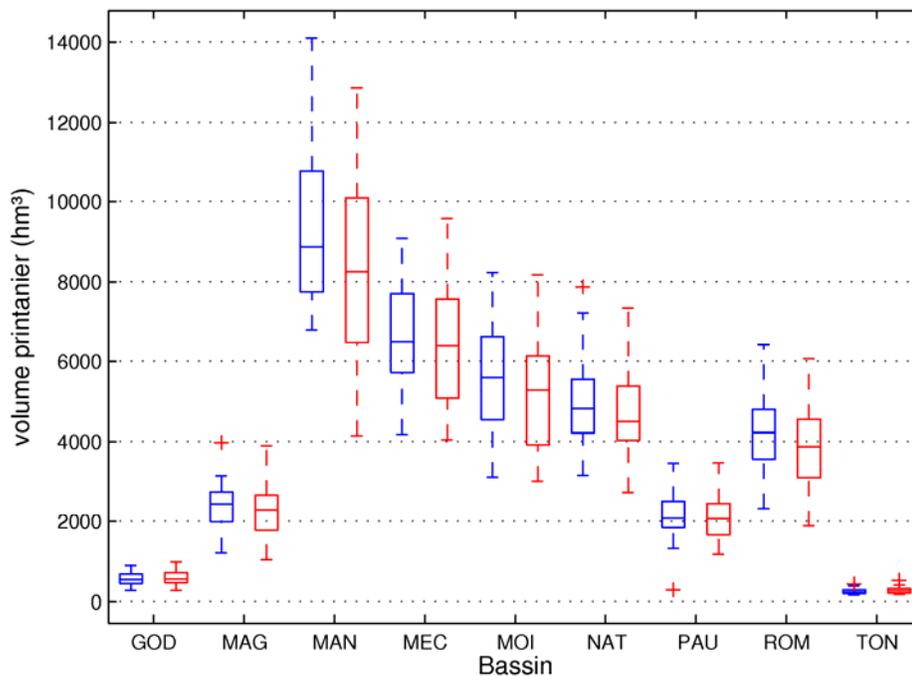


Figure 6-4: Comparaison annuelle entre le volume de crue printanière calculé par la méthode à durée fixe (bleu) et par la méthode à durée variable (rouge)



---

Les figures 6.3 et 6.4 montrent que les volumes de crues printanières calculés par la méthode à durée variable sont généralement plus petits que ceux calculés par la méthode à durée fixe, surtout dans le cas de Manic 5. L'écart entre le volume annuel calculé par les deux méthodes pour les bornes limitées par le 75ème et le 25ème percentile est de  $\pm 17\%$  au maximum. Il conviendrait d'analyser plus en détail la différence entre les deux méthodes, par exemple sur l'homogénéité spatiale et temporelle, la stationnarité et la répercussion sur la loi d'ajustement choisie pour ajuster l'échantillon et sur le résultat d'extrapolation. La méthode de calcul du volume printanier sur une durée fixe tend à sous estimer les volumes des grandes crues et à surestimer le volume des petites crues.

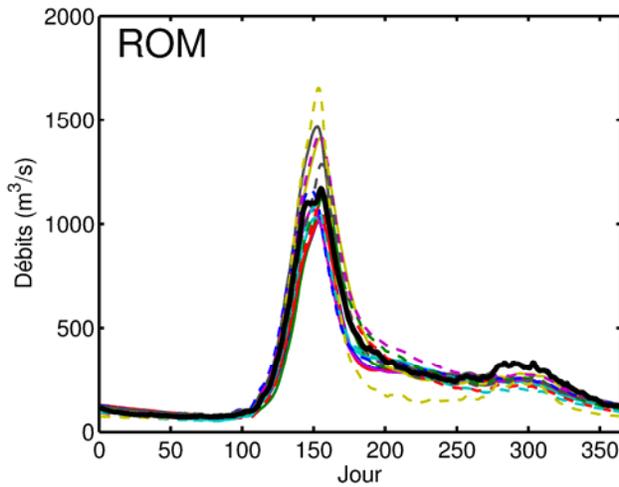
#### 6.3.1.2 Volumes printaniers calculés des apports simulés avec la météo observée

Les volumes sont calculés sur une durée fixe et sur une durée variable à partir des séries d'apports simulés avec SSARR avec la météo observée krigée. Comme on l'a vu précédemment, il y a plusieurs séries simulées par bassin versant car il y a plusieurs ensembles de paramètres qui ont été étalonnés. En comparant la distribution des volumes simulés pour chaque série avec la distribution des volumes observés et en choisissant celle qui concorde le mieux, on obtient l'ensemble de paramètres qui simule le mieux les volumes de crues printanières. La comparaison des distributions est faite par le test de Kolmogorov-Smirnov pour les volumes calculés sur une durée fixe et aussi sur une durée variable. Elle est aussi faite par une inspection visuelle de concordance entre l'hydrogramme moyen interannuel simulé et observé et aussi par la concordance entre les distributions empiriques.

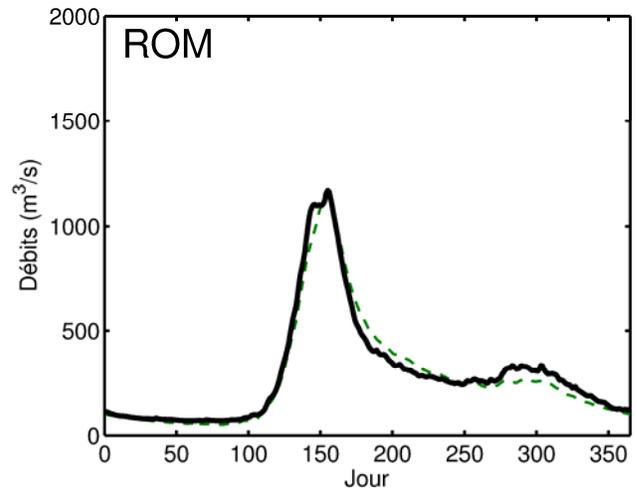
La figure 6.5 présente les résultats pour la rivière Romaine pour les volumes calculés sur une durée variable. Les résultats des autres bassins versants sont en annexe. Les hydrogrammes moyens interannuels simulés (en couleur) et observé (en noir) sont représentés en haut à gauche. Le résultat pour l'ensemble de paramètres choisi se trouve à droite. Les distributions empiriques des volumes printaniers annuels simulés et observés sont à gauche en dessous de l'hydrogramme moyen pour la méthode à durée fixe et à durée variable. Les mêmes informations se trouvent à droite pour isoler le résultat avec l'ensemble de paramètres choisi.

Figure 6-5: Choix de la paramétrisation du modèle

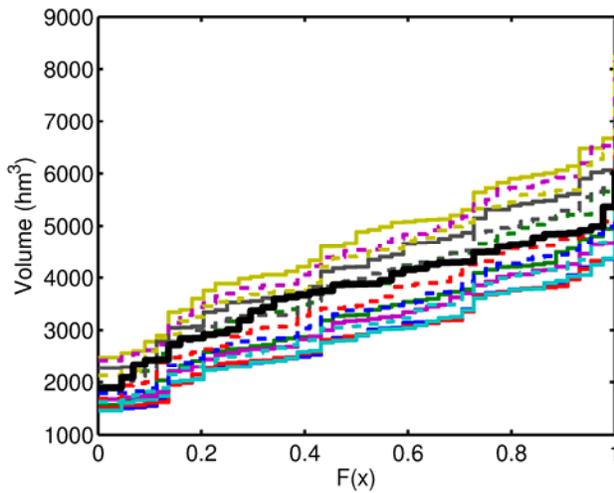
**Hydrogramme moyen :**  
toutes les paramétrisations



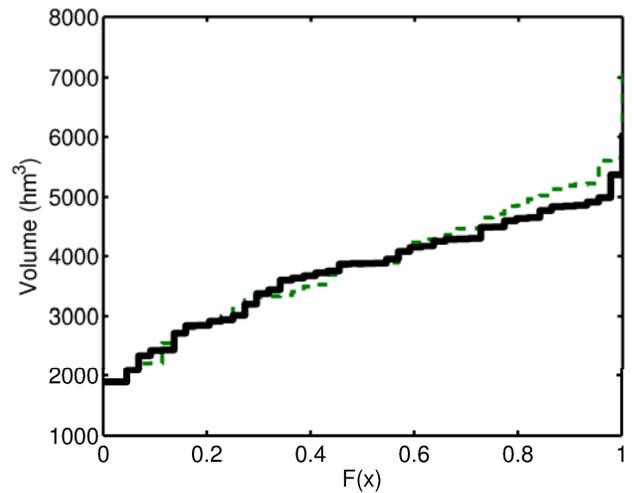
paramétrisation choisie



**Distribution empirique du volume printanier :** toutes les paramétrisations



paramétrisation choisie



Les ensembles de paramètres choisis pour les bassins et la période d'étalonnage correspondante sont au tableau suivant.

**Tableau 6-5 : Périodes d'étalonnage des bassins**

<b>Bassin versant</b>	<b>Période d'étalonnage pour les volumes par durée fixe</b>	<b>Période d'étalonnage pour les volumes par durée variable</b>
Au Tonnerre	1979-1984	1988-1993
Godbout	1988-1993	1994-1999
Saint Paul	1982-1987	1982-1987
Magpie	1985-1990	1985-1990
Romaine	1985-1990	1995-1999
Natashquan	2000-2005	1988-1993
Moisie	1991-1996	1985-1990
Petit-Mécatina	1988-1993	2000-2005
Manic 5	1982-1987	1985-1990

Notons que la période d'étalonnage choisie est différente selon que l'indice de performance soit le volume calculé sur une durée fixe ou bien le volume calculé sur une durée variable. Seuls les bassins St-Paul et Magpie ont leurs paramètres choisis sur la même période d'étalonnage.

## 7. Simulation des scénarios hydrologiques

### 7.1 Données d'entrée

Les scénarios climatiques entrés dans le modèle SSARR pour le calcul des scénarios hydrologiques proviennent de 19 modèles globaux de climat de l'ensemble CMIP3. Un certain nombre de ceux-ci sont mis à l'échelle par 2 modèles régionaux. Chaque modèle de climat peut avoir plus d'une simulation car différents scénarios de gaz à effet de serre (SRES) sont utilisés. Dans notre ensemble, 3 différents scénarios sont utilisés, soit le scénario B1, le moins sévère quant à l'accroissement de la température, le scénario A1B, un scénario médian et le scénario A2, un des plus sévères. Les modèles n'utilisent pas forcément les trois scénarios de gaz à effet de serre. Les modèles peuvent aussi comporter plusieurs membres, ce qui veut dire que les conditions initiales des différentes simulations sont légèrement différentes. Il y a en tout 71 simulations climatiques provenant de MCG et 12 provenant de MRC, donc en tout nous avons 83 simulations climatiques.

Tableau 7-1 : Simulations climatiques utilisées

Modèle	SRES			N° du membre utilisé				
Modèles globaux								
GISS_AOM	B1	A1B		1				
CSIRO_MK3.0	B1	A1B	A2	1				
CSIRO_MK3.5	B1	A1B	A2	1				
CCCMA_CGCM3.1_T63	B1	A1B		1				
CCCMA_CGCM3.1	B1	A1B	A2	1	2	3	4	5
GFDL_CM2.0	B1	A1B	A2	1				
CNRM_CM3	B1	A1B	A2	1				
IPSL_CM4	B1	A1B	A2	1				
INGV_ECHAM4		A1B	A2	1				
ECHAM5	B1		A2	1				
		A1B					4	
MIUB_ECO_G	B1	A1B	A2	1	2	3		
MIROC3.2_HIRES	B1	A1B		1				
MIROC3.2_MEDRES	B1	A1B	A2	1	2			
MRI_CGCM2.3.2a	B1	A1B	A2	1	2	3	4	5
Modèle régional								
CCCMA_CGCM3.1_CRCM4			A2	Aucun membre spécifié (NARCAP)				
CCSM_CRCM4			A2	1				
HADCM3_HRM3			A2	1				
CCCMA_CGCM3.1_CRCM4			A2	1	2	3	4	5
CNR_CRCM4		A1B		1				
ECHAM5_CRCM4			A2	1	2	3		

Note : Par exemple, pour GISS\_AOM, deux scénarios sont disponibles : B1 membre 1 et A1B membre 1. Pour CCCMA\_CGCM3.1, il y a 15 scénarios disponibles : 3 scénarios de gaz effet de serre et 5 membres pour chaque scénario.

---

Notez que le climat simulé en période de référence est le même pour un même modèle utilisant trois scénarios d'accroissement de gaz à effet de serre différent. Seules les simulations de la période future changent. Toutefois, le climat simulé en période de référence sera différent si le membre change, puisque les conditions initiales à la simulation ne sont plus les mêmes. En tenant compte de tout cela, on a donc 39 simulations de climat en période de référence différentes les une des autres et 83 simulations de climat en périodes futures différentes les une des autres.

## 7.2 Génération des scénarios climatiques par post-traitement des simulations climatique

Nous utilisons les simulations climatiques (sorties directes) pour la modélisation des scénarios hydrologiques. En plus de celles-ci, nous utilisons également des scénarios climatiques générés par post-traitement des simulations climatiques. Nous utilisons quatre méthodes de post-traitement. On a donc un total de 415 scénarios climatiques pour la période de référence et le même nombre pour la période future par bassin versant. Notons que pour la période de référence certains scénarios sont redondants. Pour un modèle de climat, le scénario de référence est le même lorsqu'on change le SRES pour la simulation du futur. Il y a donc 195 scénarios climatiques différents en période de référence.

La première méthode consiste à corriger le biais qui existe entre la simulation des températures et des précipitations en période de référence et leurs observations. Le biais estimé pour la période de référence est considéré comme étant le même pour la période future. La correction du biais est effectuée selon la méthode de la correction des quantiles ou bien par celle de la correction de la moyenne mensuelle (méthode delta). La méthode la plus simple est celle de la correction de la moyenne mensuelle. Il s'agit d'estimer la moyenne mensuelle simulée et observée de la variable à corriger pour le mois choisi sur l'ensemble de la simulation. On calcule la différence de la moyenne entre les séries observés et de la période de référence pour corriger les températures et pour les précipitations, on calcule le ratio. On ajoute la différence ou le ratio aux variables simulées à corriger.

La seconde méthode consiste à perturber les observations de températures et de précipitations, ce qui veut dire qu'on ajoute une quantité aux valeurs observées pour créer les séries représentant le futur. Cette quantité est la différence entre les simulations de la précipitation et de la température de la période future avec la période de référence. Les observations sont utilisées comme seul scénario de référence.

La troisième méthode est aussi une correction de biais mais en plus elle corrige l'occurrence des précipitations. Il pleut trop souvent dans plusieurs simulations climatiques. Cette méthode réajuste donc le nombre de jour avec pluie pour correspondre aux observations et redistribue les précipitations cumulées des journées enlevées sur les autres journées.

## 7.3 Simulation des scénarios hydrologiques

Les scénarios climatiques journaliers de températures moyennes et de précipitations totales sont fournis en intrants au modèle SSARR qui calcule une série de débit simulé au pas de temps

journaliers appelée scénario hydrologique. A chaque scénario climatique correspond un scénario hydrologique par méthode de post-traitement utilisée. Dans notre cas, puisqu'on utilise 4 méthodes de post-traitement et les sorties directe, l'équivalent de 5 scénarios hydrologiques sont simulés.

Les prochaines figures présentent les résultats. Les abréviations sont les suivantes. Les noms des bassins versant et des scénarios climatiques sont raccourcis à 3 lettres. Habituellement dans les études d'impact, les résultats sont agrégés et présentés comme un tout mais étant donné le nombre élevé de scénarios hydrologiques par bassin et par période (415) nous avons choisi de les discriminer par méthode de post-traitement. Finalement ce choix aura permis de voir que le post-traitement a un impact sur la réponse hydrologique.

**Tableau 7-2 : Abréviations pour les résultats**

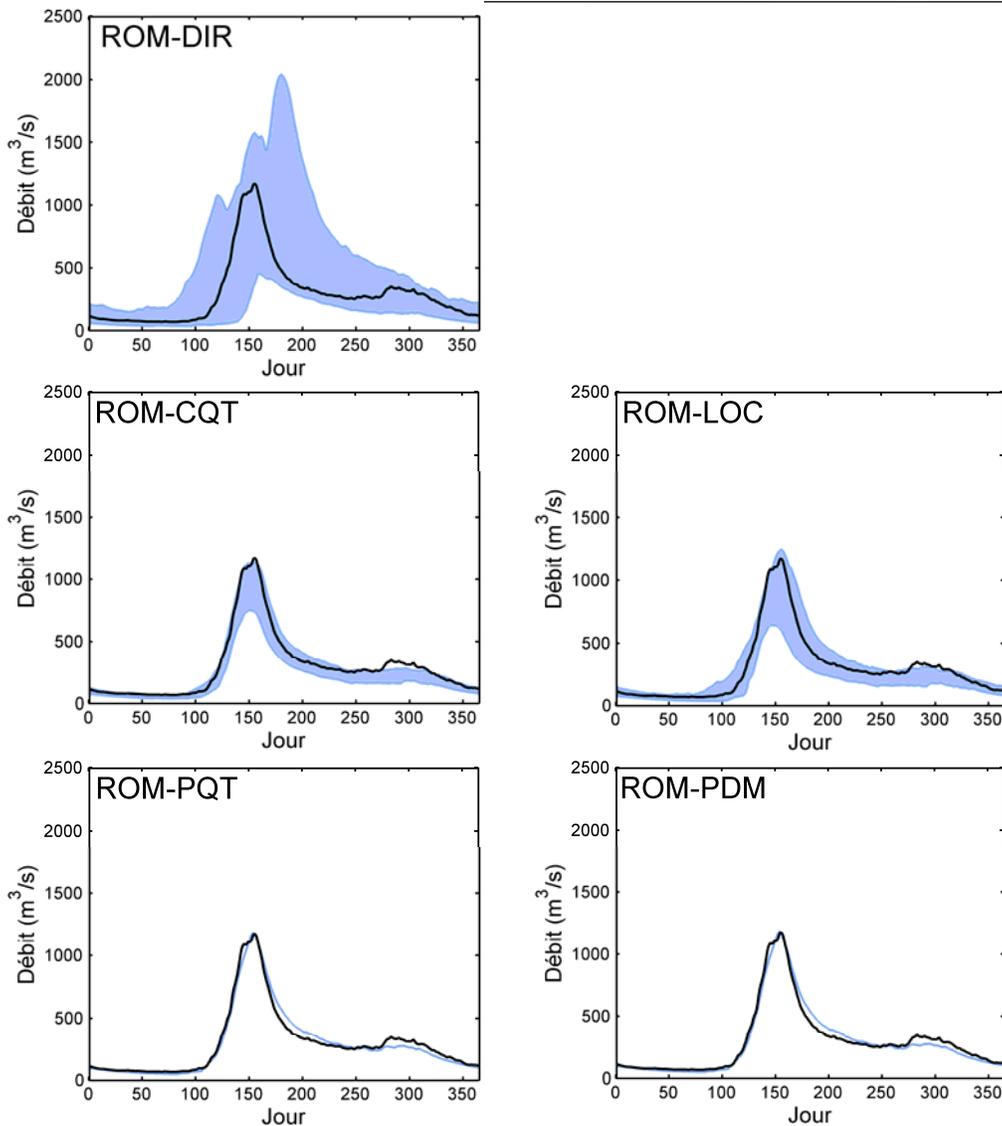
Bassin versant		Post Traitement	
Au Tonnerre	TON	Sortie directe de simulation	DIR
Godbout	GOD	Correction du biais par la méthode des quantiles	CQT
Saint-Paul	PAU	Correction du biais (deltas mensuels) et de l'occurrence des précipitations (LOCI)	LOC
Magpie	MAG	Perturbation des observations par la méthode des quantiles	PQT
Romaine	ROM	Perturbation des observations par la méthode des deltas mensuels	PDM
Natashquan	NAT		
Moisie	MOI		
Petit-Mécatina	MEC		
Manic 5	MAN		

Les figures suivantes montrent les observations en noir et l'ensemble des scénarios hydrologiques en période de référence sous forme d'enveloppe. Pour PQT et PDM il n'y a qu'un seul scénario hydrologique car il s'agit des observations. Pour enlever l'effet de la modélisation hydrologique entre le scénario futur et les observations pour la méthode des perturbations, les observations sont les débits simulés avec les observations météorologiques. Les figures des autres bassins sont à l'annexe 10.3.

Deux ensembles de scénarios hydrologiques ont été simulés. Un des ensemble est obtenu avec la paramétrisation du modèle sélectionné pour sa bonne modélisation des volumes de crue calculé sur une durée variable tandis que l'autre ensemble est simulé avec la paramétrisation du modèle sélectionnée pour le calcul du volume sur une durée fixe (voir section 6.3.1).

Les figures 7-1 et 7-2 ci-dessous représentent l'ensemble des scénarios hydrologique simulés pour un calcul du volume sur une durée variable. L'autre ensemble n'est pas montré car les résultats sont équivalents.

**Figure 7-1 : Romaine : Observations et scénarios hydrologiques en période de référence (paramétrisation pour le calcul du volume par la méthode à durée variable)**

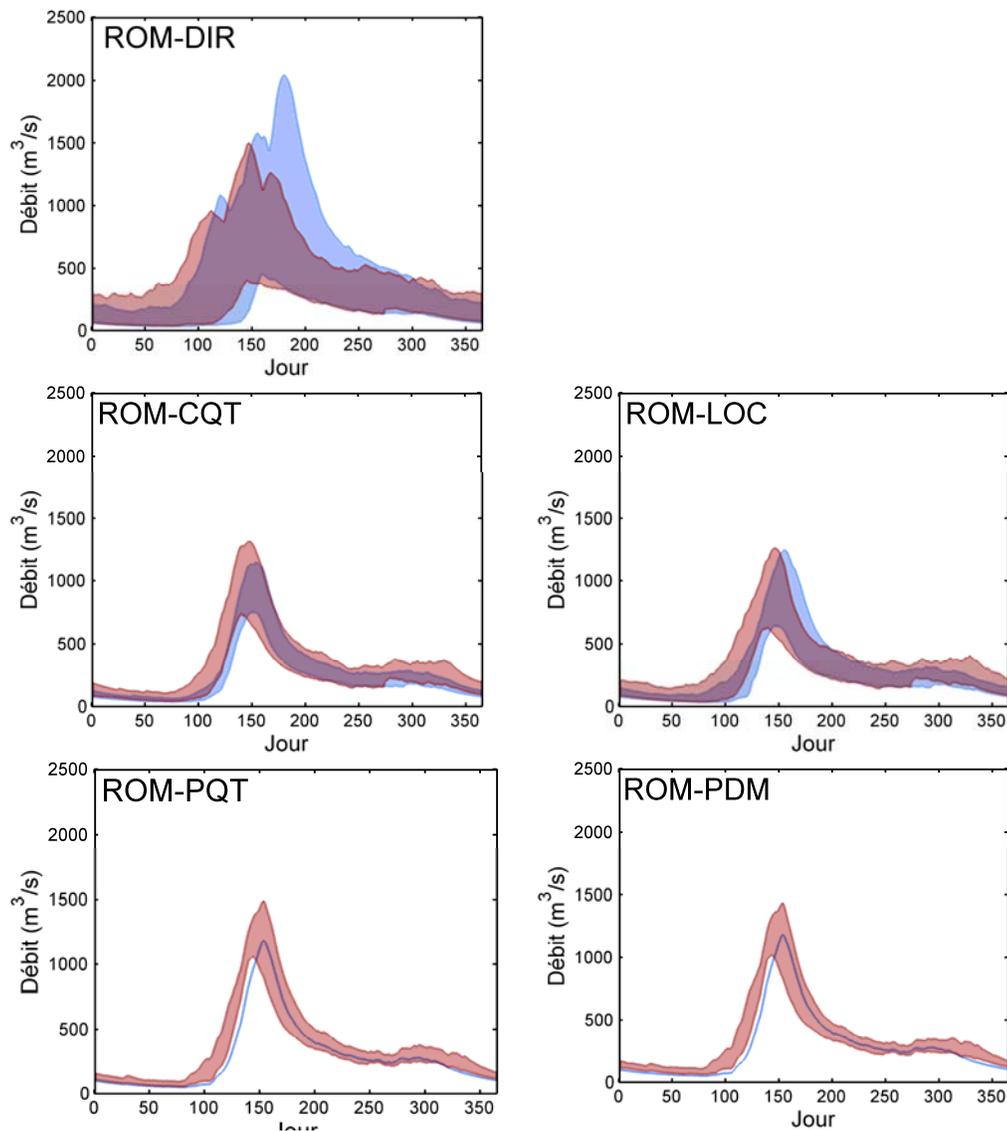


Les scénarios hydrologiques calculés avec les simulations climatiques en sortie directe sont très dispersés. Le début de crue printanière est mal défini et l'occurrence de la pointe de crue semble se produire à trois moments différents selon les scénarios. Plus la crue débute tard, plus il y a de neige accumulée et plus la fonte se poursuit longtemps, empiétant sur l'été. Il y aurait matière à vérification concernant les scénarios dont l'occurrence de la pointe correspond à celle des observations. Quels sont-ils? Quelles sont leurs caractéristiques? Ceci ne peut être fait maintenant, mais pourrait être fait dans un projet d'analyse et de recommandation de scénarios climatiques pour l'application en hydrologie.

La prochaine figure présente la plage couverte par les scénarios hydrologiques en période de référence (bleu) comparativement à celle couverte en période future (rose) pour la rivière Romaine. Les scénarios hydrologiques ont été séparés selon la méthode de post-traitement utilisée. L'ensemble de paramètres d'étalonnage utilisé pour simuler les scénarios hydrologiques représentés

est celui sélectionné pour sa bonne représentation des volumes de durée variable. Les scénarios hydrologiques pour les autres rivières sont en annexe 10.4.

Figure 7-2 : Romaine : Scénarios hydrologiques en période de référence et en période future



La plage des résultats en période de référence et en période future se ressemble en occurrence et en intensité lorsque les scénarios sont post-traités. Pour la méthode des perturbations quantile (PQT) ou moyenne mensuelle (PDM), il faut se rappeler que la période de référence est représentée par les observations (simulation hydrologique avec la météo observée en intrant). C'est la raison pour laquelle il n'y a qu'une seule courbe. La méthode LOCI montre une plage plus étendue pour l'étiage d'hiver et pour le début de crue. C'est probablement dû à la correction du biais des températures par la différence de moyenne mensuelle entre période de référence et future. Cette méthode tend à surestimer les températures. On peut toutefois constater que pour les scénarios

hydrologiques simulés avec les sorties directes, la variabilité des durées et de l'intensité des crues printanières est beaucoup plus grande.

## 7.4 Analyse des résultats

La comparaison entre les volumes de crues printanières futurs et en période de référence a été faite avec les volumes calculés sur une durée fixe et une durée variable mais seuls les résultats des volumes calculés sur une durée variable sont présentés pour ne pas surcharger le texte, sauf en 7.4.2 où l'influence de la méthode de calcul du volume est présentée.

### 7.4.1 Comparaison entre les distributions volumes des périodes de référence et future

On utilise le test de Kolmogorov-Smirnov avec un niveau de confiance de 95% sur les distributions de scénarios appariés entre référence et futur. Le pourcentage des scénarios hydrologiques qui montre un changement significatif de la distribution empirique du volume futur et du volume de référence est au tableau 7.3.

Les distributions de volumes les plus différentes entre le futur et la période de référence sont celles des scénarios hydrologiques avec observations météorologiques perturbées dont les grandeurs des perturbations sont estimées par la méthode des quantiles. Lorsque les deltas mensuels sont utilisés pour estimer les perturbations à appliquer aux observations météo, les distributions des volumes printaniers entre le futur et le présent sont moins différentes. Viennent ensuite les méthodes de correction de biais LOCI et CQT.

**Tableau 7-3: Nombre de simulation avec une différence statistiquement significative selon le test de Kolmogorov-Smirnov sur les distributions des volumes (durée variable) entre futur et référence**

Bassin versant	DIR	CQT	LOC	PQT	PDM
Au Tonnerre	6	0	5	1	0
Godbout	17	16	24	30	11
Saint-Paul	13	18	12	37	8
Magpie	16	25	25	40	11
Romaine	18	30	18	64	33
Natashquan	19	28	27	65	27
Moisie	25	18	29	49	22
Petit-Mécatina	10	18	11	36	11
Manic 5	24	29	35	49	36

La distribution future des volumes n'est donc pas significativement différente de celle en période de référence pour nombre de scénarios hydrologiques.

### 7.4.2 Influence de la méthode de calcul du volume

Les diagrammes en boîtes ci-dessous montrent la dispersion du volume printanier en fonction de la méthode de calcul du volume sur une durée fixe (en saumon) ou bien variable (en vert). Chaque

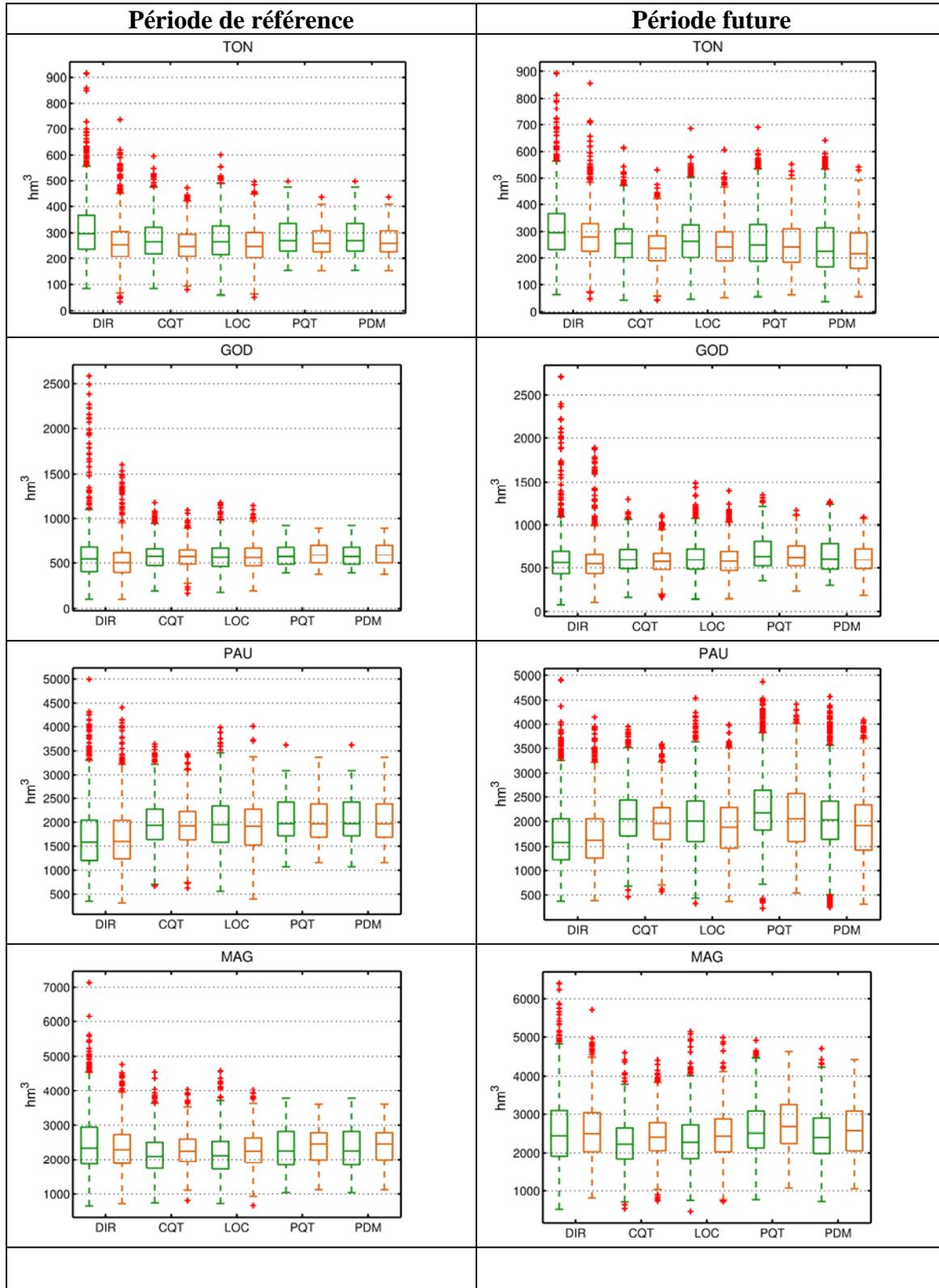
---

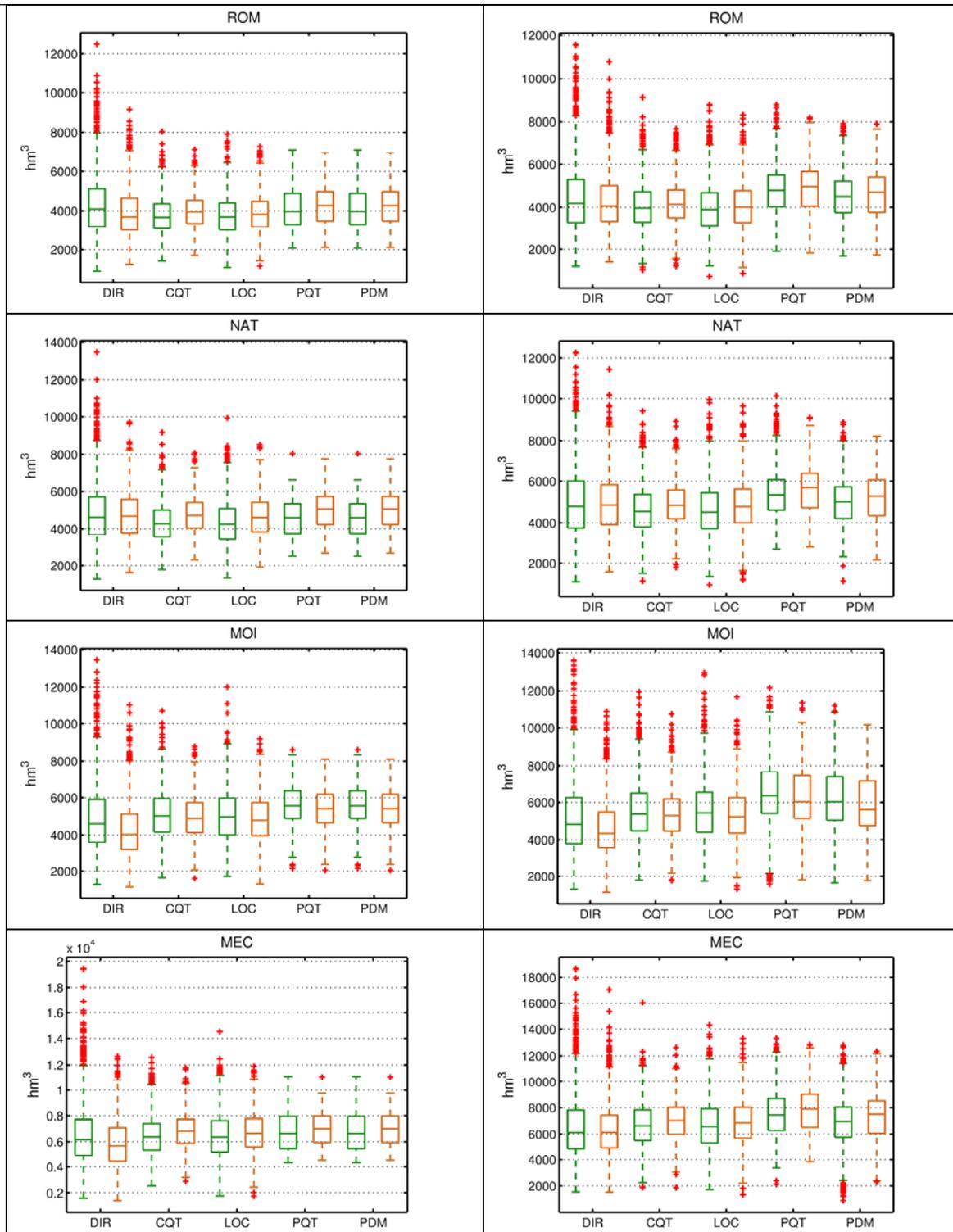
diagramme en boîte contient 83 valeurs du volume soit l'ensemble des simulations hydrologiques. La ligne centrale dans la boîte représente le volume médian, le dessus de la boîte est le 75<sup>ème</sup> percentile et le dessous, le 25<sup>ème</sup>. Les moustaches sont  $\pm$  l'espace interquartile et les croix rouges sont les valeurs à l'écart pour les volumes annuels de l'ensemble des scénarios.

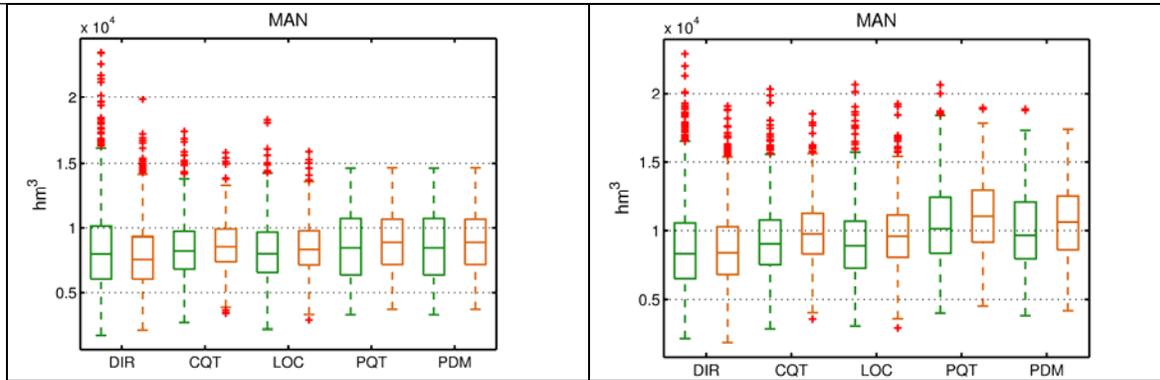
On voit que pour plusieurs bassins la dispersion du volume pour le cas de simulation avec DIR est surtout causée par les valeurs à l'écart pour la méthode de calcul par durée variable. Ceci est dû à la forte variabilité temporelle des débuts et fin de crue telle qu'observée sur la figure 7.1 pour la méthode DIR. La méthode de calcul du volume sur une période de durée fixe ne tient pas compte du fait que dans un certain nombre de scénarios hydrologiques la crue est retardée et se produit plus tard dans l'année. Une portion de la crue printanière n'est pas compilée si elle se prolonge après la date moyenne de fin de crue. La dispersion des volumes entre le 25<sup>ème</sup> et le 75<sup>ème</sup> percentile se ressemble beaucoup que l'on prenne une durée fixe ou bien une durée variable peu importe la méthode de post-traitement. Pourtant l'une des méthodes ne présente pas systématiquement une plus grande dispersion. L'analyse pourrait être approfondie ultérieurement.

Pour le futur, l'étendue des volumes calculés sur une durée fixe pour les scénarios hydrologiques simulés DIR est plus étendue et correspond au calcul du volume sur une durée fixe. Pour le futur, le début de crue a été devancé de 10 jours et la durée de la crue a été augmentée de 3 jours. Ces valeurs ont été prises d'une étude de [Pacher, 2010].

Figure 7-3 Comparaison des volumes à durée variable (vert) avec les volumes à durée fixe (orange) pour la période de référence et la période future





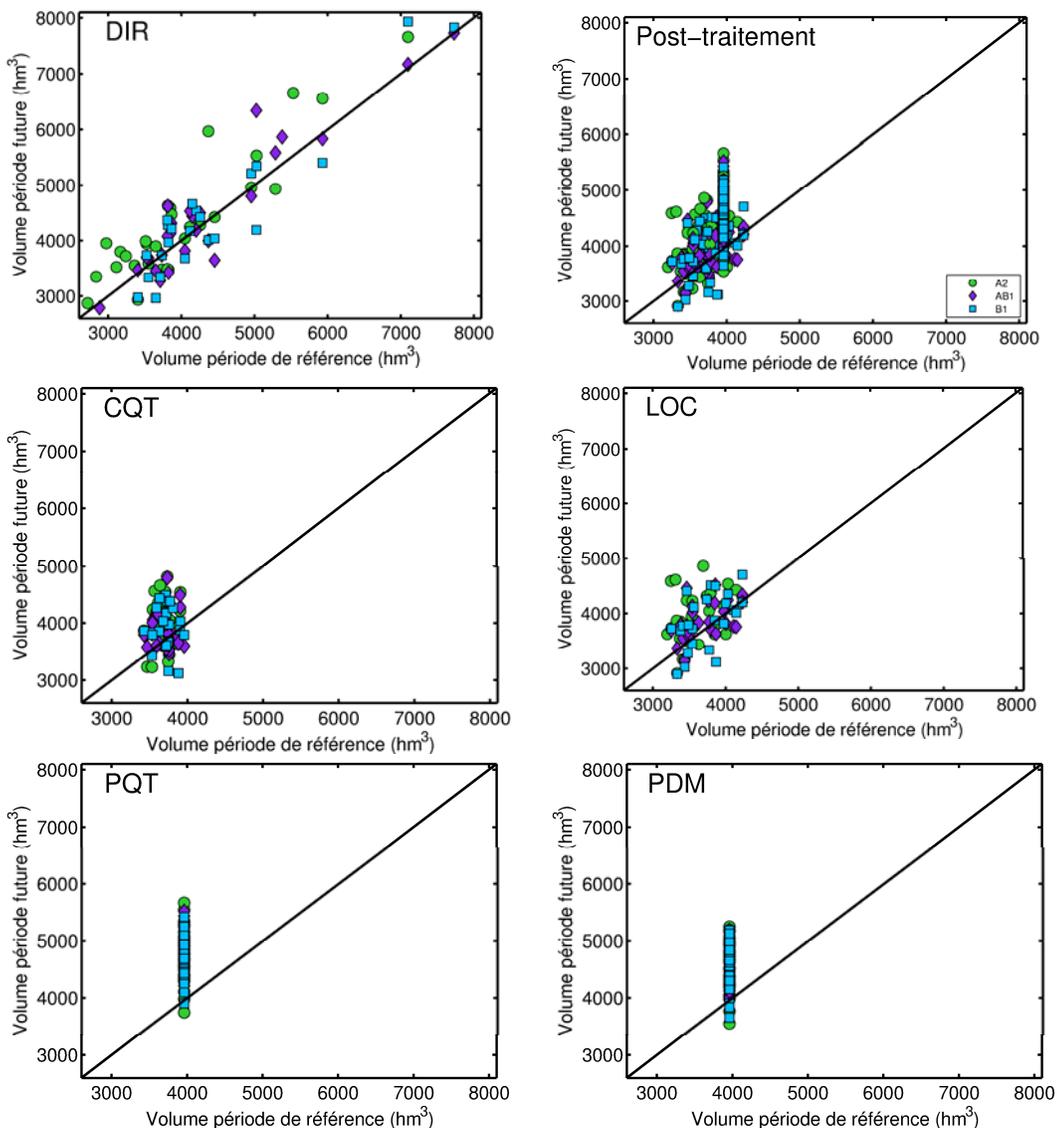


### 7.4.3 Influence du scénario de gaz à effet de serre

Une analyse exploratoire a été faite graphiquement pour savoir si le scénario de gaz à effet de serre utilisé avait une influence sur le changement de volume de crue printanière annuel médian. Le volume est calculé par la méthode à durée variable. L'augmentation d'émission de gaz à effet de serre la moins sévère est représentée par le scénario B1. Le scénario médian par AB1 et enfin A2 présente l'un des scénarios où l'augmentation est la plus sévère. Les comparaisons du volume de référence par rapport au volume futur pour un scénario hydrologique résultant d'un même scénario climatique sont ci-dessous. Les résultats sont discriminés selon la méthode de post-traitement mais dans le coin supérieur droit, toutes les méthodes de post-traitement sont confondues pour comparaison avec la méthode directe.

A première vue, le scénario de gaz à effet de serre ne semble pas influencer le volume de crue printanière de façon notable, ou du moins sur l'horizon utilisé. On peut voir sur les figures ci-dessous que les points représentant les SRES sont dispersés dans l'espace et ne sont pas groupés.

**Figure 7-4 Rivière Romaine : Comparaison du volume printanier médian en période de référence et en période future selon le scénario de gaz à effet de serre utilisé, pour les sorties directes et les différentes méthodes de post-traitements.**



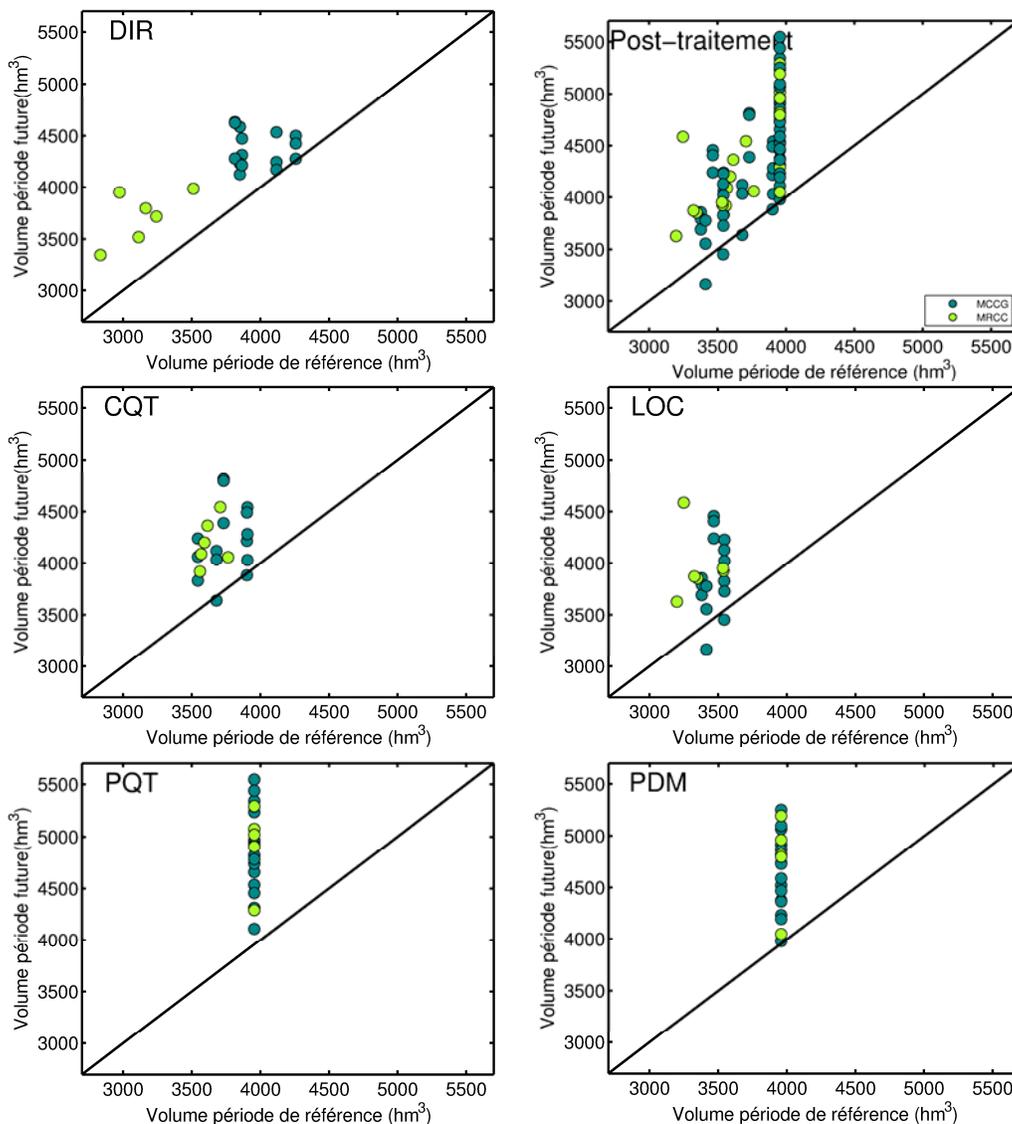
#### 7.4.4 Influence de la résolution du modèle

Une analyse exploratoire sur le volume printanier médian a aussi été faite graphiquement pour savoir si la résolution du modèle utilisé avait une influence sur le changement de volume de crue printanière. Le volume est calculé par la méthode à durée variable. L'exercice a été fait avec le modèle canadien uniquement. Le modèle régional canadien du climat (MRCC) à la résolution plus fine est représenté par les points verts pommes tandis que le modèle canadien de circulation générale (MCCG) (modèle global) à la résolution plus grossière est représenté par les points vert foncé.

Les volumes printaniers issus des simulations avec les scénarios climatiques du modèle global sont plus grands que ceux issus du modèle régional pour la méthode directe et dans une moindre mesure pour les méthodes de correction de biais. Cette constatation est moins apparente pour les bassins Saint-Paul, Moisie et Petit-Mécatina. Le taux de changement de volume entre la période de référence et la période future est équivalente peu importe la résolution du modèle.

On voit également que pour tous les bassins, sauf celui de la rivière Au Tonnerre, le volume médian futur est plus grand que le volume médian de référence dans au moins 75% des simulations et souvent dans plus de 90% des simulations.

**Figure 7-5 : Rivière Romaine : Comparaison du volume médian en période de référence et en période future pour les simulations des modèles global (vert foncé) et régional (vert pomme) canadien**



---

#### **7.4.5 Influence de la méthode de post-traitement**

Il y a lieu de s'interroger sur les méthodes de post-traitement à favoriser pour la correction du biais des simulations climatiques utilisée dans les modèles hydrologiques [Clavet-Gaumont, 2013] et [Gauvin-St-Denis, 2014]. Il est probable qu'il soit redondant d'utiliser plus d'un type de méthode pour la production des scénarios hydrologiques. Par exemple, peut-être est-il préférable de choisir une des deux méthodes de perturbation. Pour la correction de biais le choix est plus délicat car la méthode LOCI corrige l'occurrence des précipitations et la méthode des quantiles corrige le biais. Notons que dans son application pour ce projet, dans la méthode LOCI la valeur du seuil a été choisie pour correspondre à la valeur de la bruine (drizzle) dans les simulations climatiques et les valeurs journalières de pluie sous ce seuil ont tout simplement été enlevées. L'utilisation de ce seuil a pour explication qu'il y a souvent trop de jours avec de la précipitation en simulation climatique. Cette précipitation journalière n'est pas abondante et correspond environ à 0,1mm par jour. Le cumul de cette précipitation enlevée peut être redistribué sur les journées avec précipitations qui demeurent après l'exercice. Selon [Gauvin-St-Denis, 2014) une des méthodes proposées suggère de corriger ensuite le biais des précipitations par la méthode des quantiles. Le scénario de température quand à lui a son biais corrigé par la méthode des deltas dans le présent exercice.

---

## 8. Analyse fréquentielle

La loi choisie par défaut selon diverses études pour l'ajustement des extrêmes hydrologiques en période de référence et en période future dans nombre d'étude d'impact en changement climatique est la loi GEV. Toutefois, nos façons de faire sont différentes et par expérience nous préférons ajuster l'échantillon de données que nous avons avec la loi d'ajustement qui donne le meilleur résultat. Les échantillons provenant de la période future et de la période de référence sont aussi ajustés par la loi qui leur convient le mieux. Les lois sélectionnées pour l'analyse fréquentielle sont les suivantes:

- Log-normale 2 paramètres
- GEV
- Gumbel
- Weibull 2 paramètres
- Gamma
- Pearson Type 3

La méthode d'ajustement est basée sur le maximum de vraisemblance. Le critère BIC (Bayesian information criterion) est utilisé comme critère de sélection de la loi d'ajustement. Il ne faut pas oublier que plus de 7000 scénarios hydrologiques sont produits et ainsi plus de 40000 ajustements de lois réalisés. Le choix doit donc se faire de façon automatisée. Le tableau 8.1 montre les deux lois d'ajustements les plus fréquemment choisies pour chaque bassin versant (trois pour Petit-Mécatina) pour les volumes calculés sur une durée variable. Les meilleures lois pour la période de référence et pour la période future ont été sélectionnées. Dans certains cas, il s'agit de la même. Dans ces cas là, la deuxième loi sélectionnée est celle qui avait été choisie le plus grand nombre de fois pour la période de référence ou bien pour la période future.

**Tableau 8-1 : Lois d'ajustement choisies pour les volumes printaniers par bassins versant en période de référence et en période future**

Bassin versant	Loi	Total des scénarios(%)	
		Référence	Futur
Au Tonnerre	Log-Normale	53	33
	Gamma	17	32
Godbout	Gumbel	45	34
	Weibull	24	26
Saint-Paul	Log-Normale	50	12
	Weibull	20	44
Magpie	Gamma	59	40
	Weibull	16	28
Romaine	Gamma	60	31
	Weibull	18	37
Natashquan	Gamma	61	31
	Weibull	16	32
Moisie	Weibull	61	35
	Gumbel	7	30
Petit-Mécatina	Gamma	31	32
	Gumbel	44	15
	Weibull	15	38
Manic 5	Gamma	22	39
	Weibull	62	33

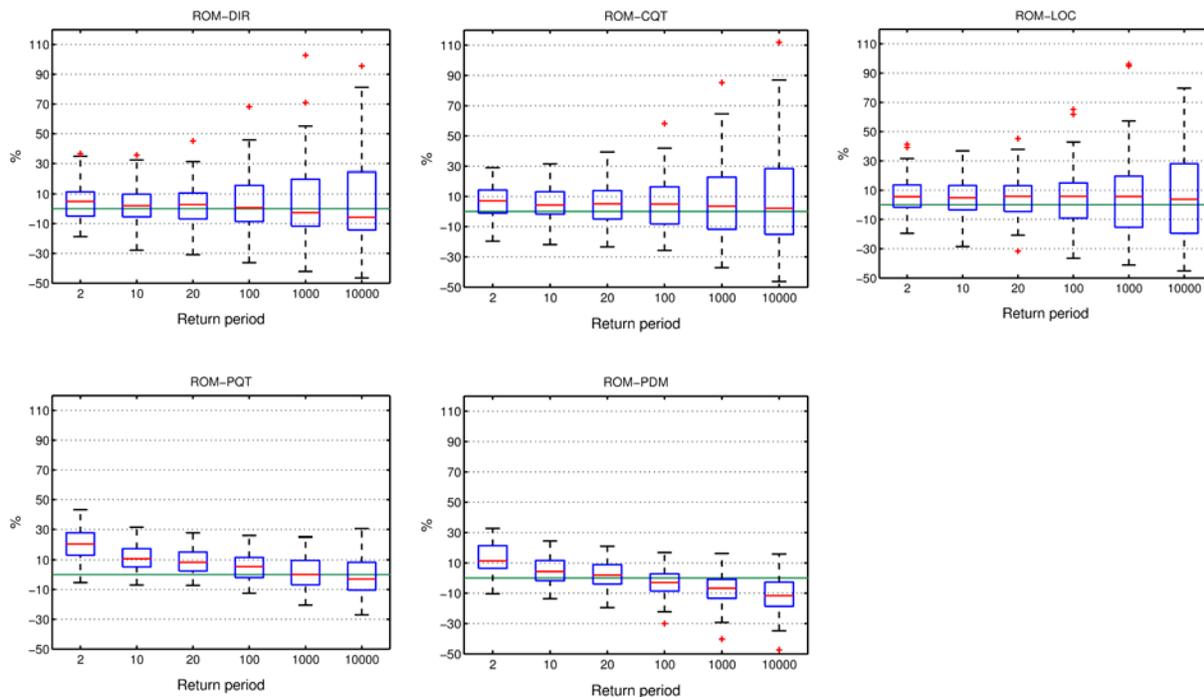
En période de référence le consensus sur la loi d'ajustement à retenir est plus fort qu'en période future. En moyenne, 55% des échantillons de volumes issus des scénarios hydrologiques sont ajustés par la même loi et plus de 70% sont partagés par deux lois. Pour la période future par contre, 37% des échantillons de volumes sont ajustés par la même loi et plus de 60% sont partagés entre 2 lois (56% pour le plus faible).

Les lois d'ajustement qui sont le plus souvent choisies par le critère BIC sont les lois Gamma et Weibull, toutes deux à 2 paramètres.

Les quantiles sont calculés selon les lois choisies en période de référence et future pour chaque scénario hydrologique et l'écart normalisé par la période de référence est calculé par  $((FUT-REF)/REF)$ . Le résultat pour la rivière Romaine est à la figure 8.1. Les résultats sont présentés sous forme de diagramme en boîte. La ligne verte départage les écarts négatifs des positifs. Les résultats pour les autres bassins versants sont en annexe mais sont présentés par période de retour plutôt que par bassin. Cela permet de voir l'impact du post-traitement sur l'ajustement.

Le tableau 8.3 collige la valeur des médianes (en rouge sur la figure 8.1 et en annexe).

**Figure 8-1: Écart relatif entre le volume printanier futur et présent pour le bassin Romaine**



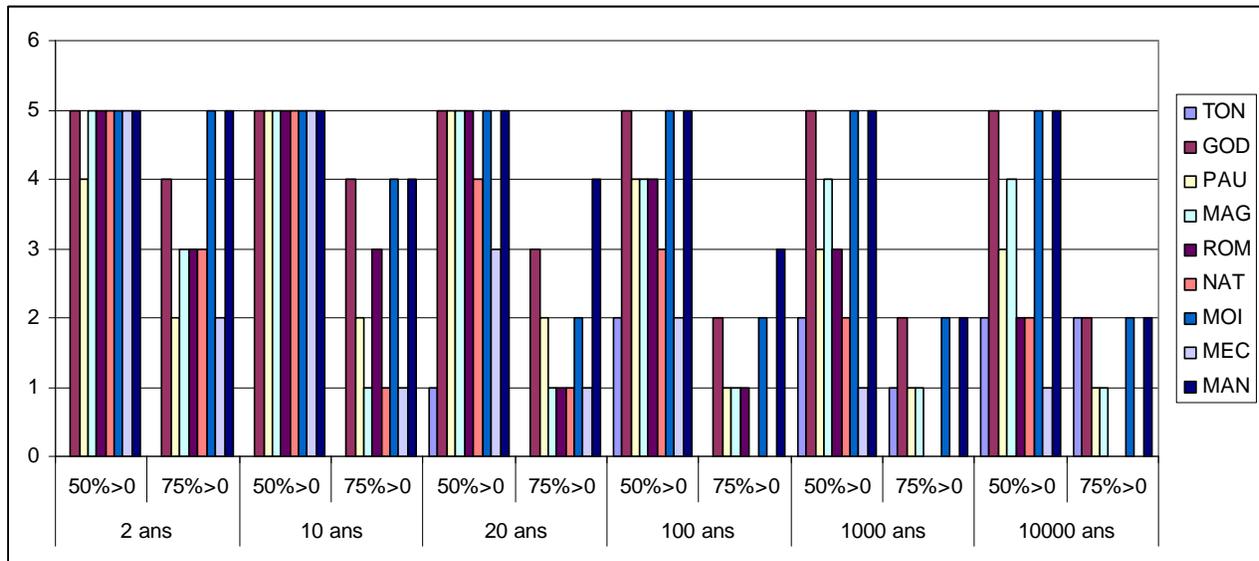
Les résultats varient selon la méthode de post-traitement utilisée pour corriger le biais entre les observations météorologiques et le modèle, tel qu'on peut le voir aux figures en annexes. Le tableau 8.2 collige le nombre de méthodes de post-traitements pour lesquelles il y a plus de scénarios hydrologiques qui prévoient une hausse du volume dans le futur. Ceci est compté pour plus de la moitié des scénarios et plus de 75% des scénarios (environ).

**Tableau 8-2: Nombre de scénarios dont le volume futur dépasse le volume présent**

Bassin	2 ans		10 ans		20 ans		100 ans		1000 ans		10000 ans	
	50%>0	75%>0	50%>0	75%>0	50%>0	75%>0	50%>0	75%>0	50%>0	75%>0	50%>0	75%>0
TON	0	0	0	0	1	0	2	0	2	1	2	2
GOD	5	4	5	4	5	3	5	2	5	2	5	2
PAU	4	2	5	2	5	2	4	1	3	1	3	1
MAG	5	3	5	1	5	1	4	1	4	1	4	1
ROM	5	3	5	3	5	1	4	1	3	0	2	0
NAT	5	3	5	1	4	1	3	0	2	0	2	0
MOI	5	5	5	4	5	2	5	2	5	2	5	2
MEC	5	2	5	1	3	1	2	0	1	0	1	0
MAN	5	5	5	4	5	4	5	3	5	2	5	2

Le tableau 8.2 est mis sous forme de figure ci-dessous.

**Figure 8-2 : Nombre de scénarios appariés dont le volume futur dépasse le volume présent pour les 9 bassins de la Côte-Nord pour différentes périodes de retour (2, 10, 20, 100, 1000 et 10000 ans)**



Par exemple, pour une période de retour de 2 ans pour le bassin versant de la rivière Godbout (GOD), plus de 50% des scénarios hydrologiques prévoient un volume de crue futur plus grand que le volume de référence peu importe la méthode de post-traitement. Par contre, si on cible plus de 75% de scénarios hydrologiques appartenant au même ensemble de post-traitement prévoyant un volume futur supérieur à celui du présent, alors seulement 4 méthodes de post-traitement remplissent cette condition.

Ci-dessous, on trouve les valeurs médianes de l'écart relatif entre volume futur et volume de référence tel qu'illustré en annexe.

**Tableau 8-3 : Médiane des écarts relatifs entre le volume printanier futur et celui en période de référence avec scénarios appariés**

période de retour (ans)	DIR								
	Au Tonnerre	Godbout	St-Paul	Magpie	Romaine	Natashquan	Moisie	Petit-Mécatina	Manic5
2	0.4	3.1	2.7	5.3	4.9	4.0	6.1	1.4	6.3
10	-0.4	4.5	2.0	3.4	2.1	2.3	5.8	0.3	4.5
20	-0.4	4.5	0.9	3.5	2.8	1.9	4.8	-1.1	4.5
100	-2.7	5.0	-0.3	3.4	0.7	-0.5	4.9	-2.1	5.7
1000	-4.8	2.9	-0.9	0.7	-2.5	-1.1	6.3	-4.7	4.0
10000	-5.4	2.0	-0.3	1.4	-5.8	-0.9	6.6	-4.3	6.4
période de retour (ans)	CQT								
	Au Tonnerre	Godbout	St-Paul	Magpie	Romaine	Natashquan	Moisie	Petit-Mécatina	Manic5
2	-5.6	5.8	5.8	6.7	7.1	6.6	8.6	3.6	10.37
10	-4.1	4.9	4.4	3.2	4.3	3.1	6.6	1.4	9.09
20	-3.8	5.8	3.0	3.3	5.1	2.1	6.5	0.6	8.92
100	-3.6	6.3	1.5	4.2	5.0	1.8	6.7	-0.4	8.01
1000	-3.1	6.2	3.4	3.5	3.5	-0.4	8.0	-1.2	7.72
10000	-4.6	5.1	2.8	3.8	2.2	-0.6	7.8	-3.7	7.36
période de retour (ans)	LOC								
	Au Tonnerre	Godbout	St-Paul	Magpie	Romaine	Natashquan	Moisie	Petit-Mécatina	Manic5
2	-2.3	7.1	2.9	8.2	5.6	5.7	10.8	2.4	12.5
10	-0.3	6.4	3.6	5.0	4.9	3.2	7.4	2.0	9.9
20	-1.3	6.4	4.3	3.1	5.9	2.2	8.5	2.4	8.4
100	-2.6	6.3	5.3	3.7	5.8	3.1	6.6	2.3	9.5
1000	-3.2	6.1	3.1	2.5	5.7	3.3	5.5	2.9	9.1
10000	-3.8	6.3	2.2	1.4	3.8	2.1	1.7	3.5	8.3
période de retour (ans)	PQT								
	Au Tonnerre	Godbout	St-Paul	Magpie	Romaine	Natashquan	Moisie	Petit-Mécatina	Manic5
2	-9.4	13.5	9.6	15.7	20.6	16.2	16.2	12.8	17.3
10	-1.0	17.5	11.5	10.5	10.6	7.2	13.8	9.5	13.5
20	1.4	18.2	11.4	10.3	8.3	5.6	16.2	6.6	14.0
100	5.1	18.8	10.4	7.6	5.4	4.3	17.5	2.0	15.6
1000	8.2	21.2	7.2	7.9	0.2	3.2	25.7	-4.3	19.0
10000	7.7	22.7	3.2	7.7	-2.9	2.9	34.9	-8.8	23.1
période de retour (ans)	PDM								
	Au Tonnerre	Godbout	St-Paul	Magpie	Romaine	Natashquan	Moisie	Petit-Mécatina	Manic5
2	-19.1	6.9	-0.4	7.6	11.3	8.2	9.8	4.7	14.9
10	-6.2	13.5	4.8	4.8	4.3	1.1	9.5	2.0	8.6
20	-3.3	15.1	4.6	3.2	2.0	-0.5	10.3	-0.6	8.6
100	2.8	16.6	1.7	0.6	-3.0	-3.0	13.4	-7.4	10.2
1000	10.3	19.6	-2.0	-1.5	-6.7	-6.6	18.6	-16.8	13.1
10000	11.7	21.2	-6.7	-1.4	-11.6	-10.5	23.2	-25.7	15.4

Lorsque les scénarios climatiques sont simulés avec les scénarios post-traités par une méthode des perturbations (PQT et PDM) les différences entre le volume futur et de référence sont plus marquées, surtout si les biais sont estimés par la méthode des quantiles (PQT). On remarque aussi que les différences entre les volumes futurs et de références s'amoindrissent lorsque la période de retour augmente. Notons que cette dernière constatation est fautive pour le bassin de la rivière Au Tonnerre puisque c'est l'inverse qui se produit.

A titre d'essai, l'annexe 10.9 présentent l'écart relatif entre le volume printanier futur et de référence pour les scénarios hydrologiques simulés avec les scénarios climatiques du modèle global et régional canadien. Avec ces scénarios, il est clair que le volume futur sera plus grand que le volume de référence.

---

## 9. Conclusions

Les résultats obtenus pour 9 bassins de la Côte-Nord montrent une tendance à la hausse du volume de crue printanière. Cette tendance n'est toutefois pas uniforme pour tous les bassins étudiés.

La réalisation de cette étude nous a permis de constater qu'il y a une bonne marge d'incertitude associée à l'étude d'impact des changements climatiques sur une variable hydrologique. Les sources d'incertitudes sur les résultats sont la méthode de post-traitement des simulations climatiques, le modèle climatique utilisé, la résolution des simulations climatiques, la paramétrisation du modèle hydrologique, le modèle hydrologique lui-même et la méthode de calcul du volume. Il faut continuer de réaliser des études hydrologiques en utilisant des scénarios climatiques. Les modèles de climats se raffinent, leurs résolutions devient plus fines et permet de mieux simuler la physique de l'atmosphère. Les scénarios de gaz à effet de serre sont de plus en plus réalistes et les méthodes de post-traitement des données sont améliorées. En intégrant les études d'impacts en hydrologie dûs aux changements climatiques dans nos façons de faire nous apprendrons à nous en servir de manière plus efficace.

Des recherches sont encore à faire sur la calibration des modèles hydrologiques pour leur utilisation en simulation de scénarios hydrologiques et aussi sur l'impact du post-traitement sur lesdits scénarios. Faut-il utiliser l'ensemble des simulations climatiques ou bien peut-on sélectionner certaines simulations plus représentatives de la région étudiée?

Beaucoup de questions attendent encore des réponses.

---

## 10. Références

Daigle, A.(2010).**Routine d'optimisation de SSARR**. INRS-ETE.

USACE (1987). **SSARR Model –Streamflow Synthesis And Reservoir Regulation- User manual**. août 1987.

GIEC.(2007). **Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat**. Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages

Côté, H. et al. (2012). **Site web Ouranos, section FAQ**. <http://www.ouranos.ca/fr/faq/>

Gauvin St-Denis, B. (2014). **Évaluation des méthodes de post-traitement simples**. Groupe Scénarios et Services Climatiques Ouranos. En rédaction.

Clavet-Gaumont,J. et al.(2013).**Impact de la méthode de post-traitement sur la période de référence et sur le signal de changement hydrologique**. IREQ.Octobre 2013.

Pacher, G.W. (2008). **Analyse Objective des Hydrogrammes pour l'Étude des Changements Climatiques**. Présentation Power Point. 17 décembre 2008.

Pacher, G.W. (2009). **Détermination objective des paramètres des hydrogrammes**. Document word. 23 avril 2009.

Merleau, J. (2012). **Sommaire des comparaisons de différentes versions des programmes de Guenther Pacher**. IREQ. Document Word. juillet 2012

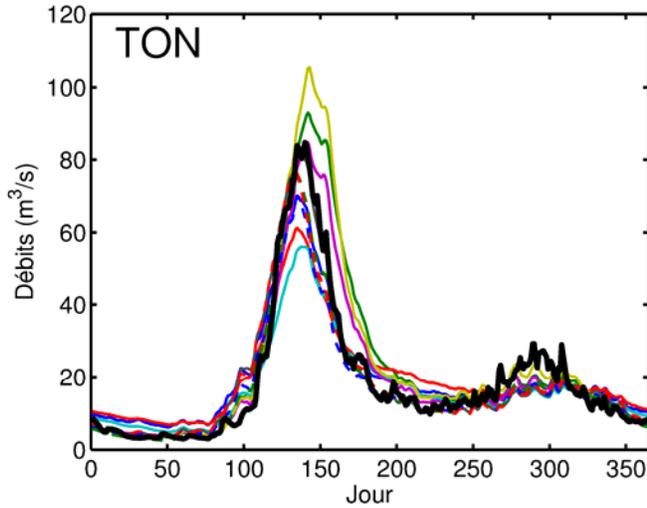
# 11. Annexe

## 11.1 Apports manquants

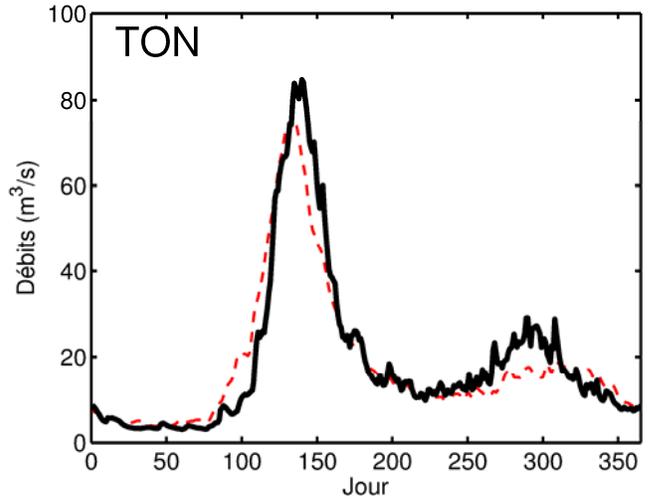
Bassin versant	Période d'apports manquants pour la période d'enregistrement indiquée au tableau 5.1
Outardes	Aucun apport manquants
Manicouagan	Aucun apport manquants
Godbout	7 mai – 30 mai 2002 5 mars -10 avril 2003
Moisie	1 janvier 1967 au 25 aout 1967 25 septembre 1999 au 23 février 2000 26 février au 28 mars 2000 (douteux) 31 mars – 22 septembre 2006 ( douteux)
Au Tonnerre	31 janvier -21 avril 54 29 sept 1969-1janv 1970 9 mai-29 juillet 1970 1 janvier- 6 aout 1972 30 sept 1986 – 2 mai 1987
Magpie	28 juin – 13 septembre 2005
Romaine	8 juillet – 14 aout 1960 5 avril – 10 septembre 2007
Natashquan	Aucun apport manquants
Petit Mécatina	1 janvier – 30 mai 1967 20 aout 1969 – 31 décembre 1970 ( entrecoupé de période avec débits observé ) 1 octobre – 10 octobre 1980 26 mars – 11 juin 1981 6 aout -1993 – 3 aout 1994 29 avril – 21 aout 1996 16 mai – 8 juillet 1997 11 octobre 2005 – 16 septembre 2006
St-Paul	

## 11.2 Étalonnage du modèle SSARR sur les bassins versants : Choix des paramétrisations

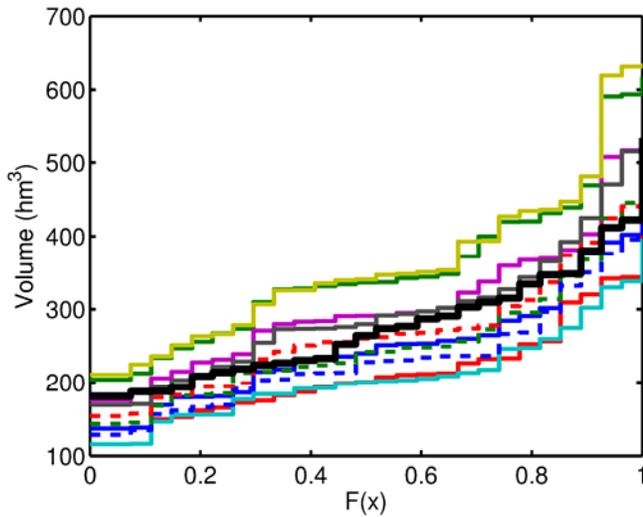
Hydrogramme moyen :  
toutes les paramétrisations ; obs en noir



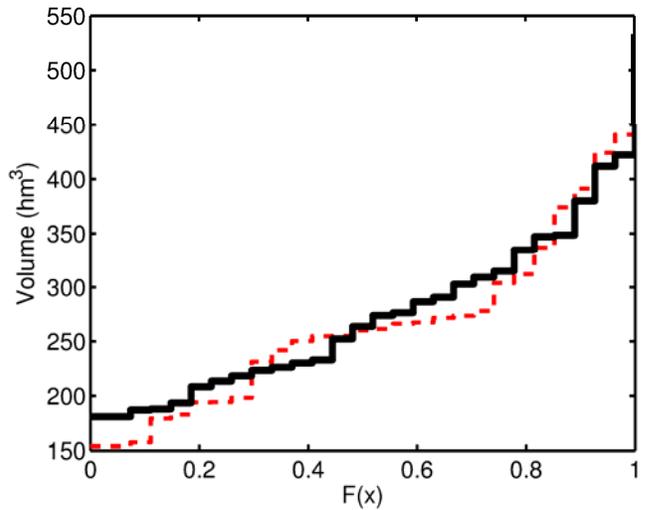
paramétrisation choisie ; obs en noir



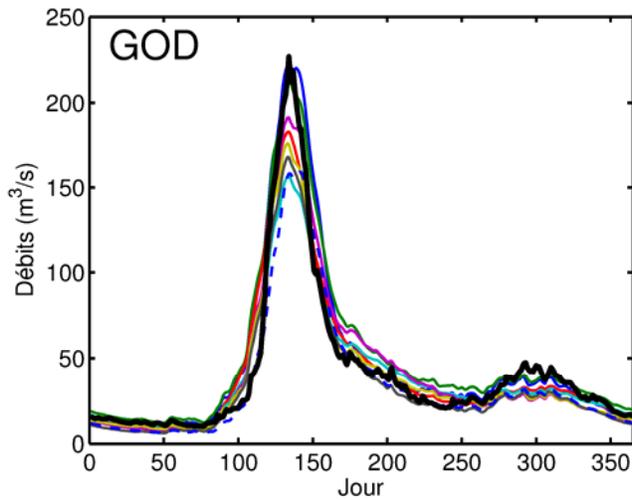
Distribution empirique du volume printanier :  
toutes les paramétrisations ; obs en noir



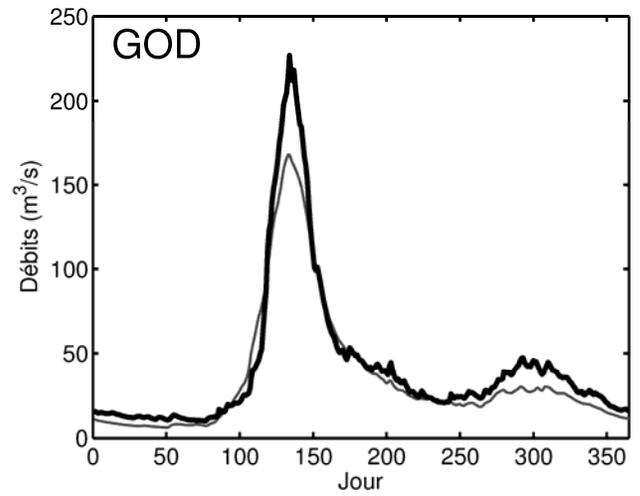
paramétrisation choisie ; obs en noir



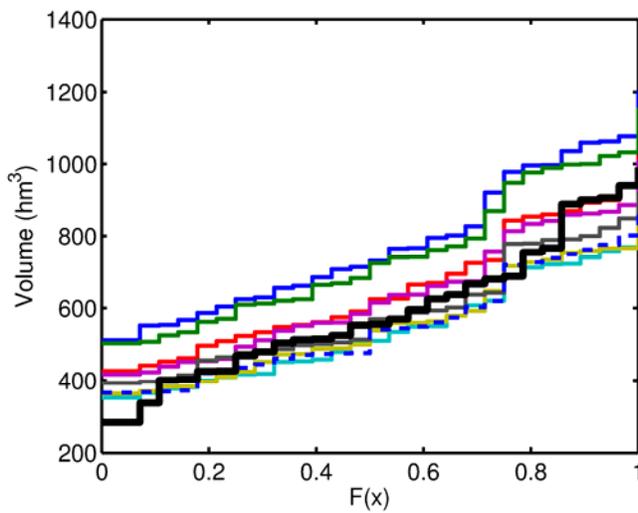
**Hydrogramme moyen :**  
toutes les paramétrisations ; obs en noir



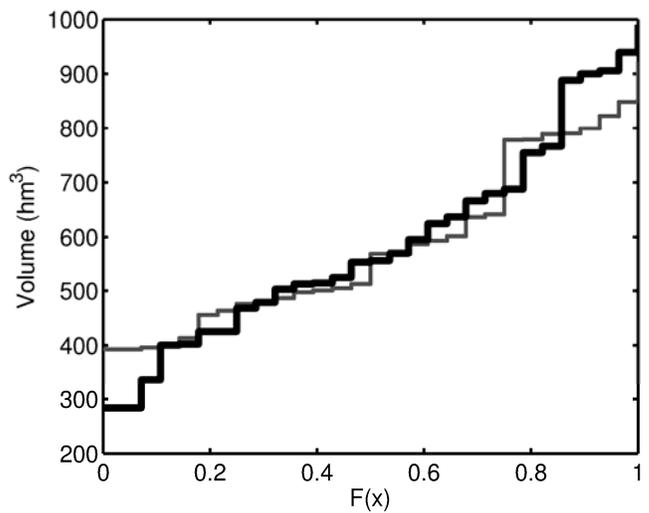
**paramétrisation choisie ; obs en noir**



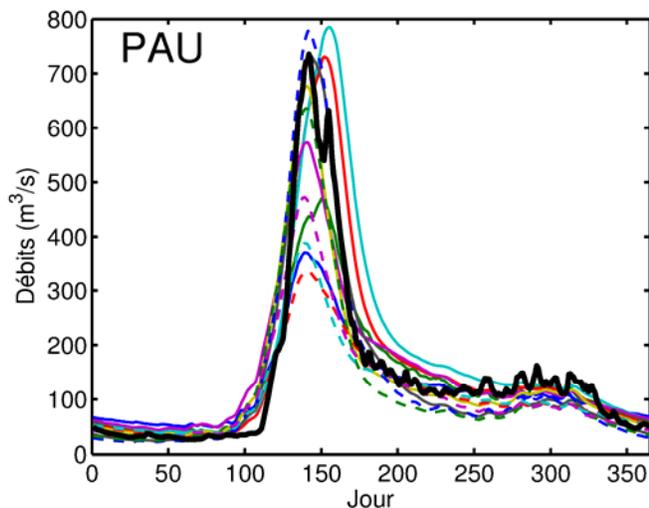
**Distribution empirique du volume printanier :**  
toutes les paramétrisations ; obs en noir



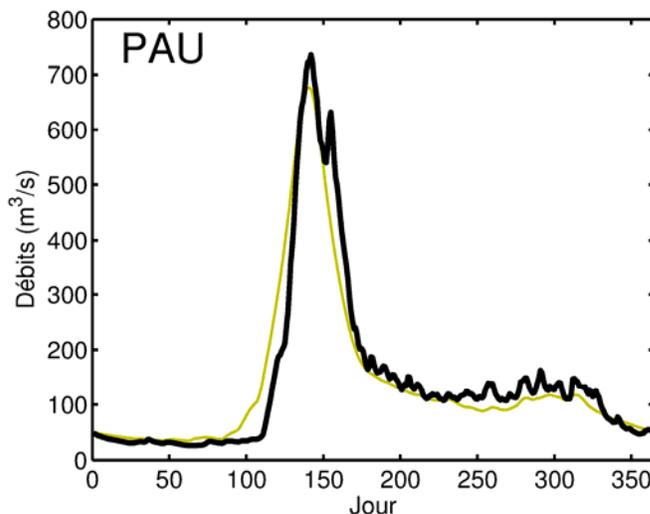
**paramétrisation choisie ; obs en noir**



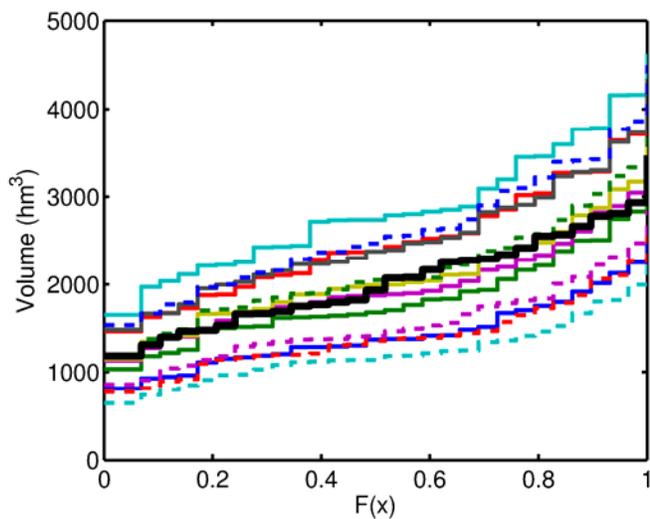
**Hydrogramme moyen :**  
toutes les paramétrisations ; obs en noir



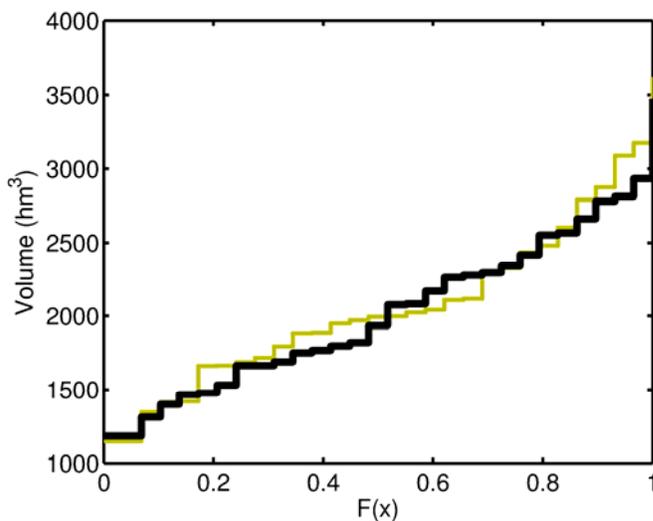
**paramétrisation choisie ; obs en noir**

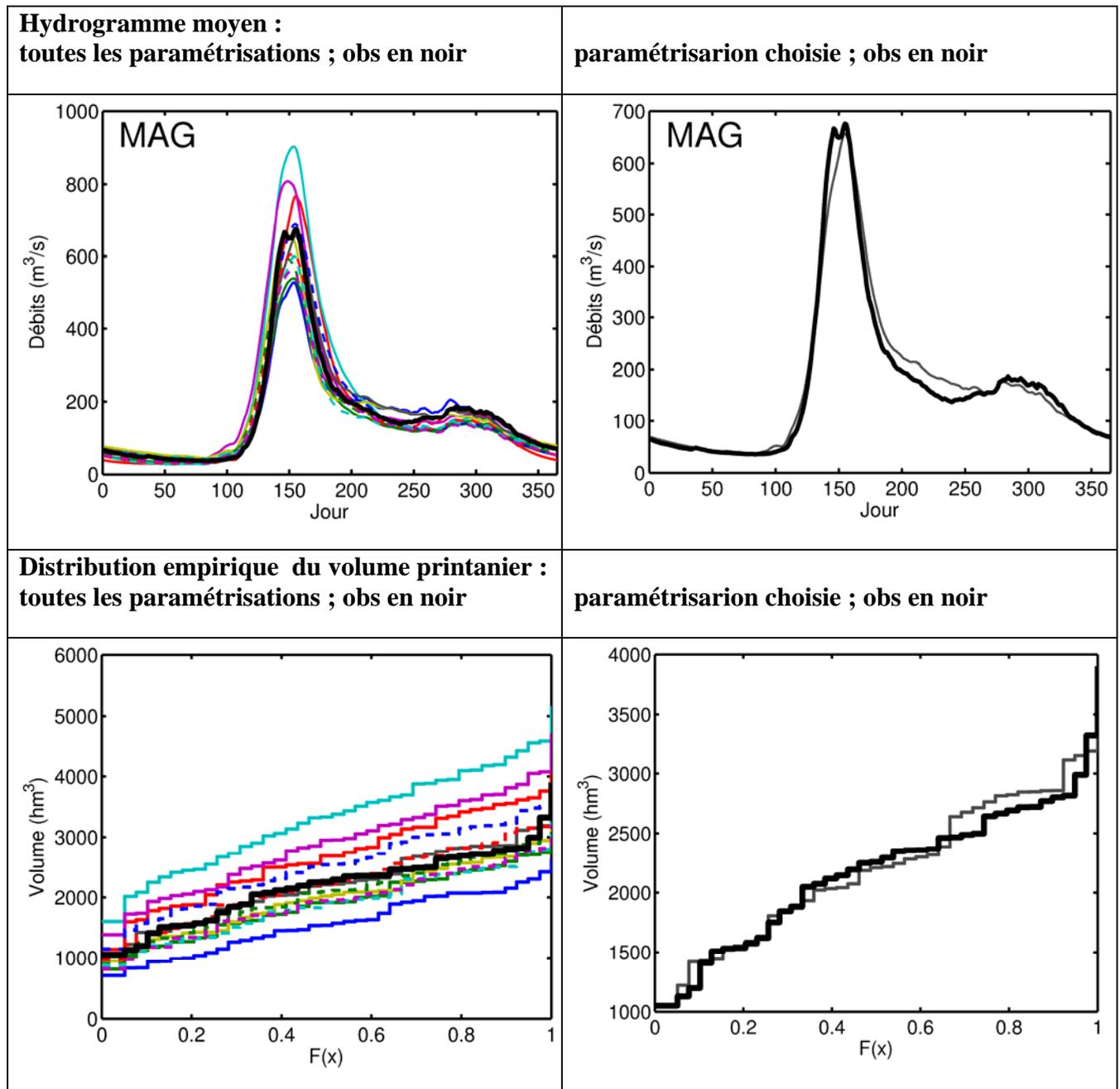


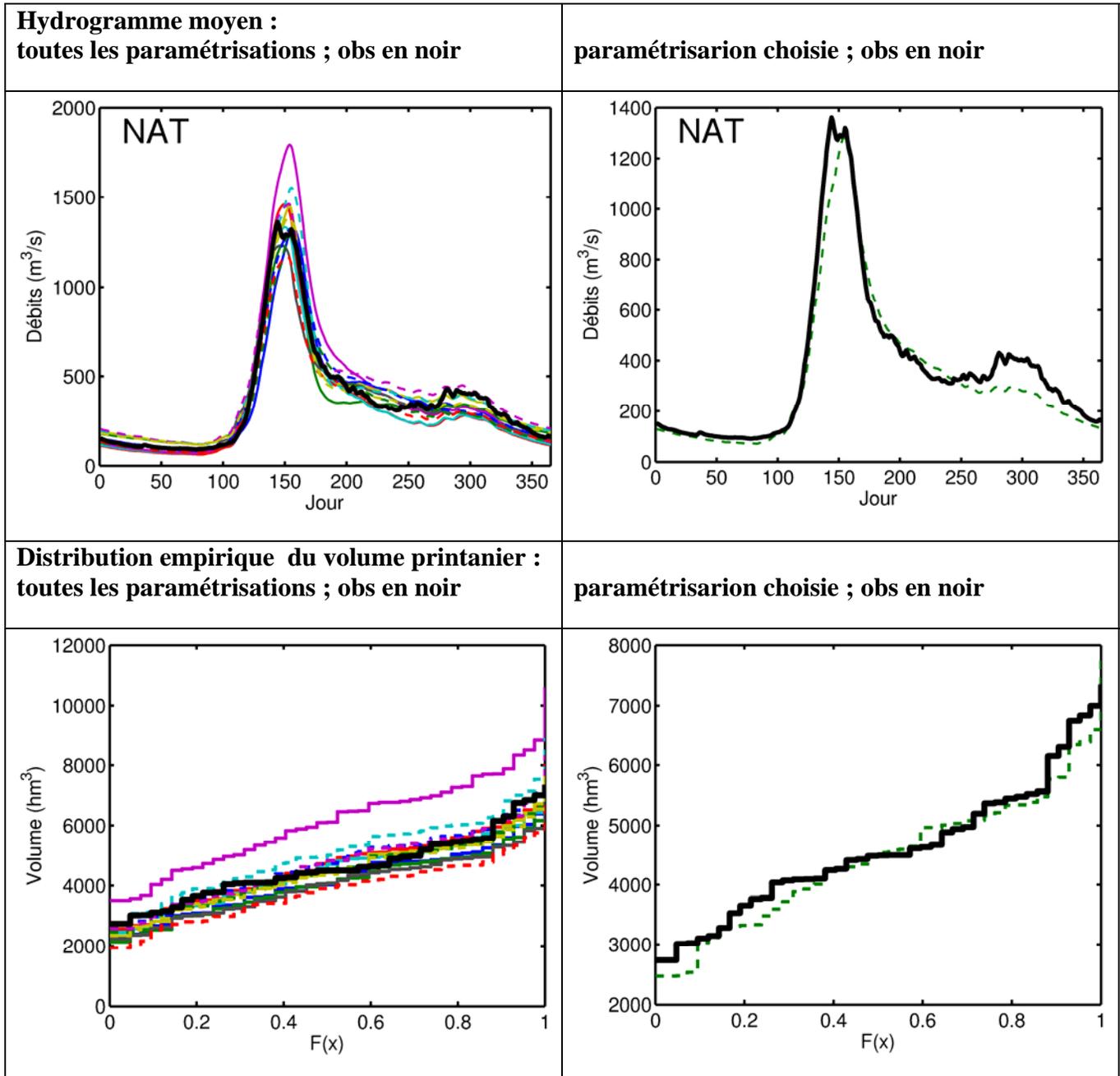
**Distribution empirique du volume printanier :**  
toutes les paramétrisations ; obs en noir

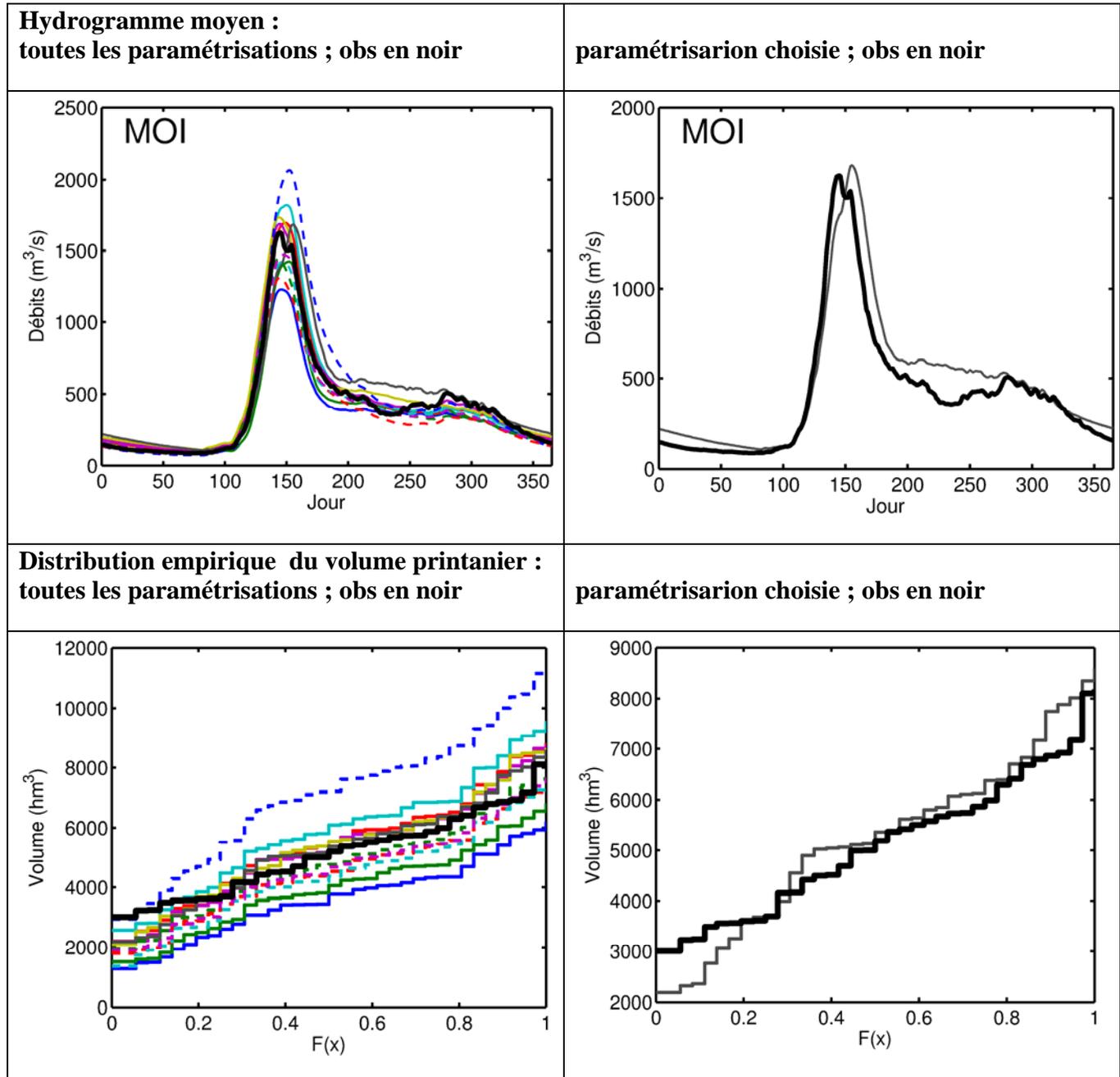


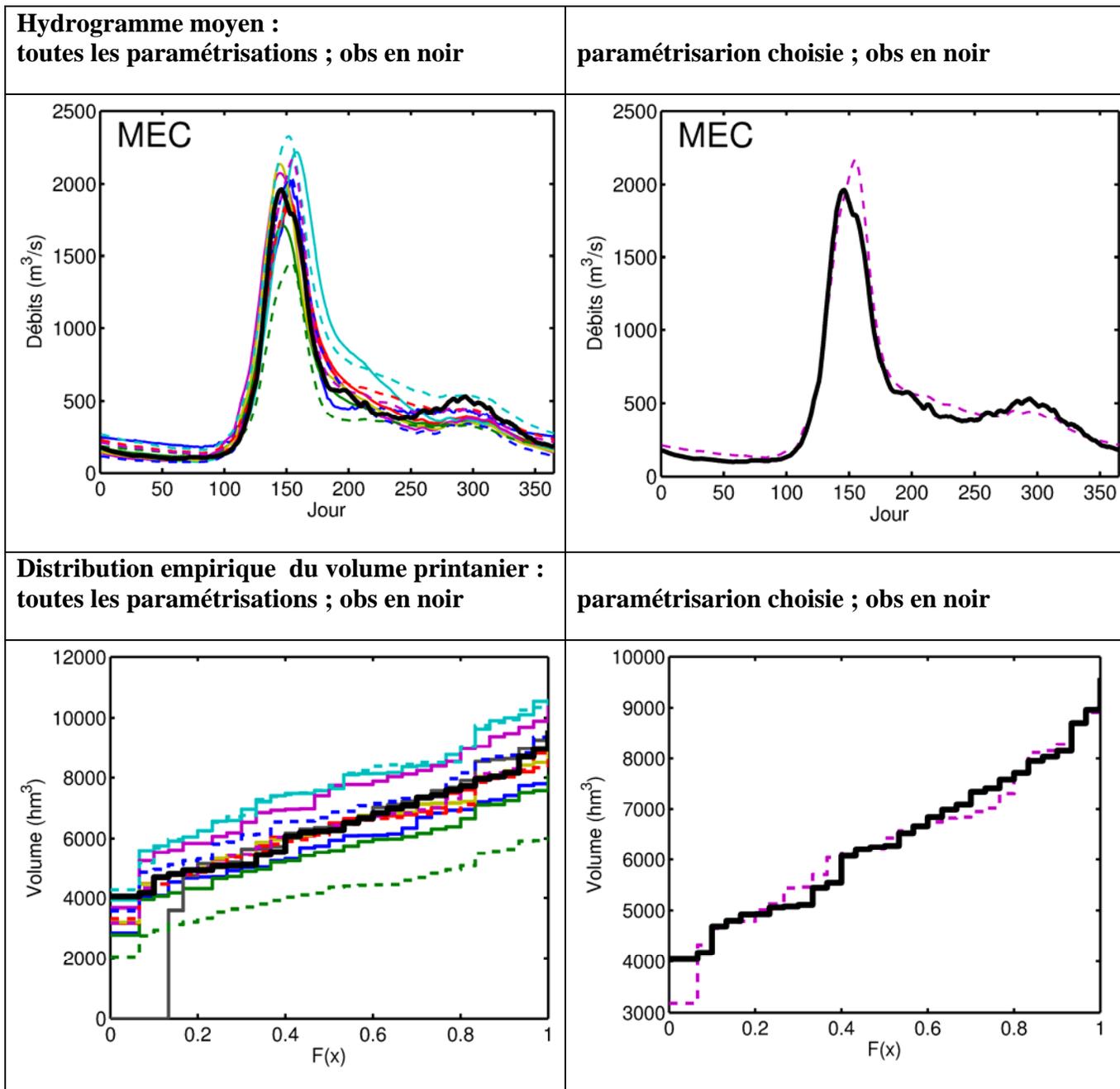
**paramétrisation choisie ; obs en noir**



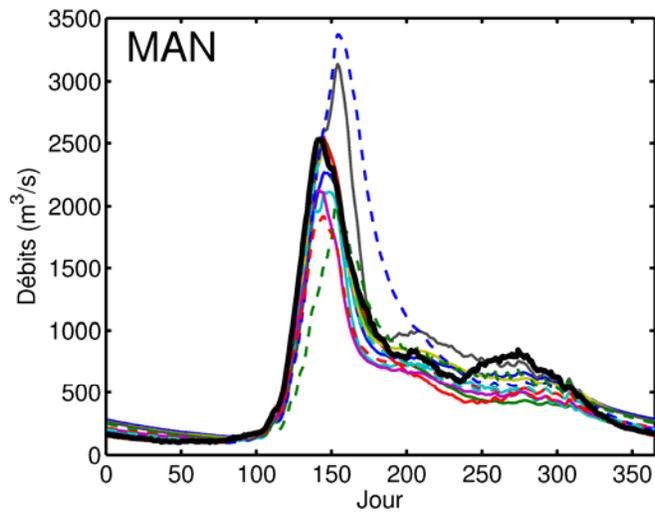




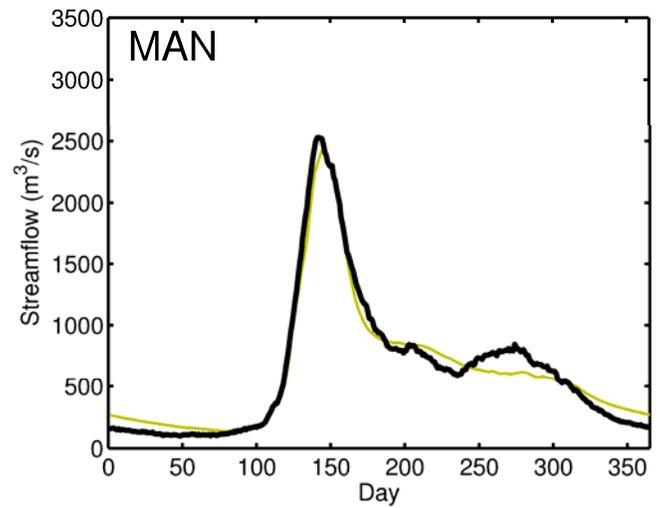




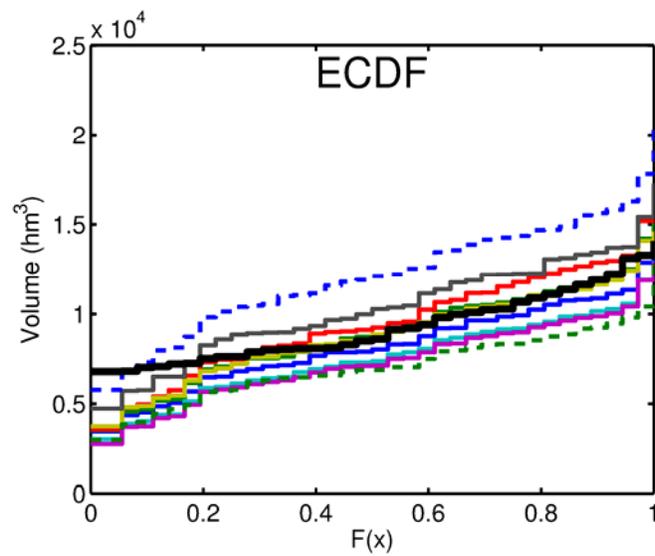
**Hydrogramme moyen :**  
toutes les paramétrisations ; obs en noir



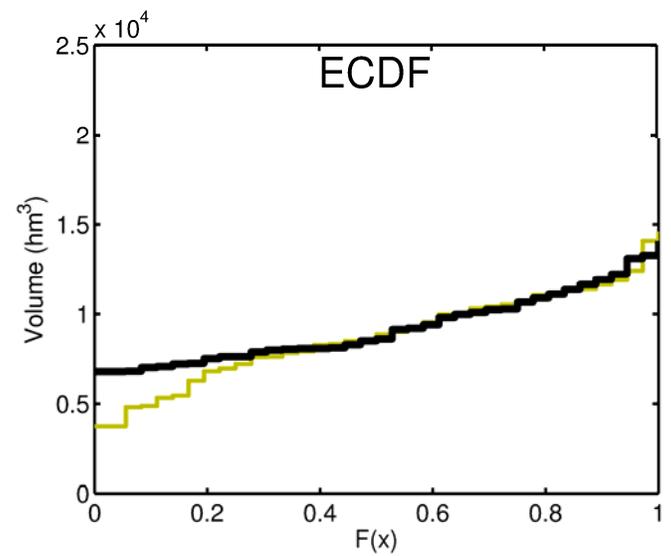
**paramétrisation choisie ; obs en noir**



**Distribution empirique du volume printanier :**  
toutes les paramétrisations ; obs en noir

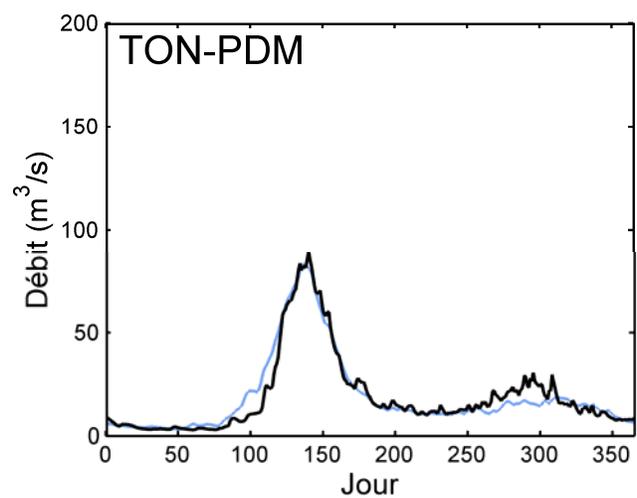
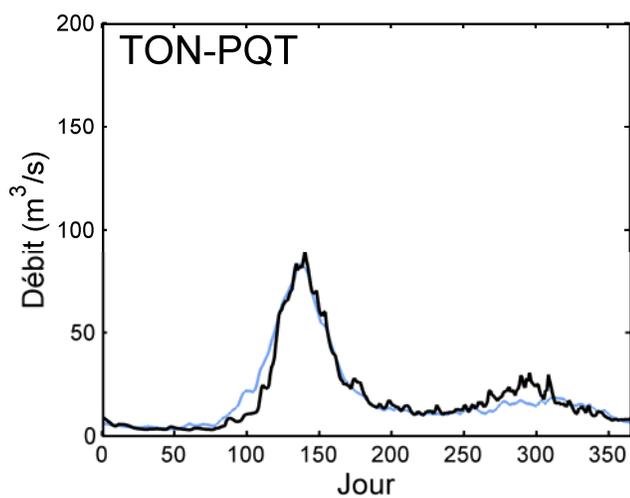
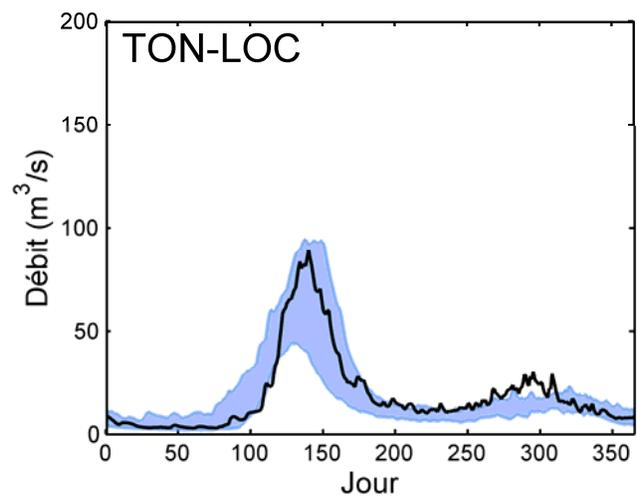
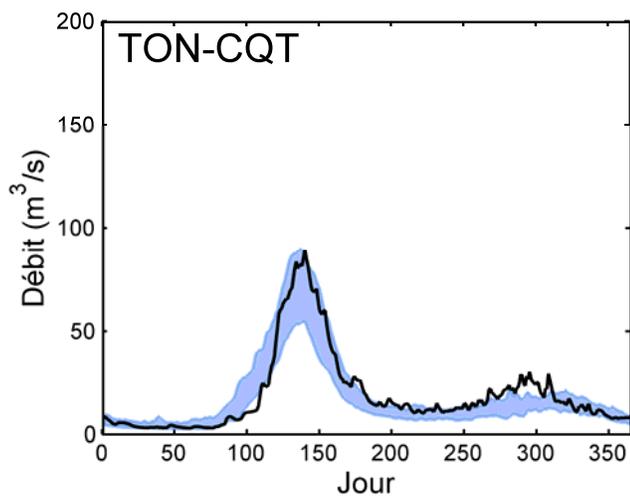
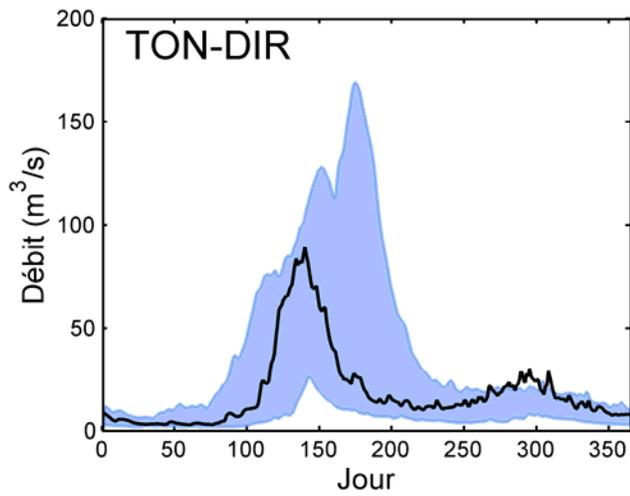


**paramétrisation choisie ; obs en noir**

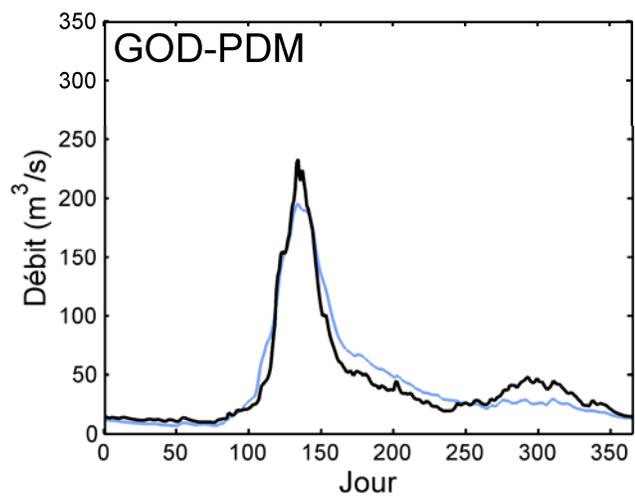
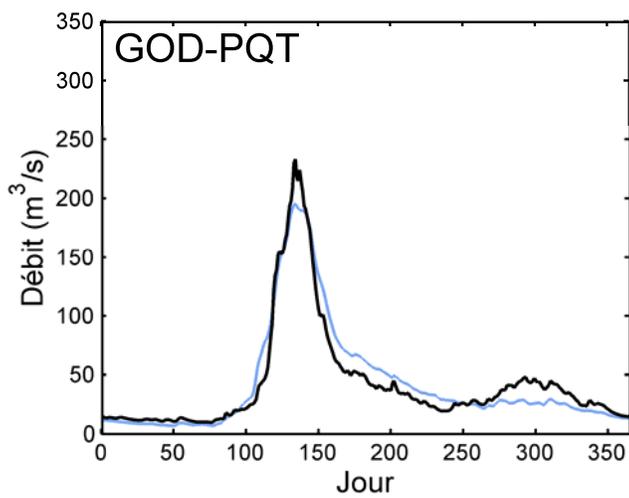
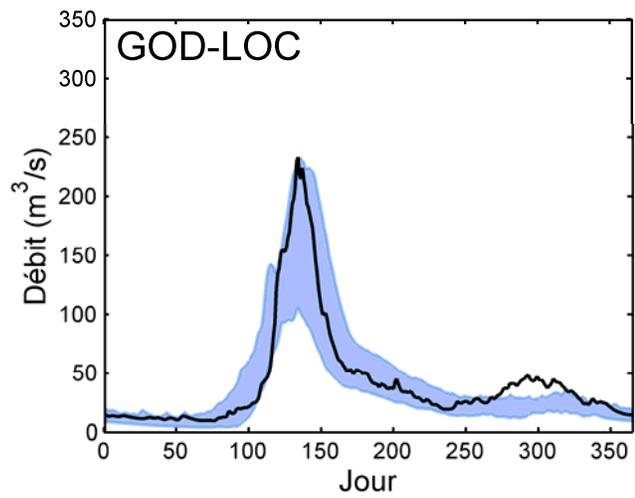
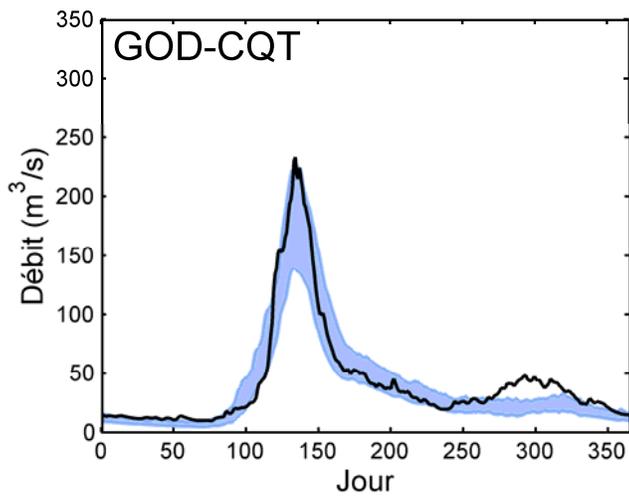
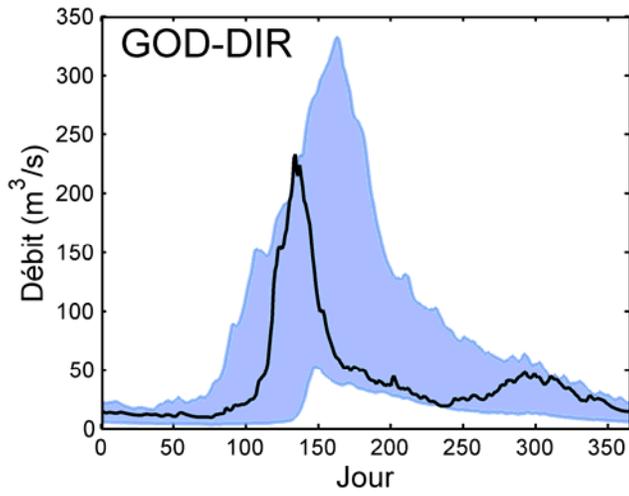


### **11.3 Débits observés et courbes enveloppe des scénarios hydrologiques en période de référence du 5<sup>ème</sup> au 95<sup>ème</sup> percentile et de l'ensemble des scénarios**

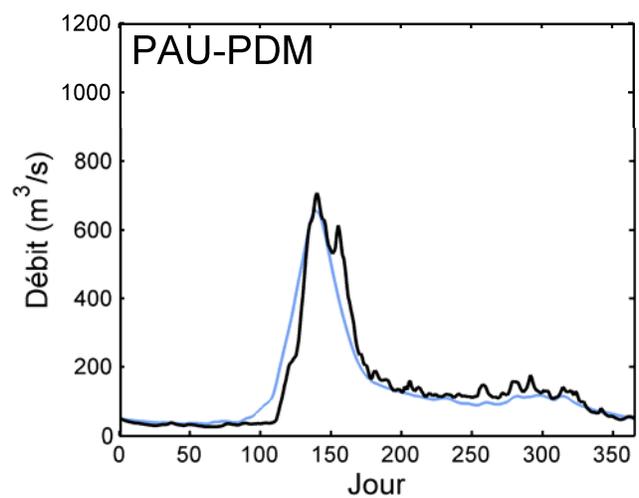
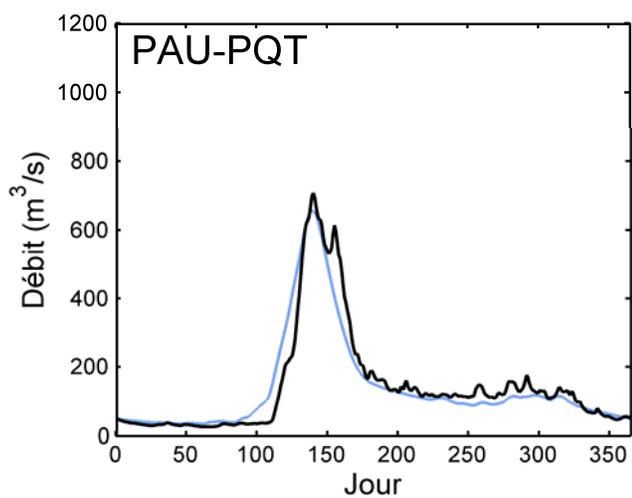
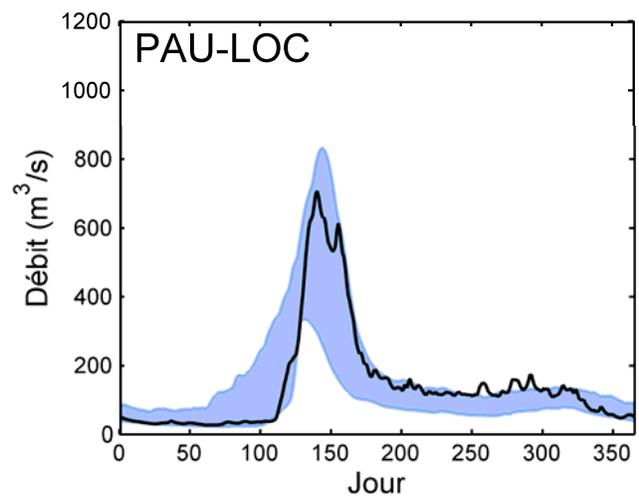
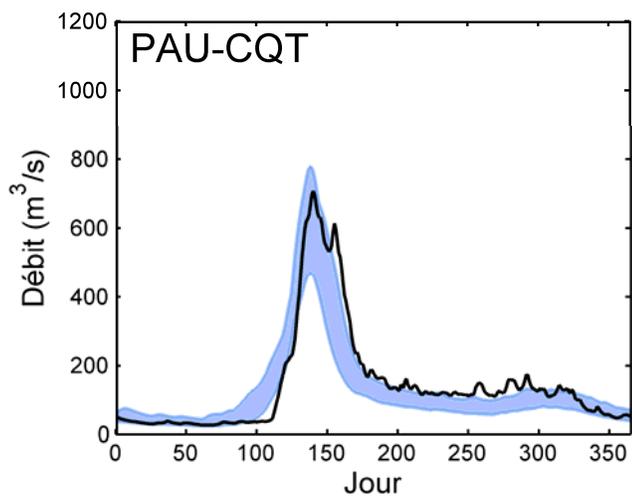
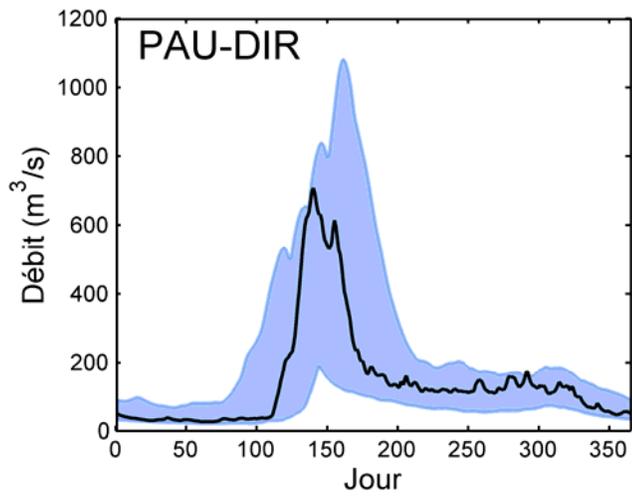
### 11.3.1 Au Tonnerre



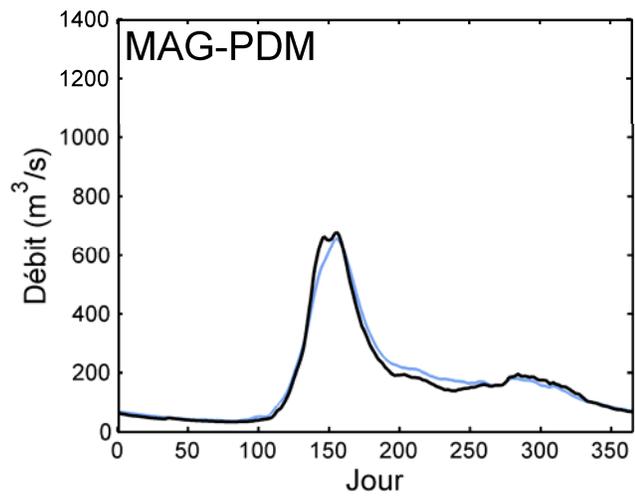
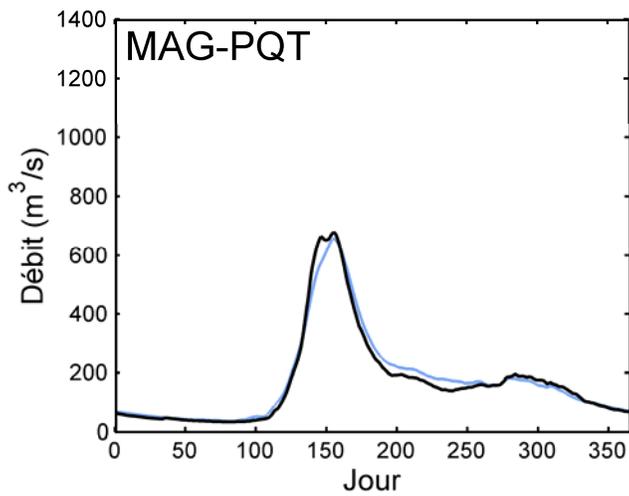
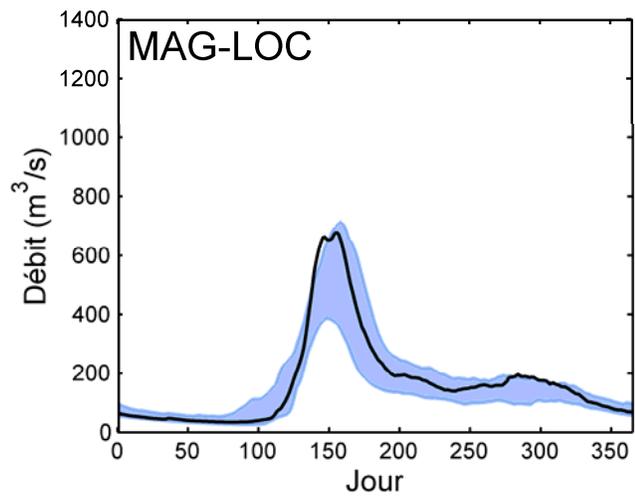
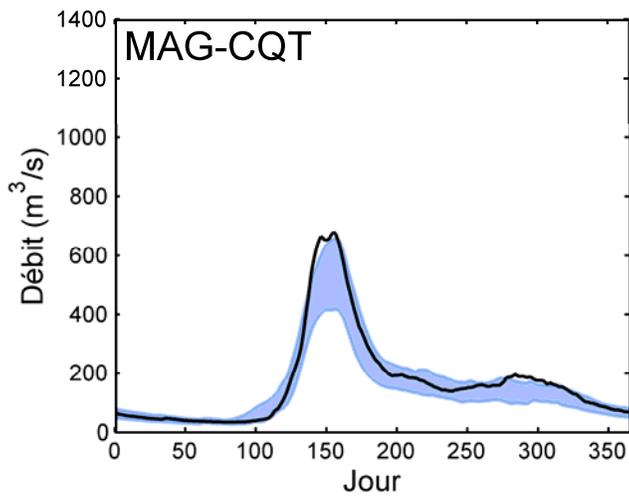
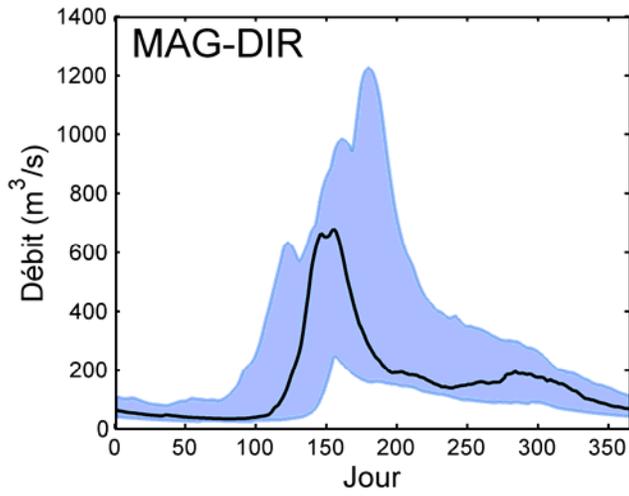
### 11.3.2 Godbout



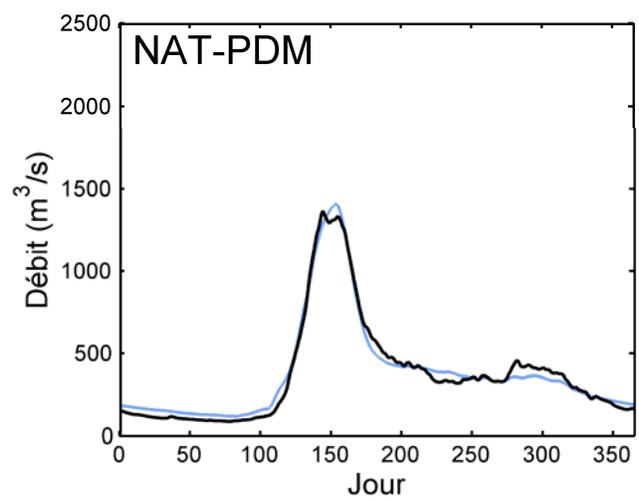
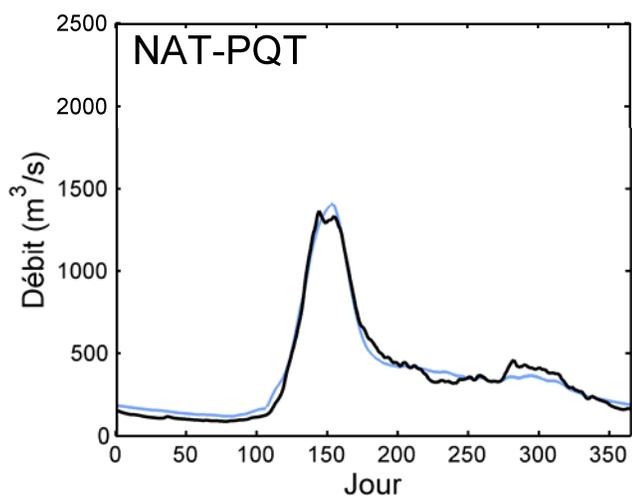
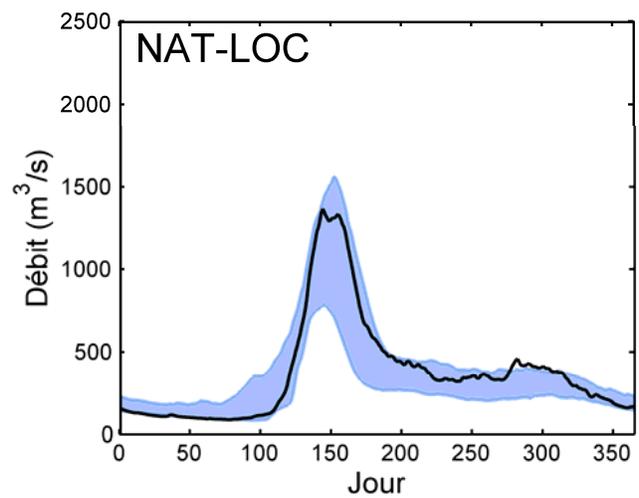
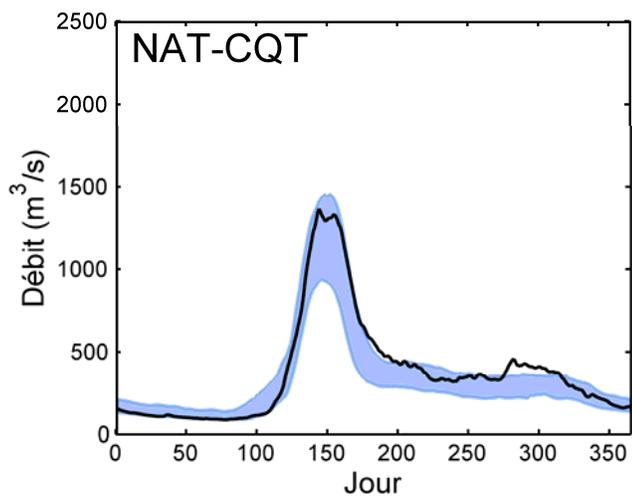
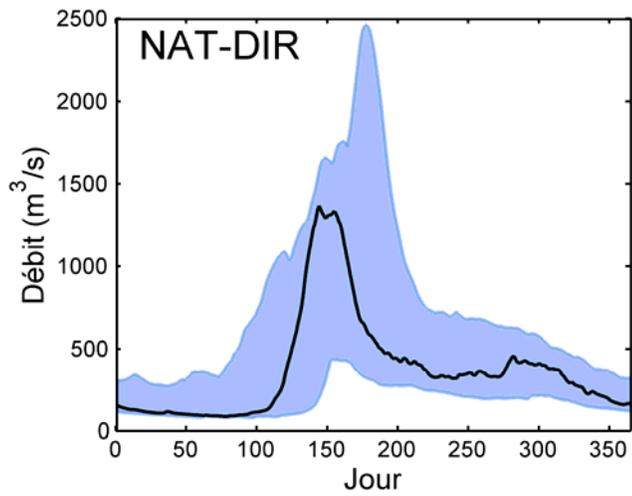
### 11.3.3 Saint-Paul



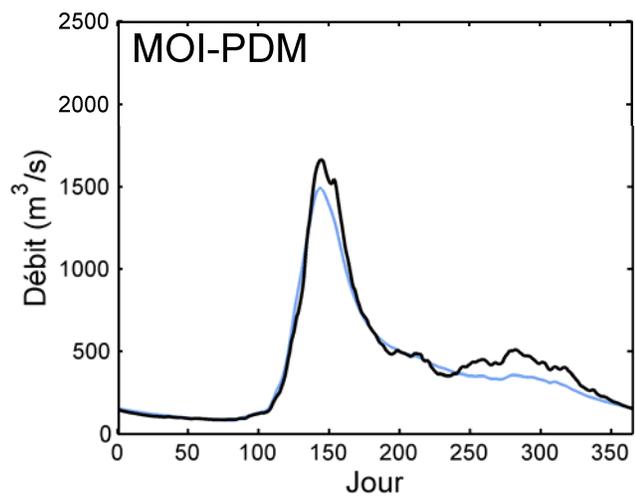
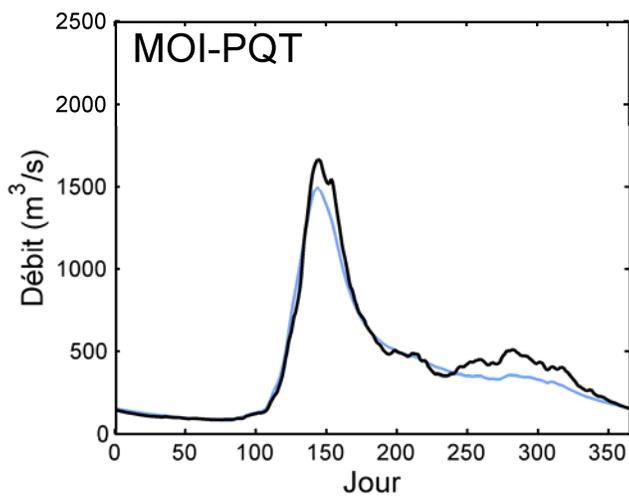
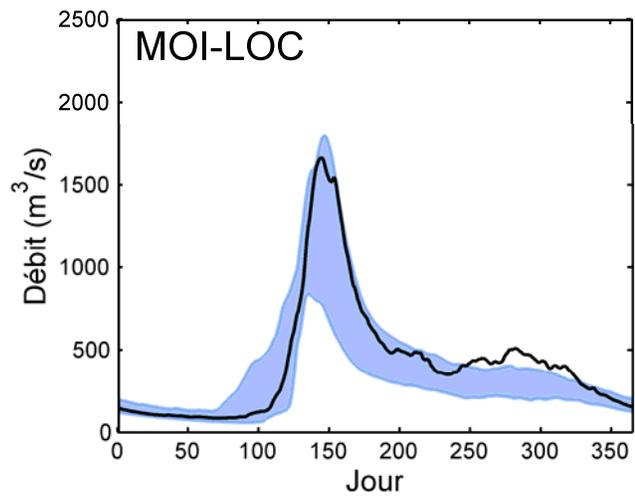
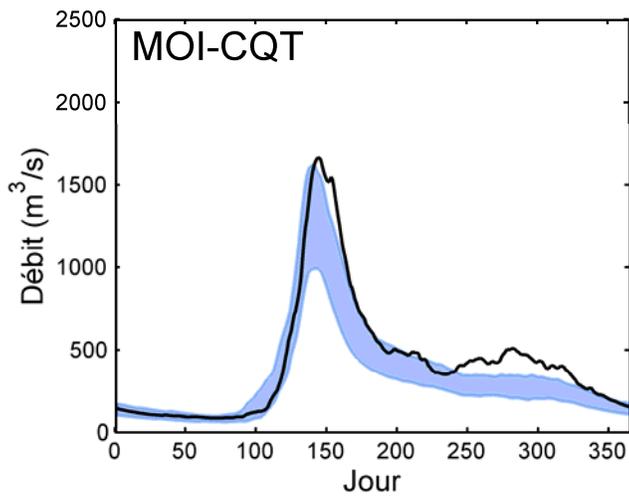
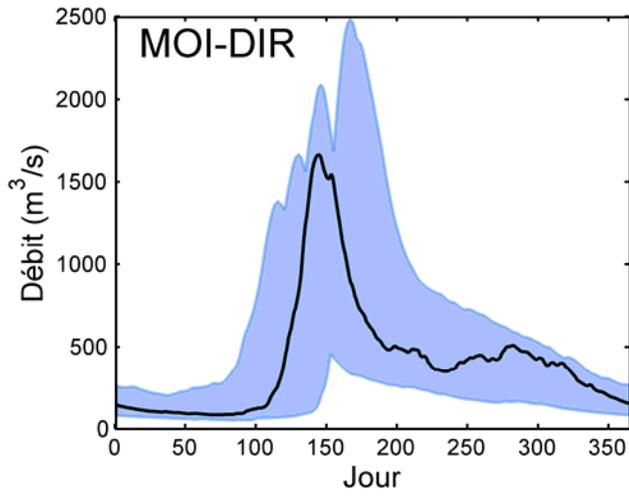
### 11.3.4 Magpie



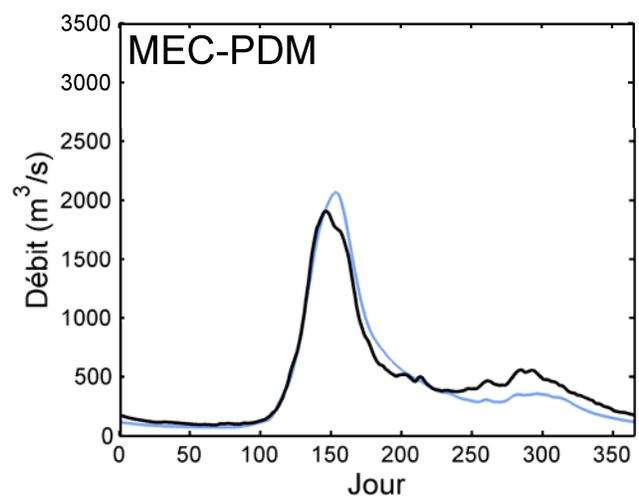
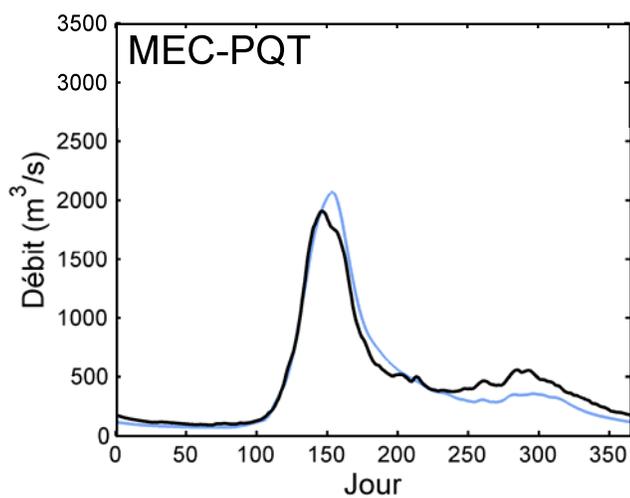
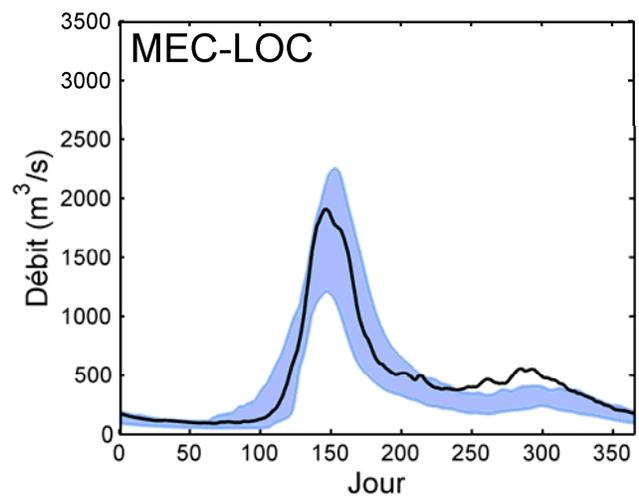
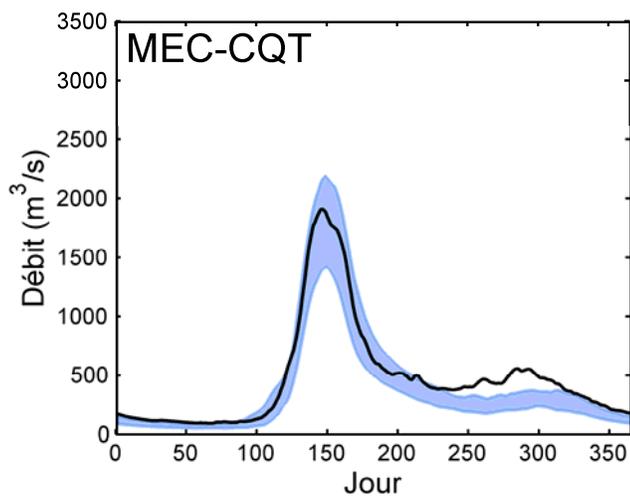
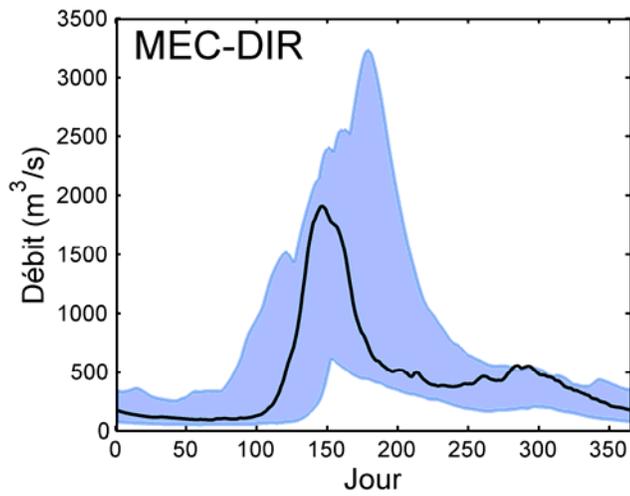
### 11.3.5 Natashquan



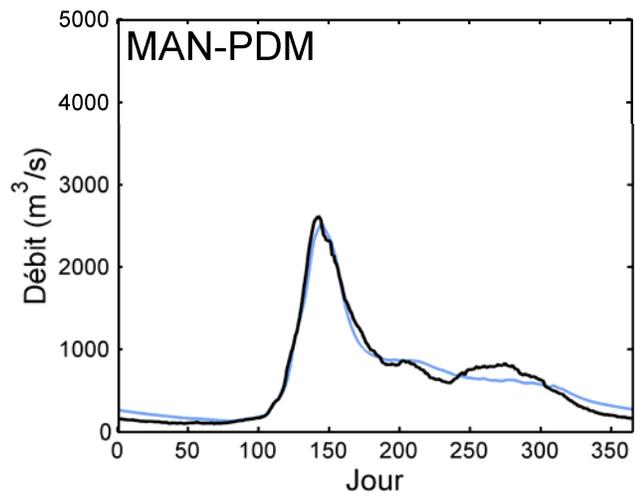
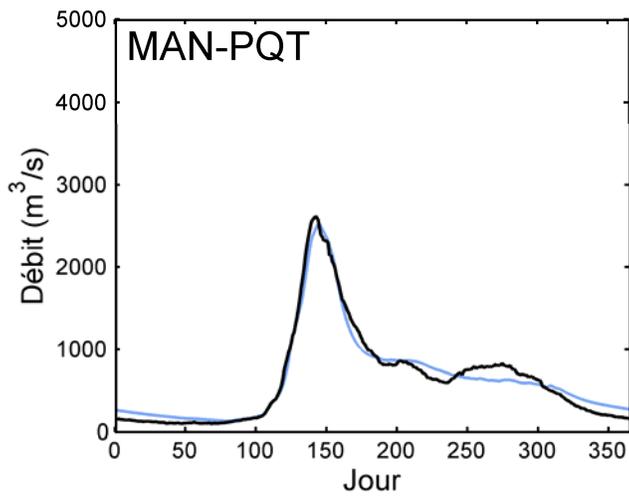
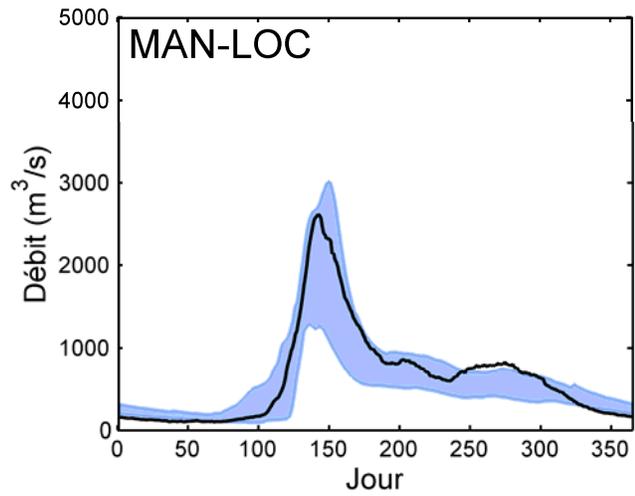
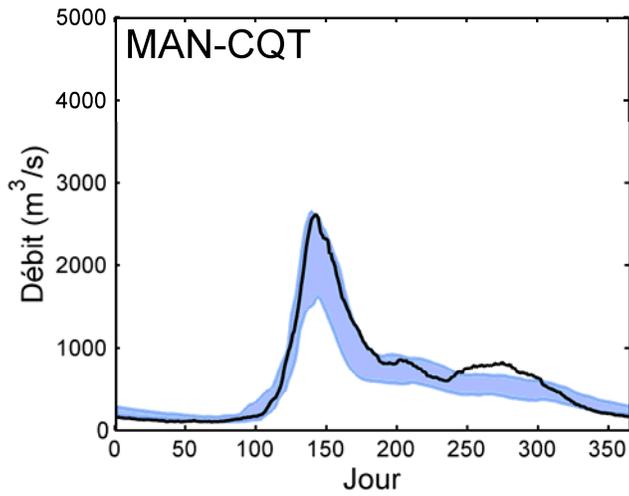
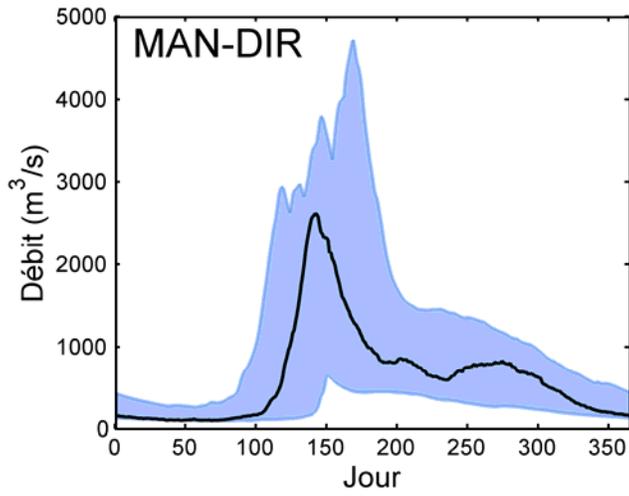
### 11.3.6 Moisie



### 11.3.7 Petit-Mécatina



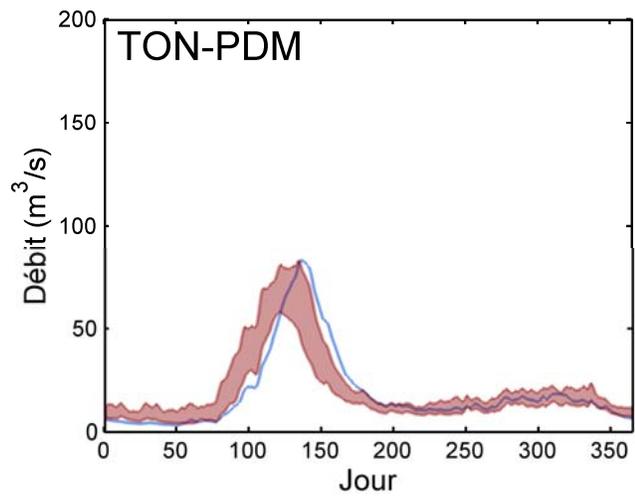
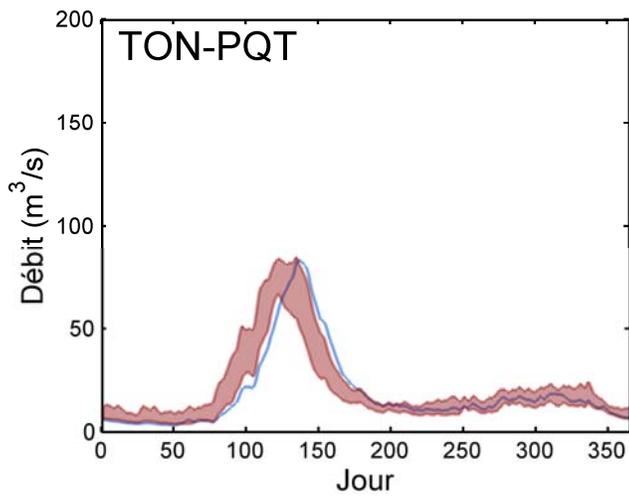
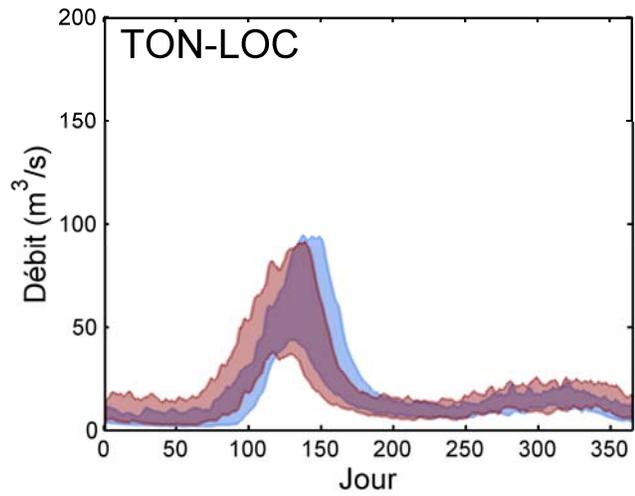
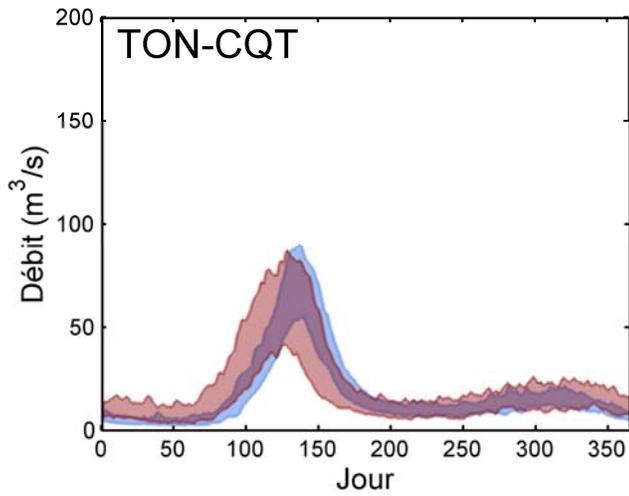
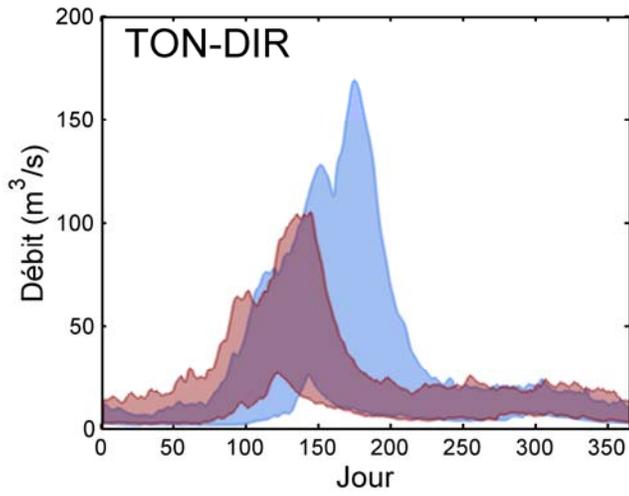
### 11.3.8 Manic 5



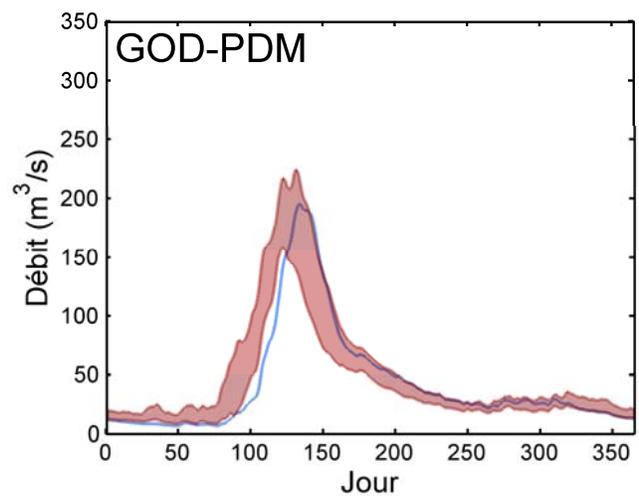
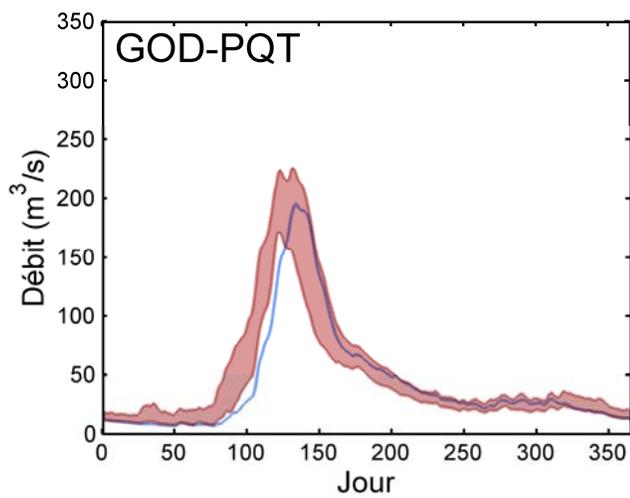
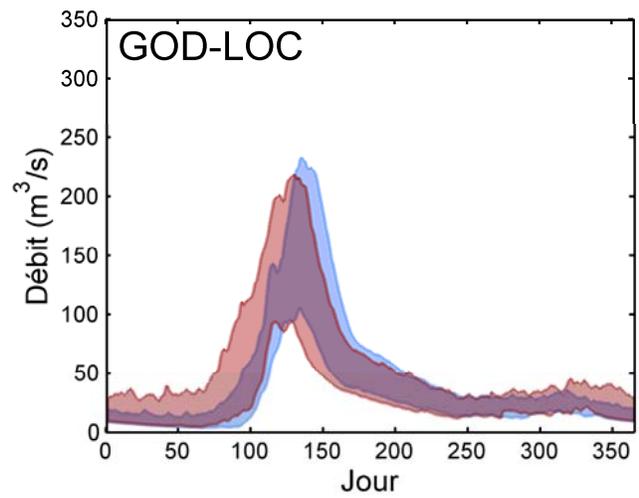
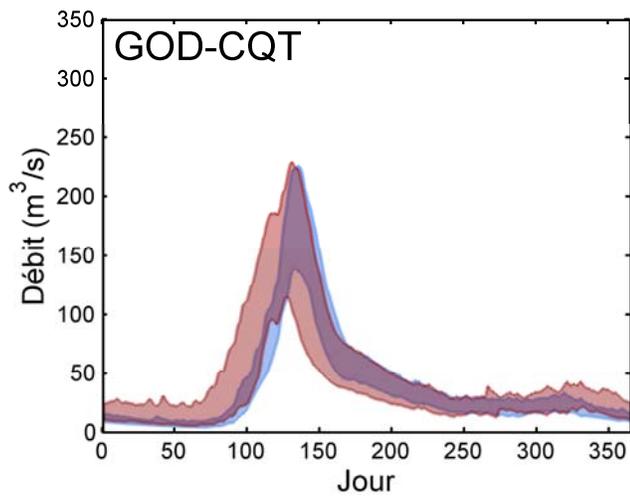
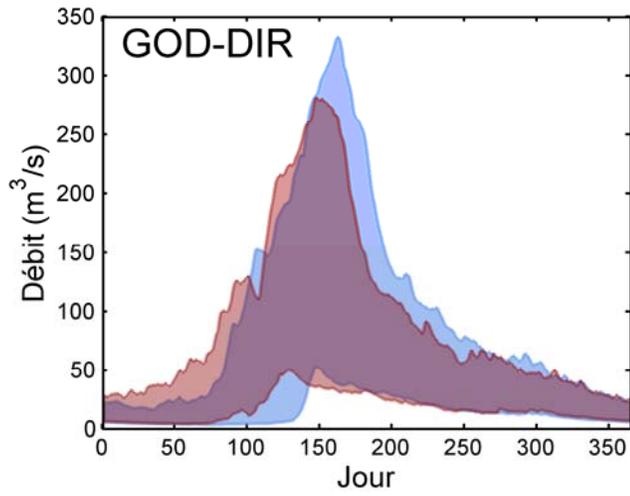
---

## 11.4 Scénarios hydrologiques : Courbes enveloppes en période de référence (bleue) et en période future (rose)

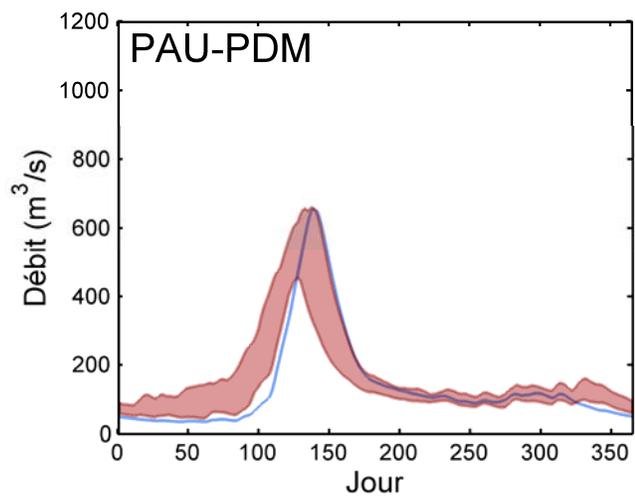
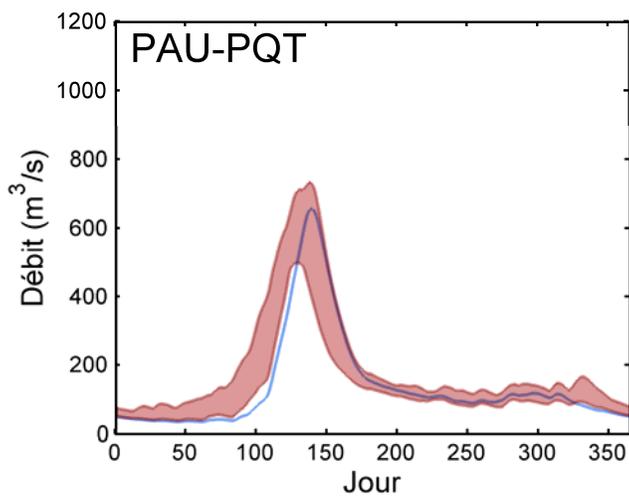
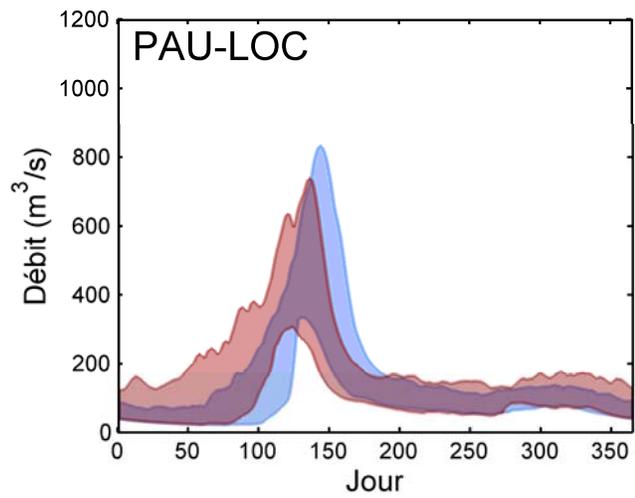
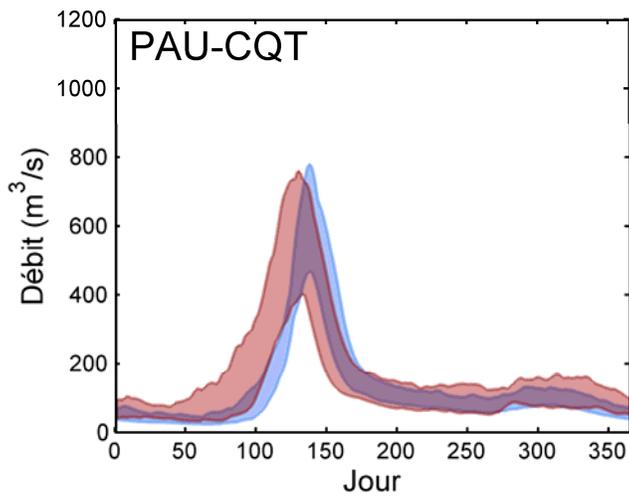
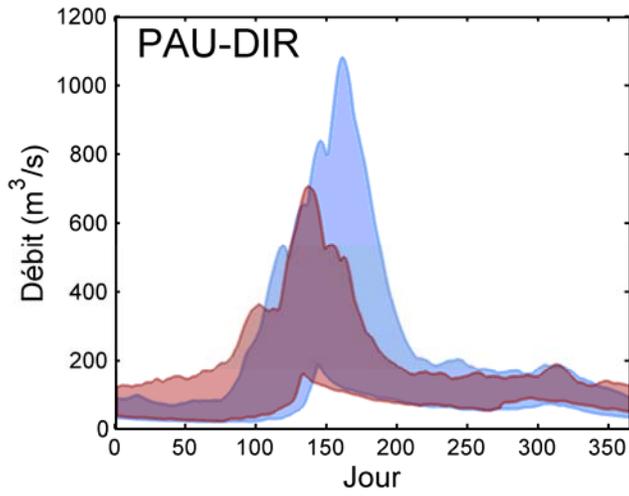
### 11.4.1 Au Tonnerre



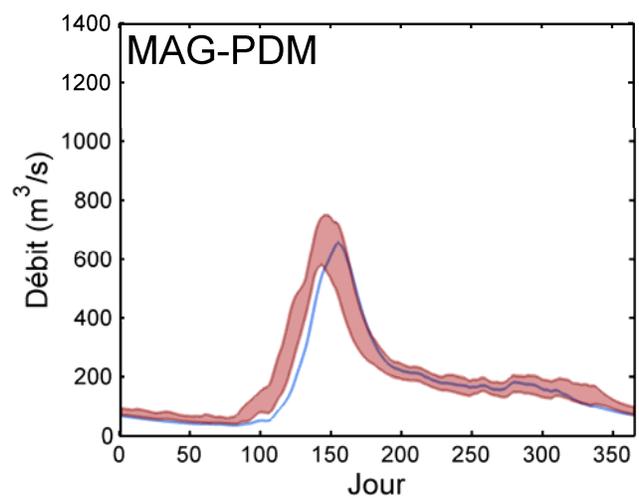
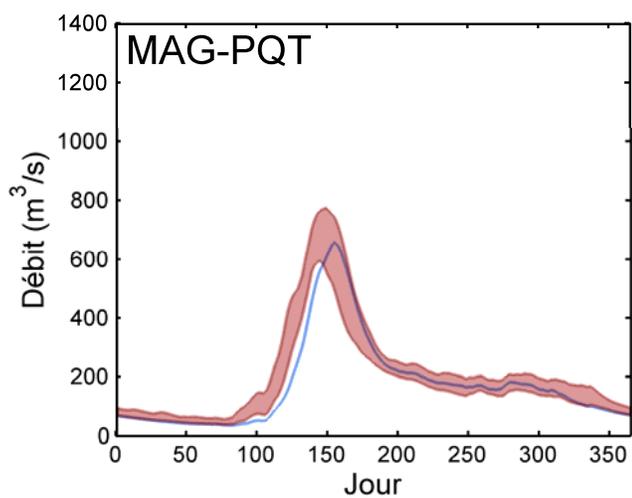
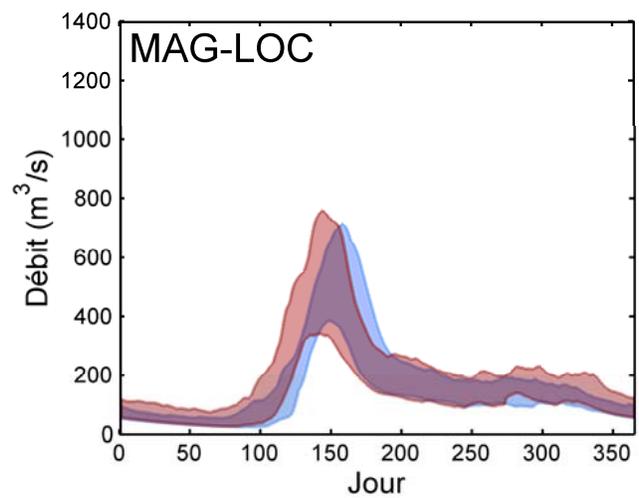
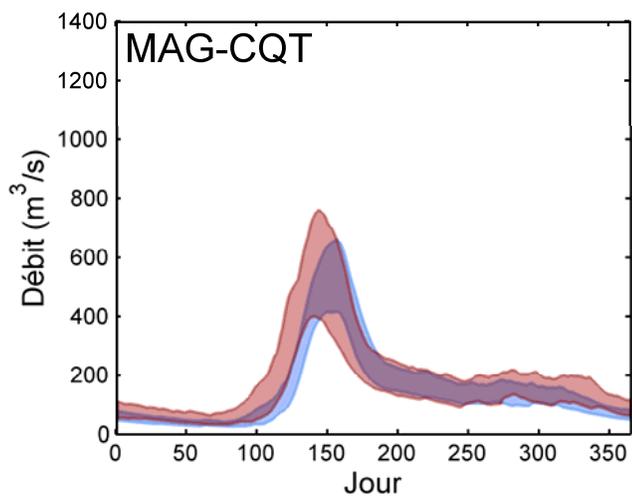
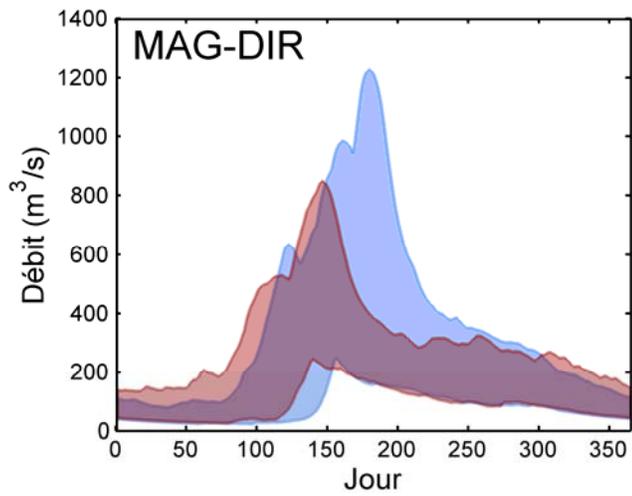
### 11.4.2 Godbout



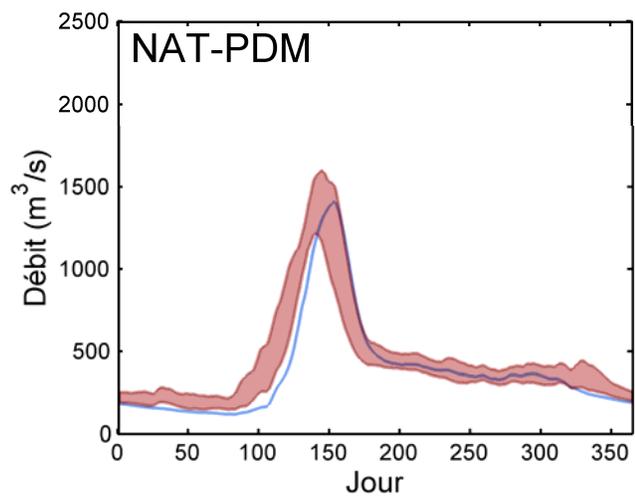
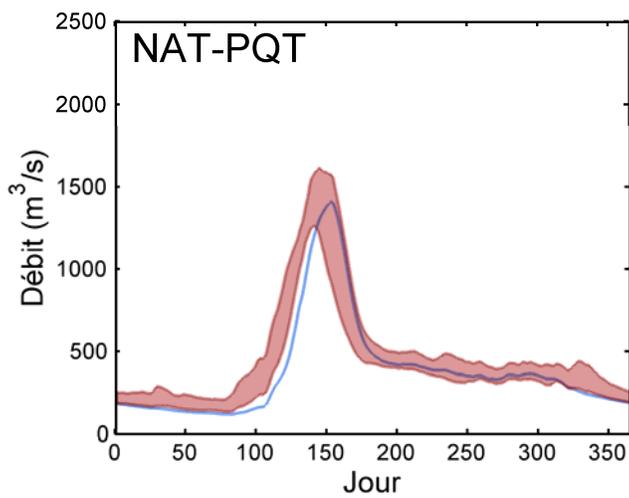
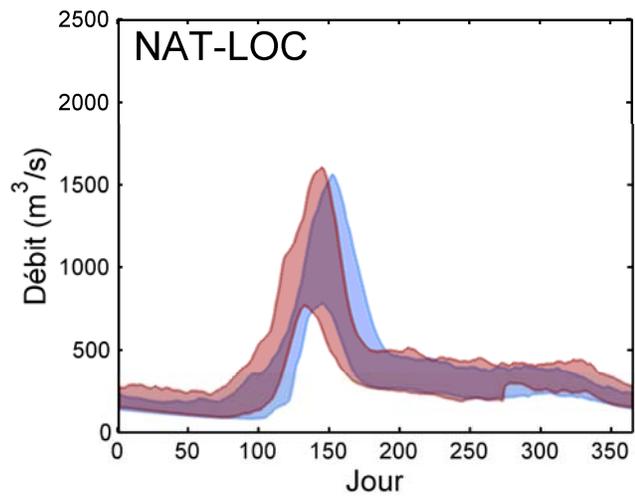
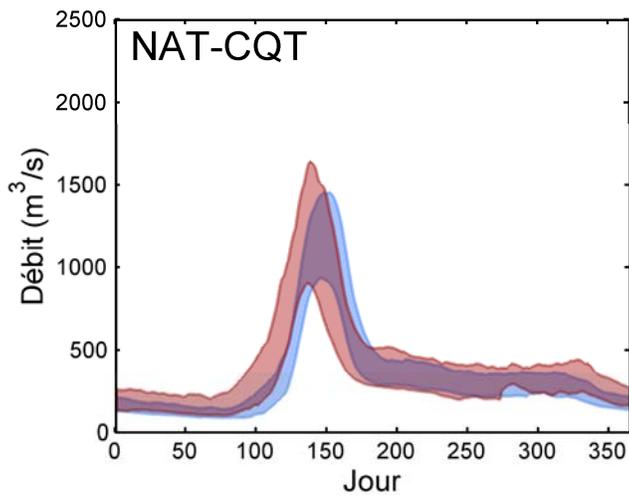
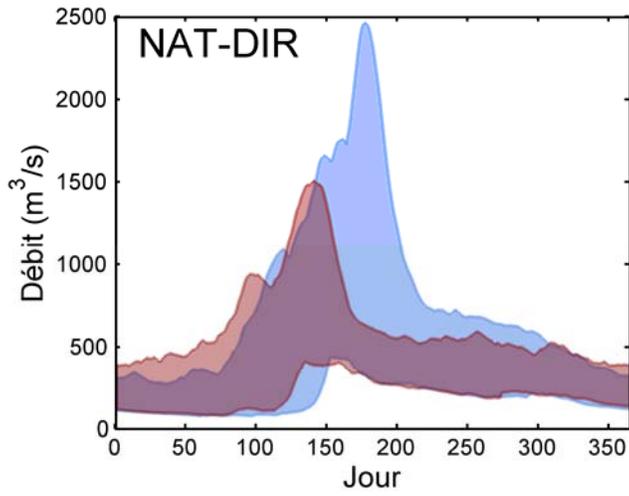
### 11.4.3 Saint-Paul



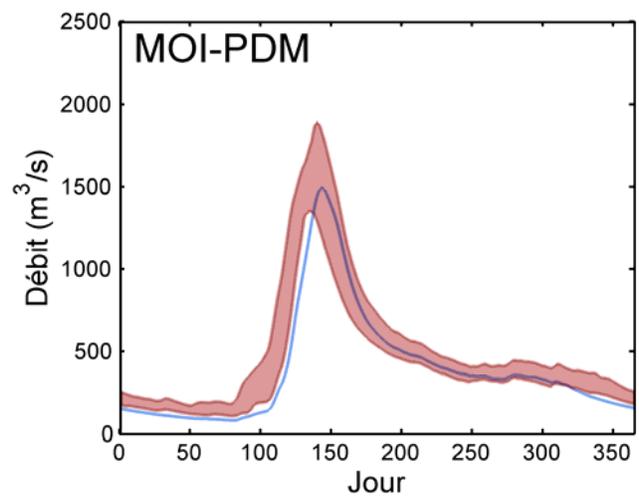
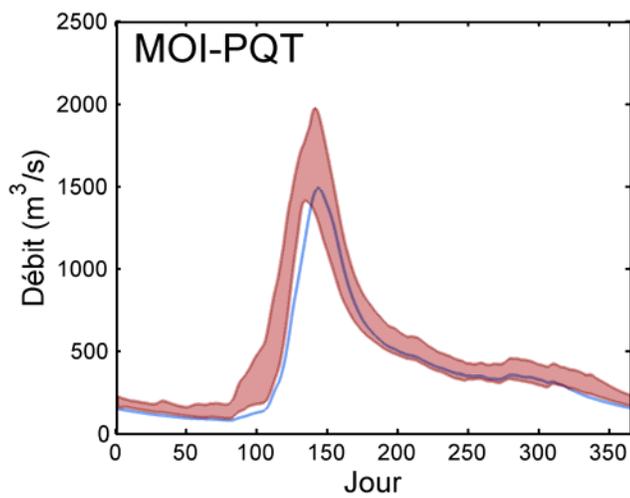
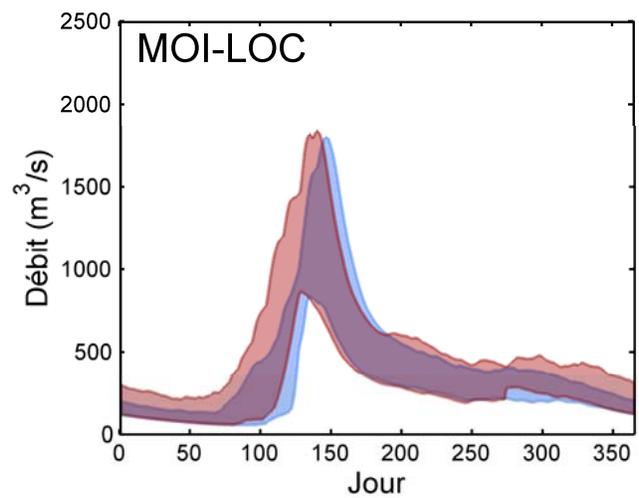
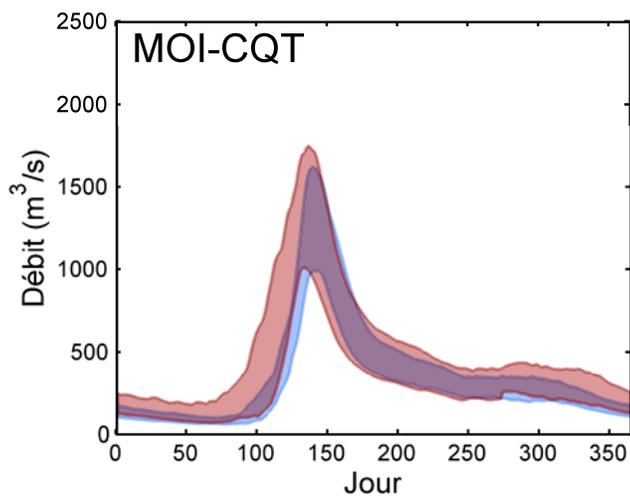
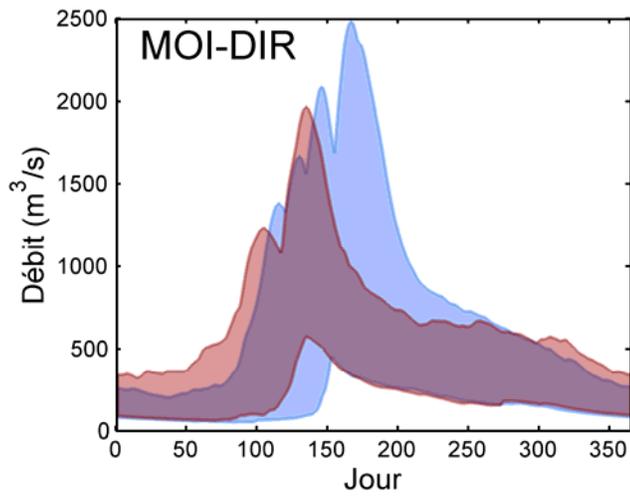
### 11.4.4 Magpie



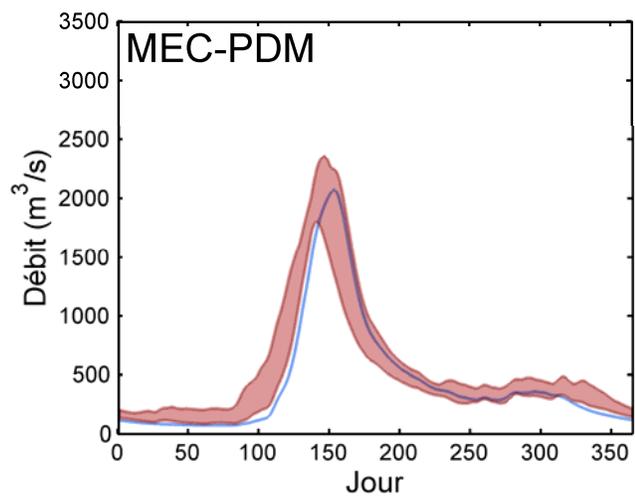
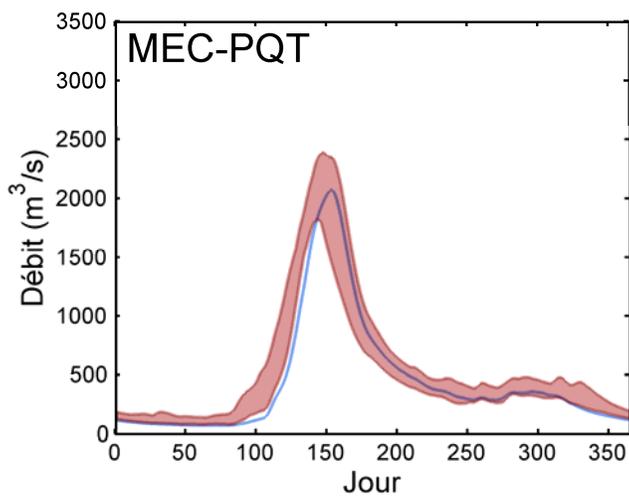
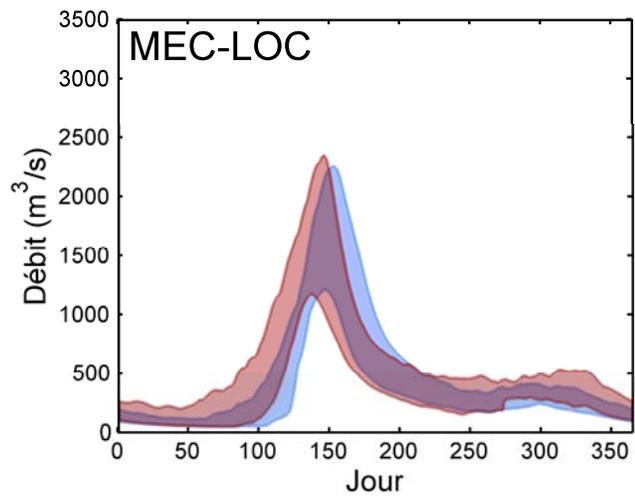
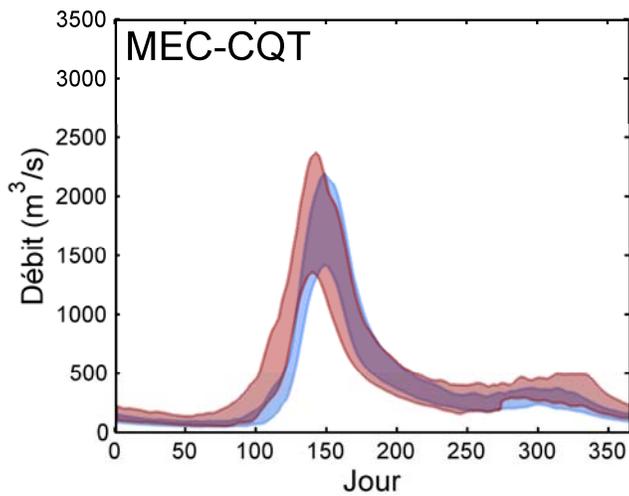
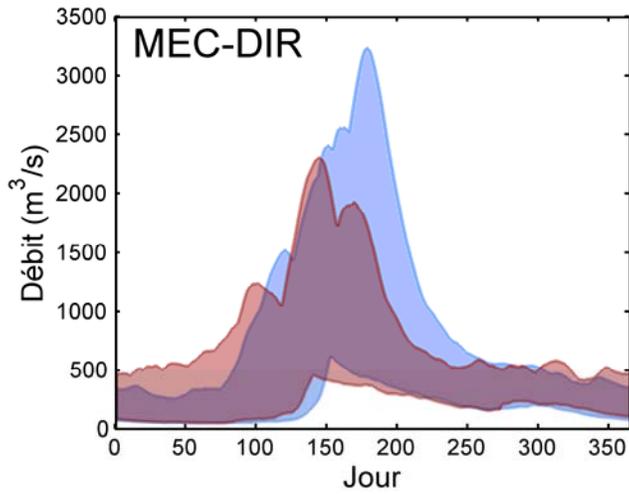
### 11.4.5 Natashquan



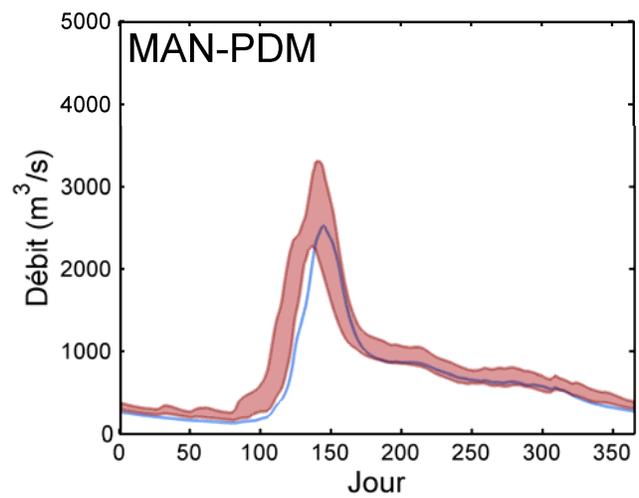
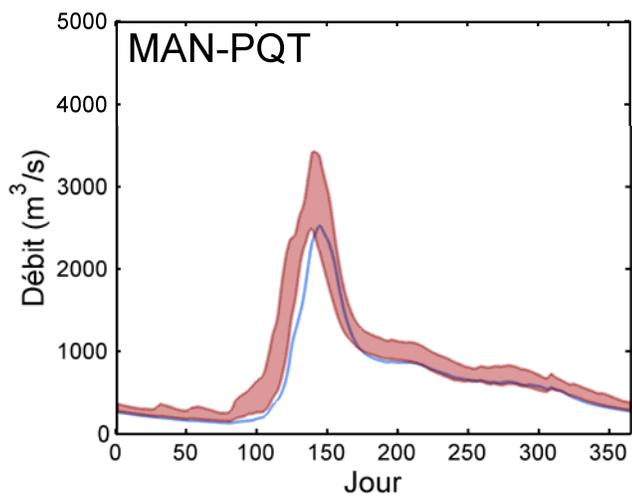
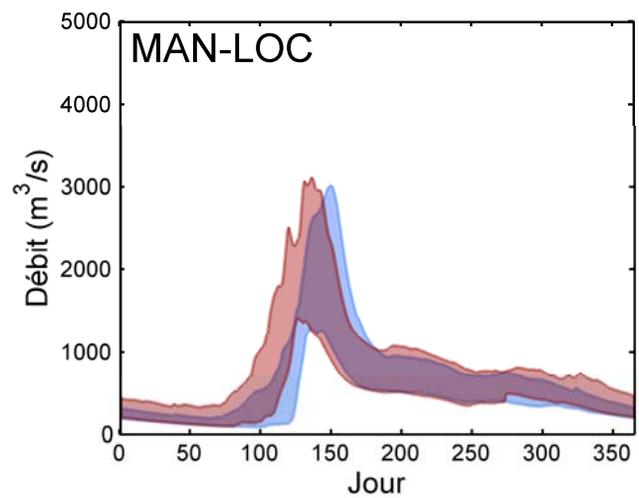
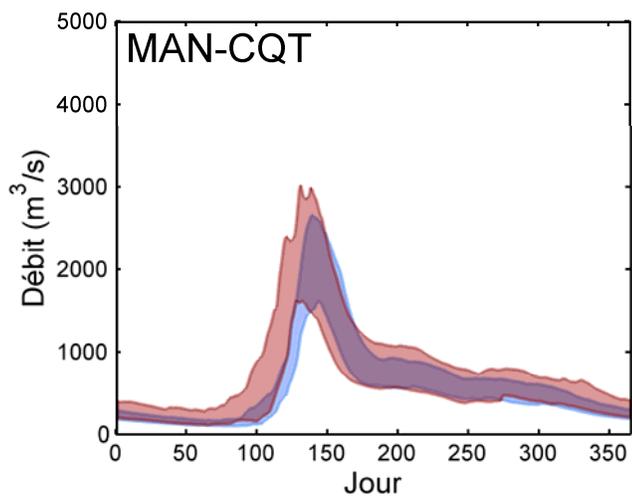
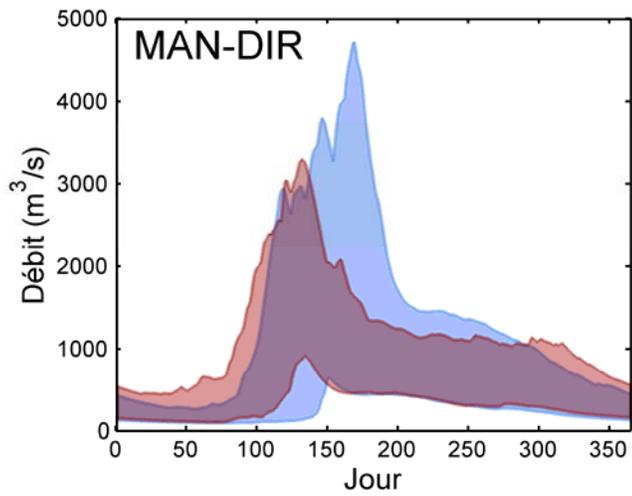
**11.4.6 Moisie**



### 11.4.7 Petit-Mécatina



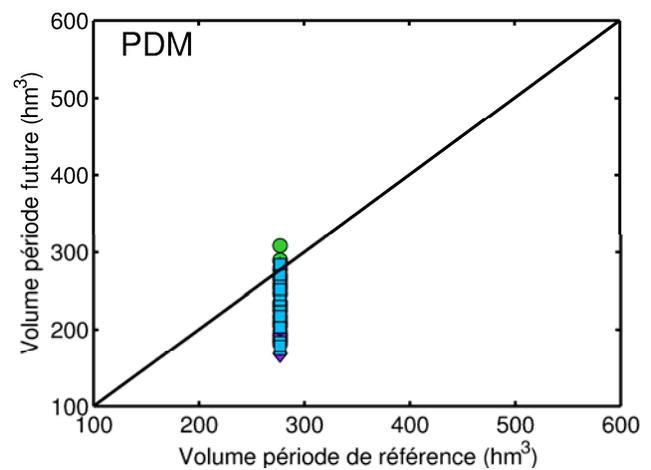
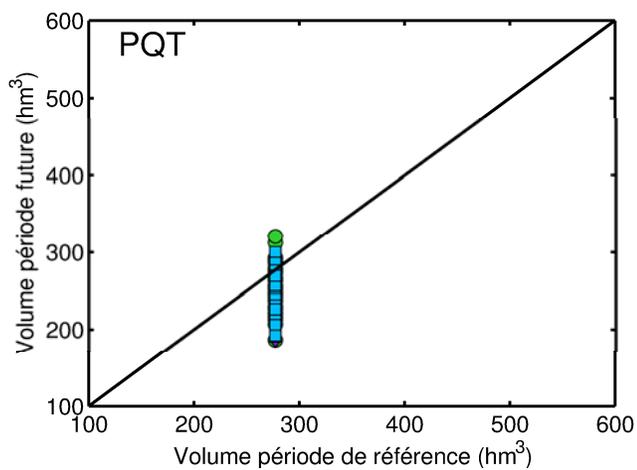
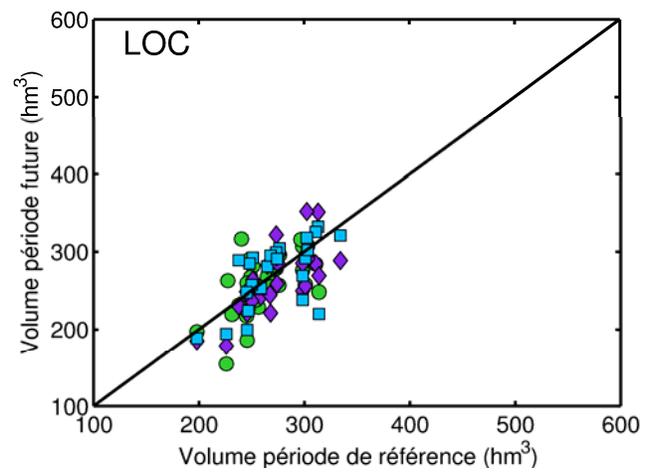
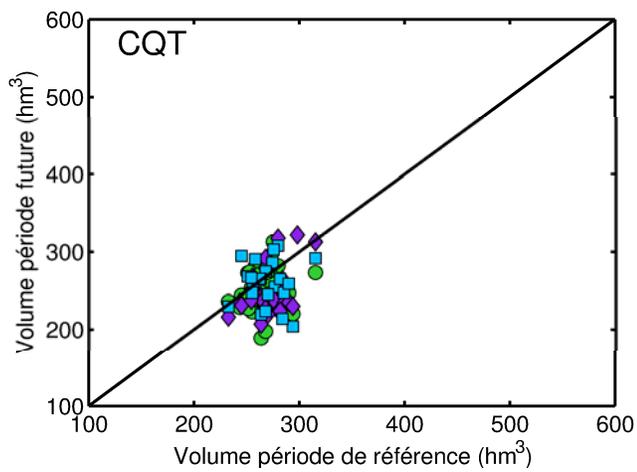
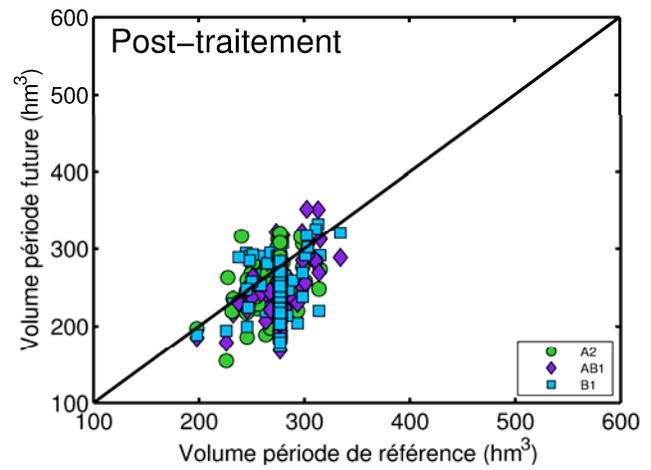
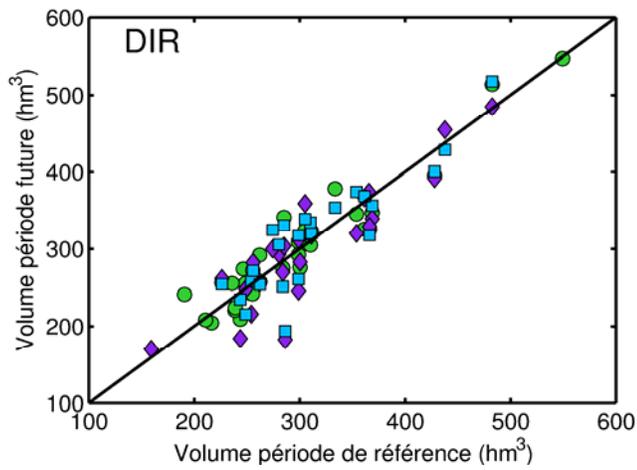
**11.4.8 Manic 5**



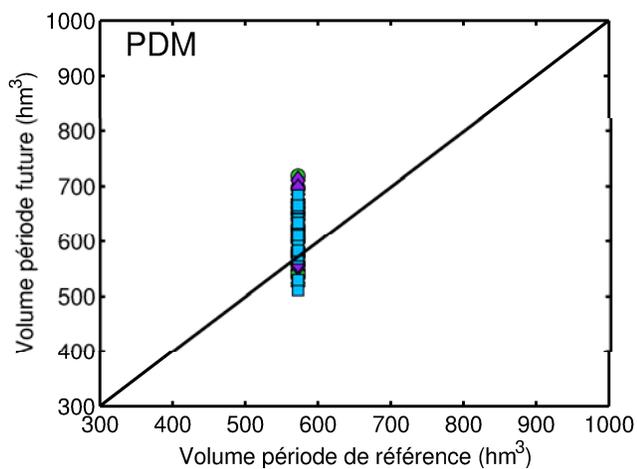
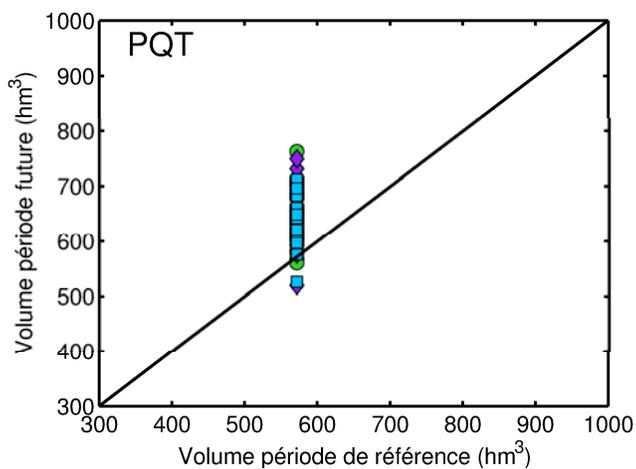
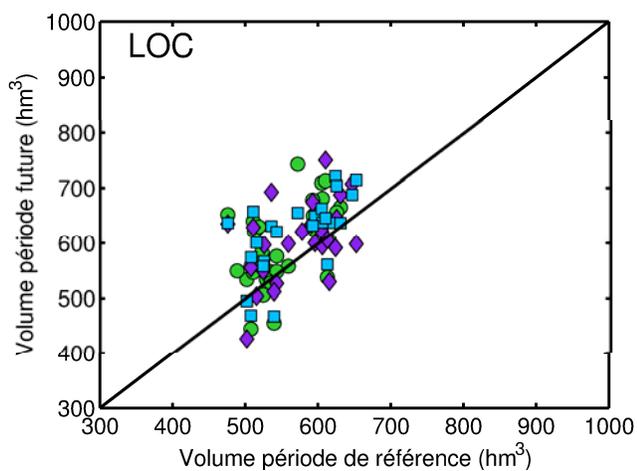
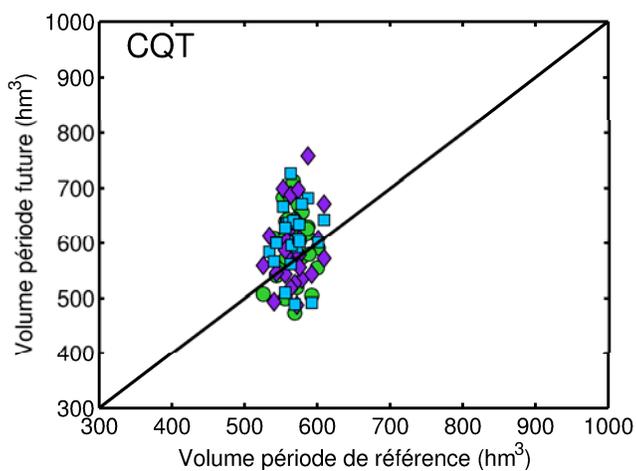
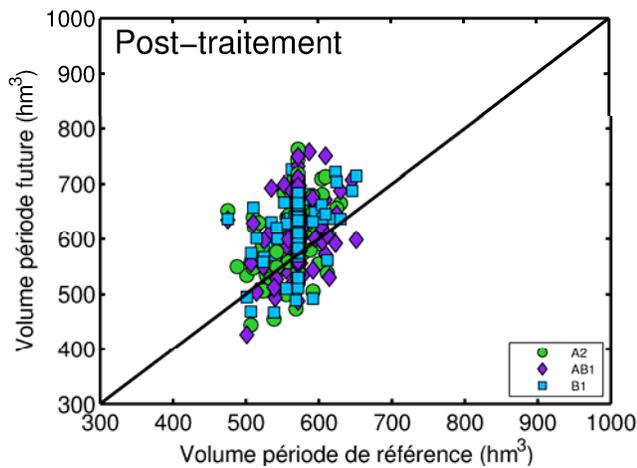
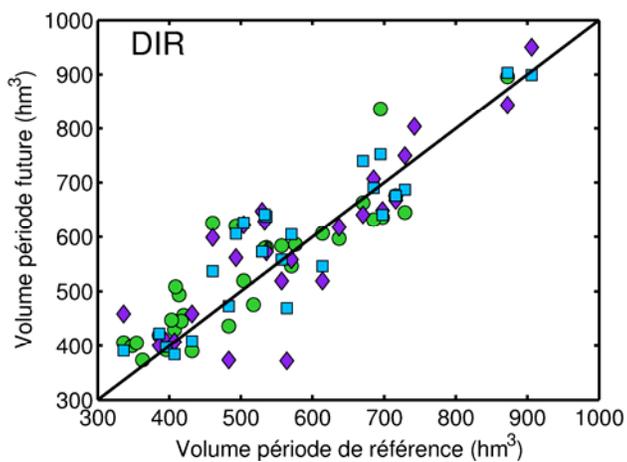
---

## **11.5 Comparaison de la médiane des volumes (période référence et futur) entre les différents scénarios de gaz à effet de serre (A2, A1B, B1)**

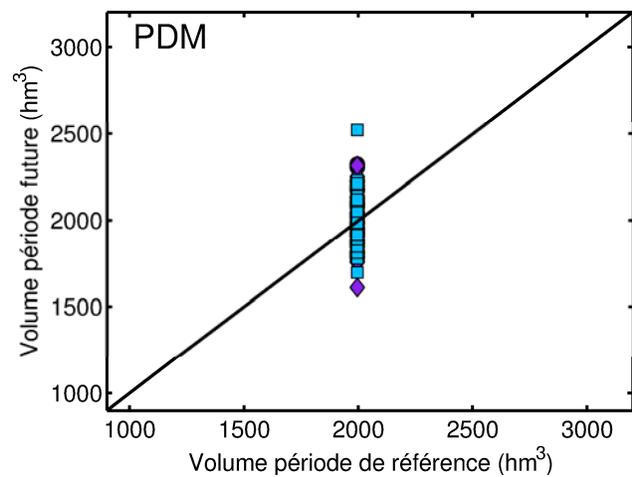
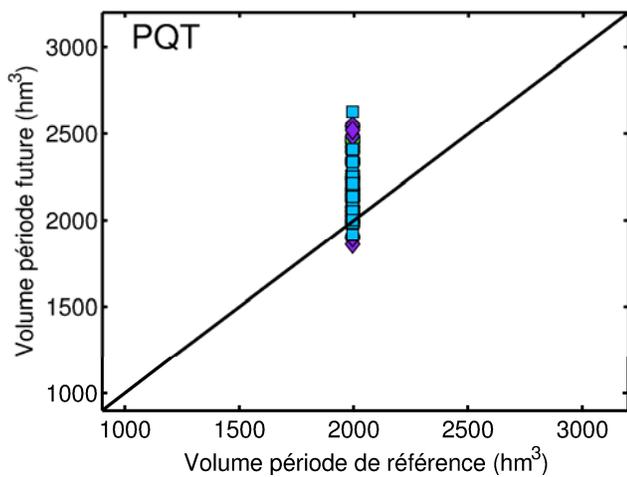
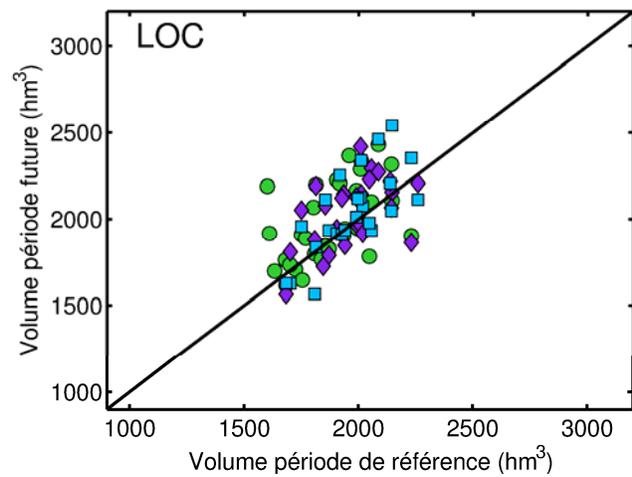
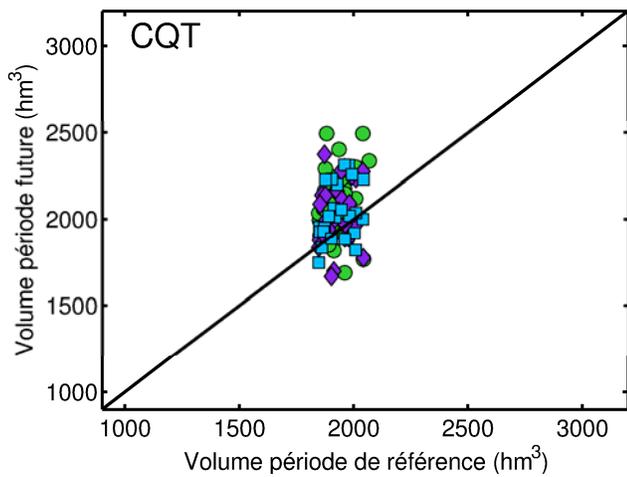
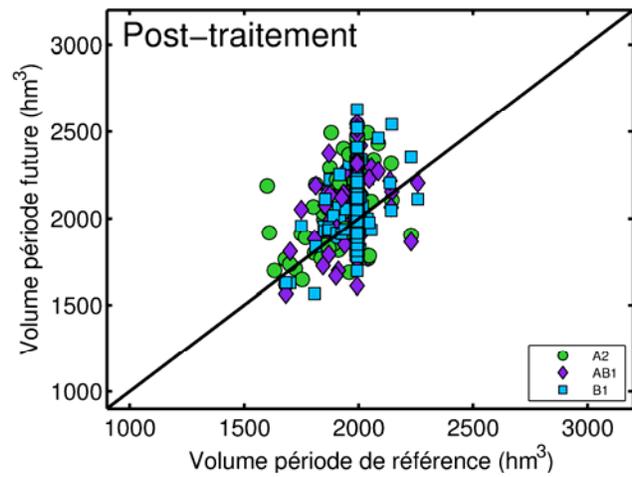
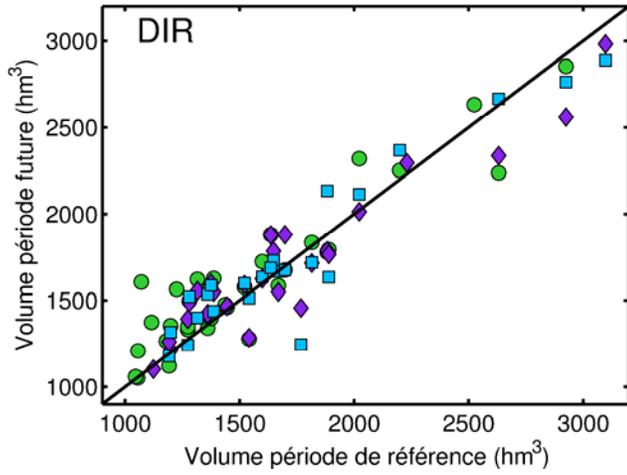
### 11.5.1 Au Tonnerre



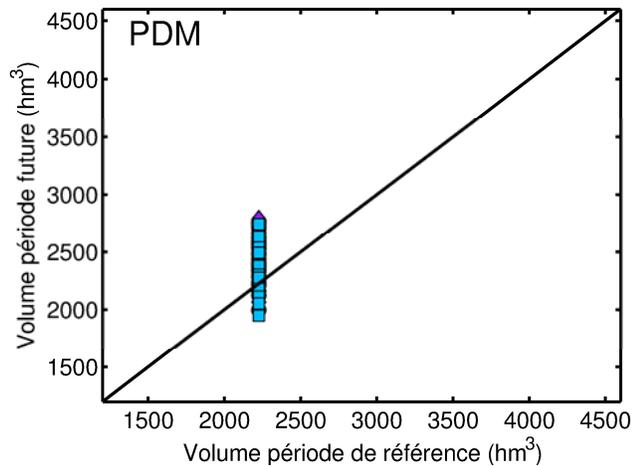
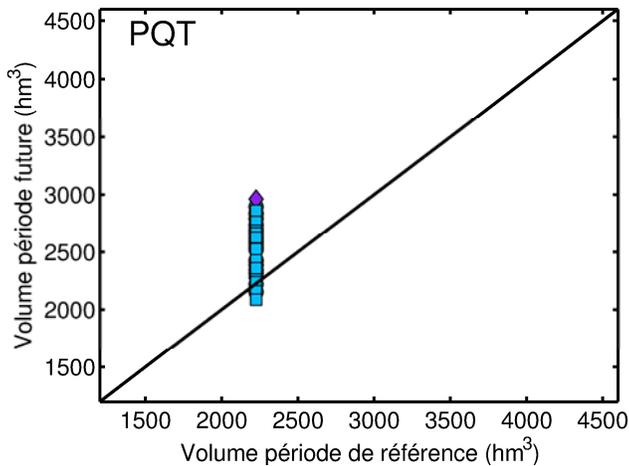
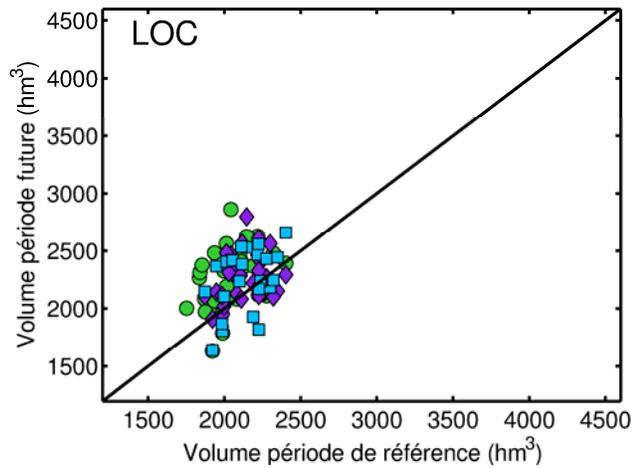
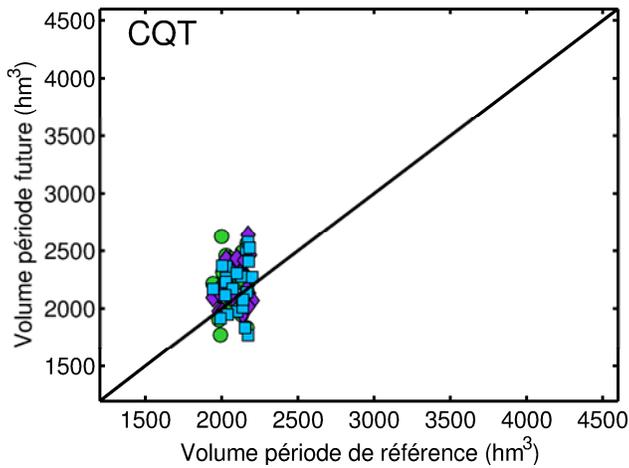
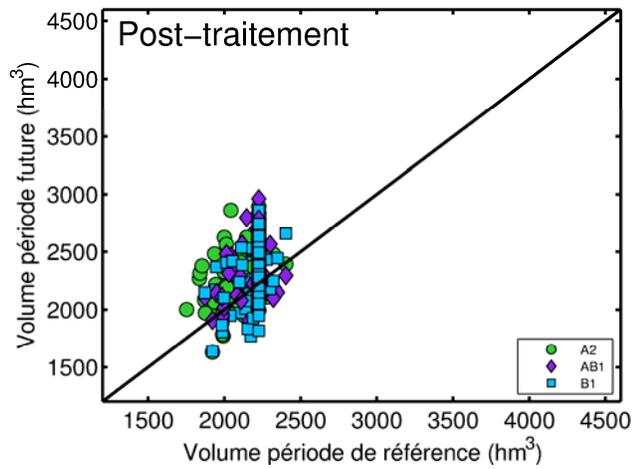
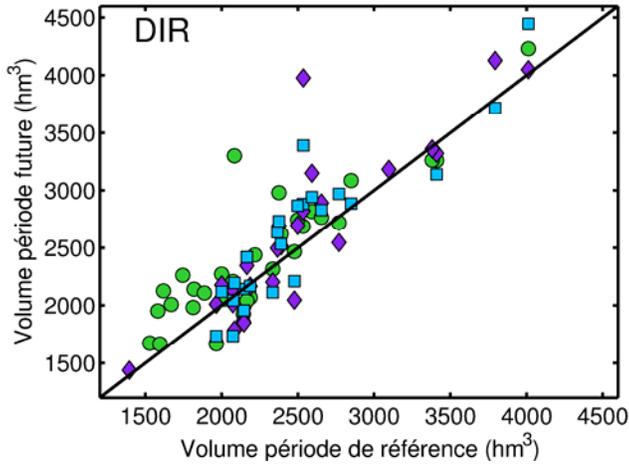
11.5.1.1 Godbout



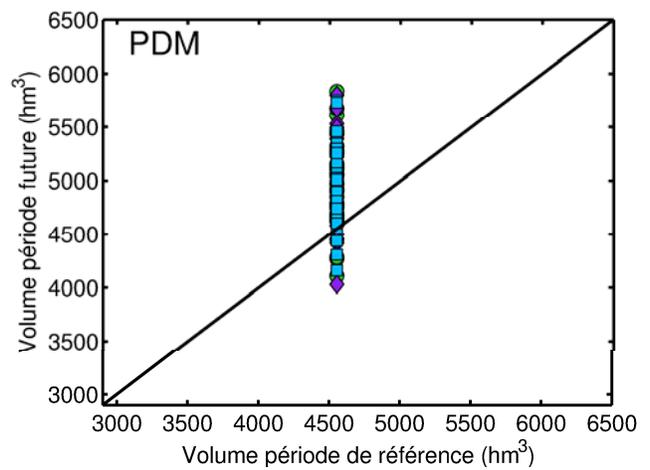
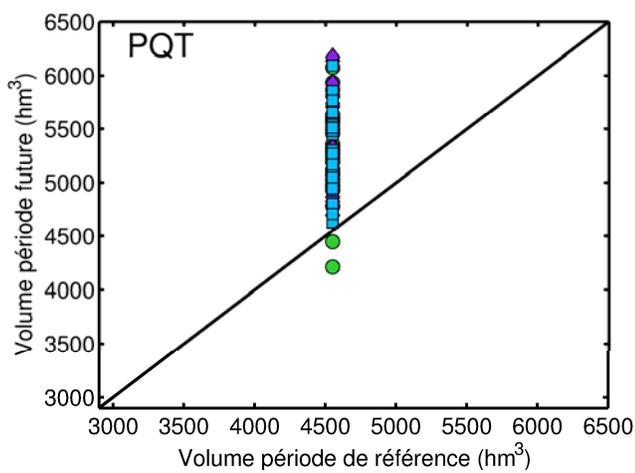
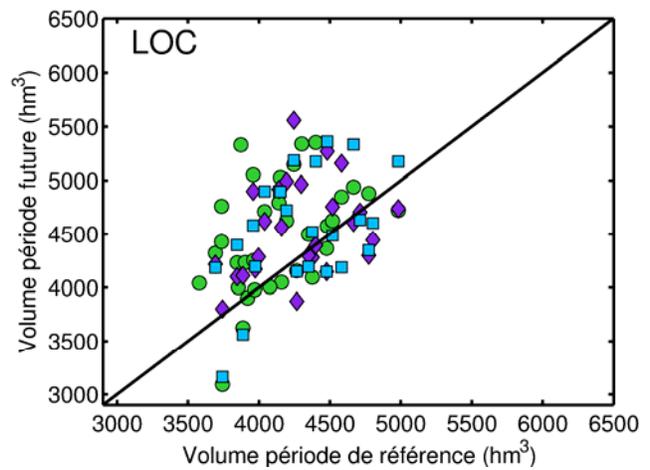
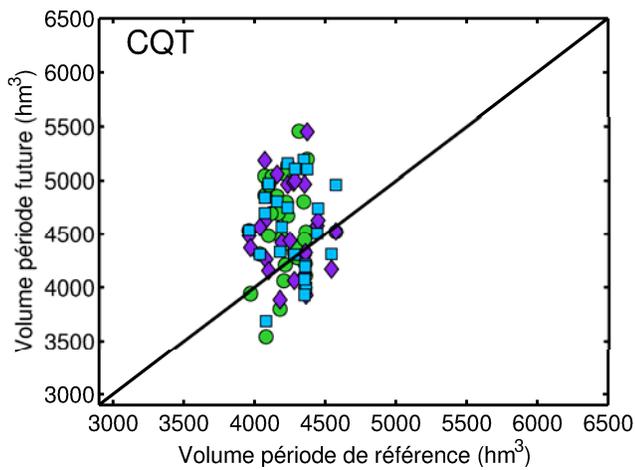
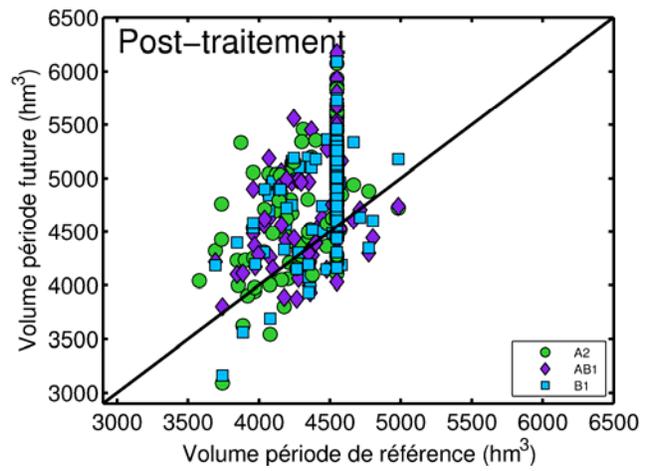
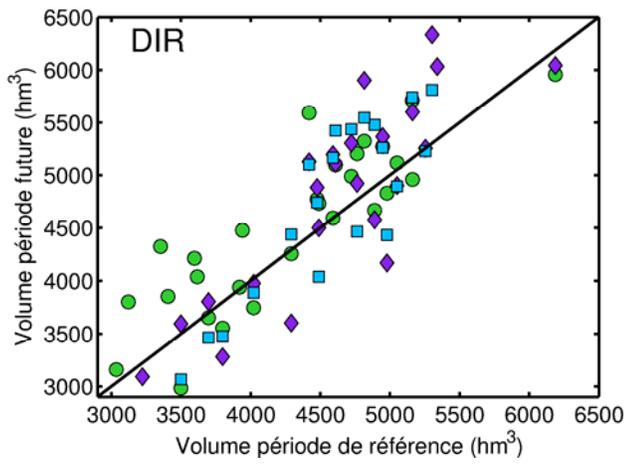
### 11.5.2 Saint-Paul



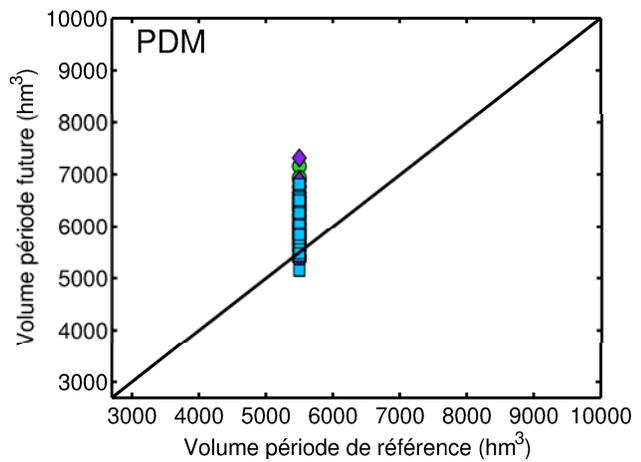
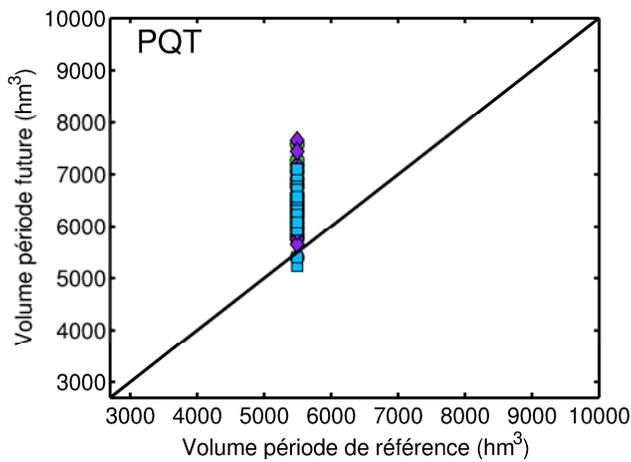
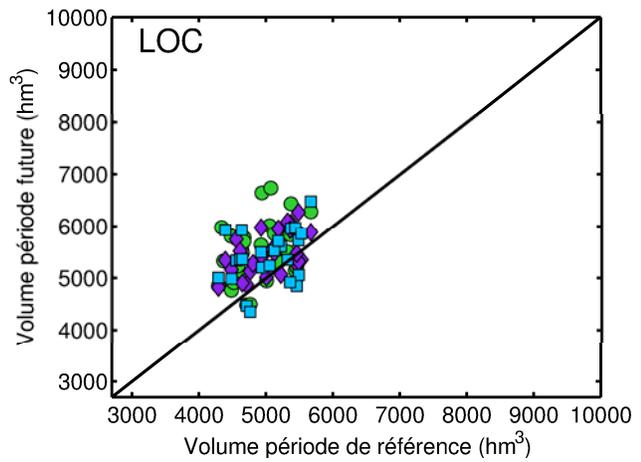
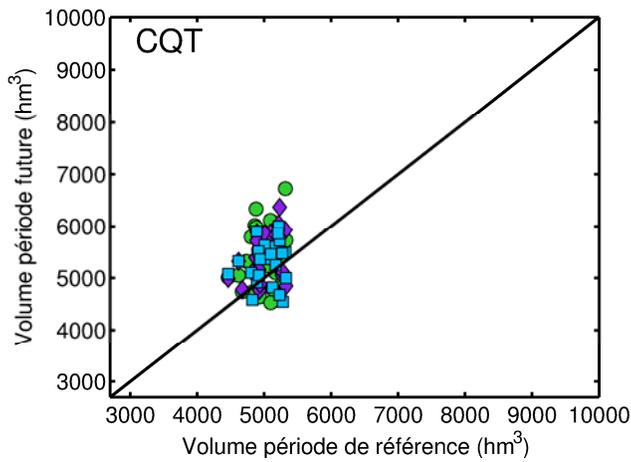
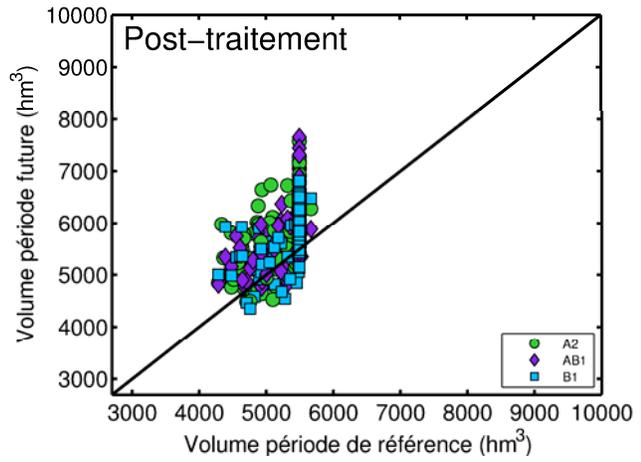
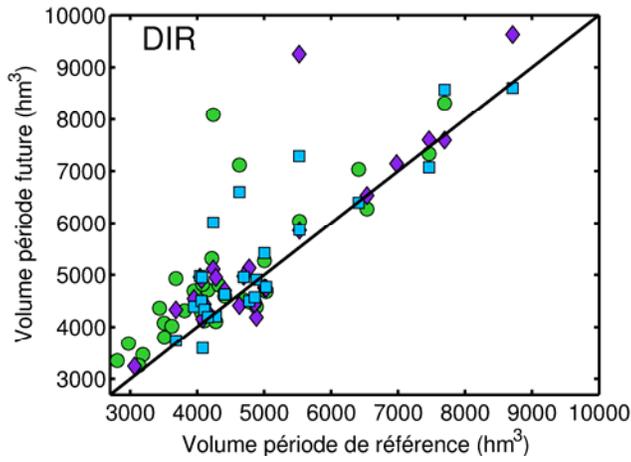
### 11.5.3 Magpie



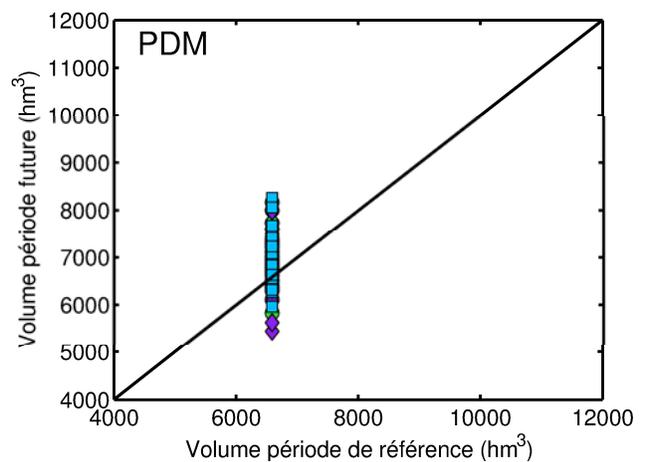
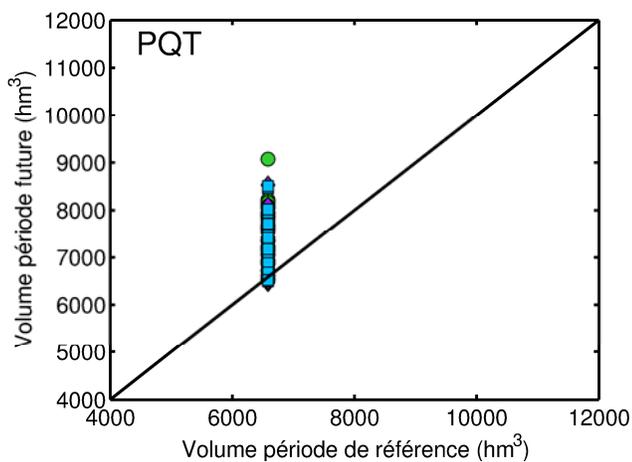
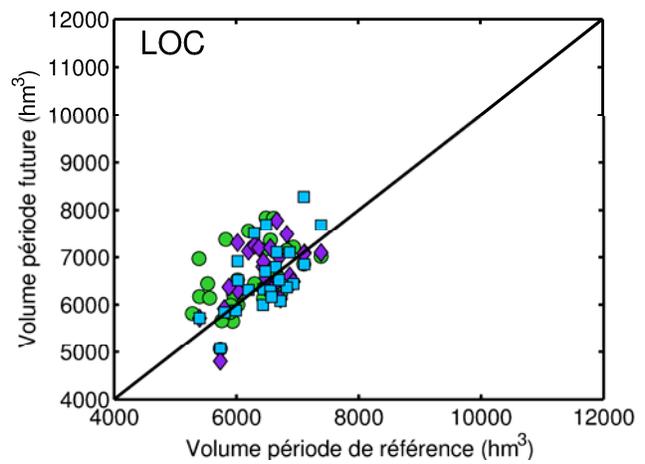
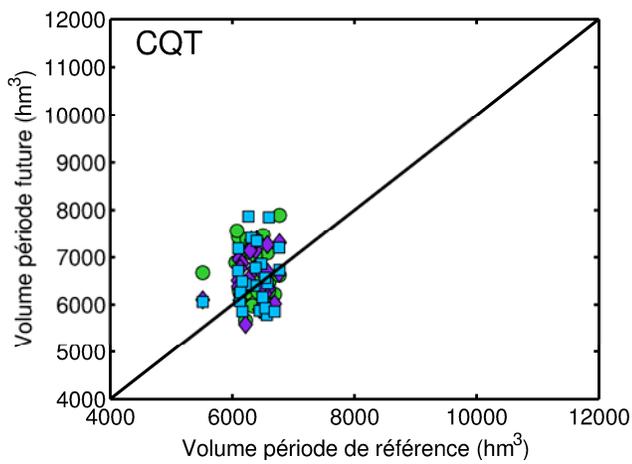
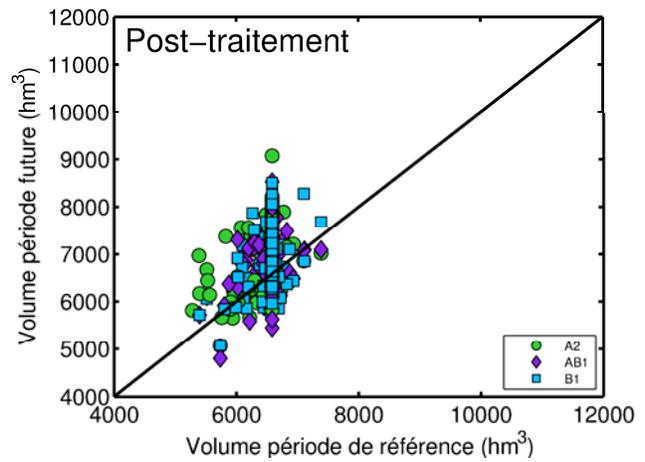
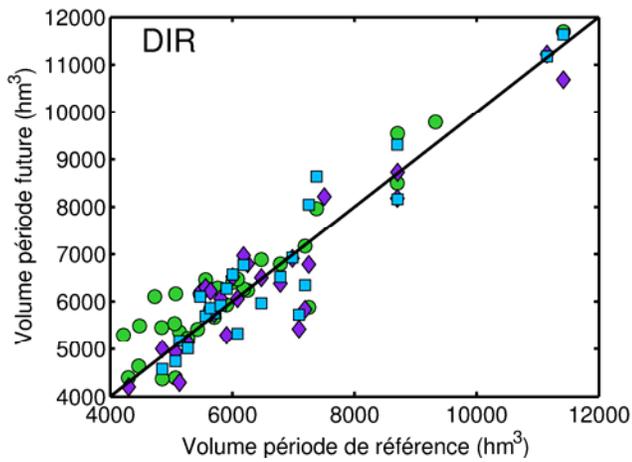
### 11.5.4 Natashquan



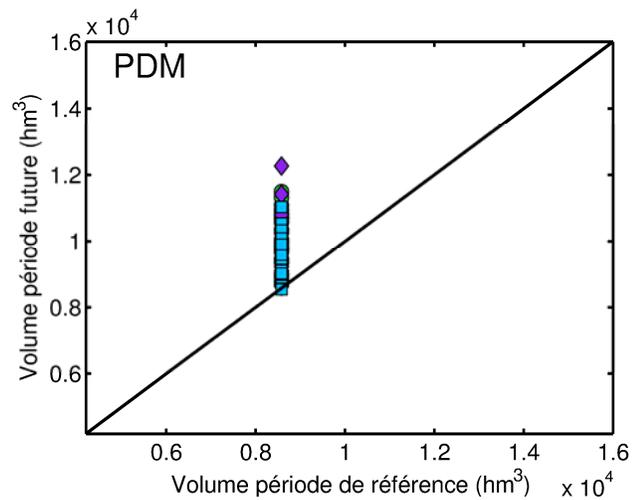
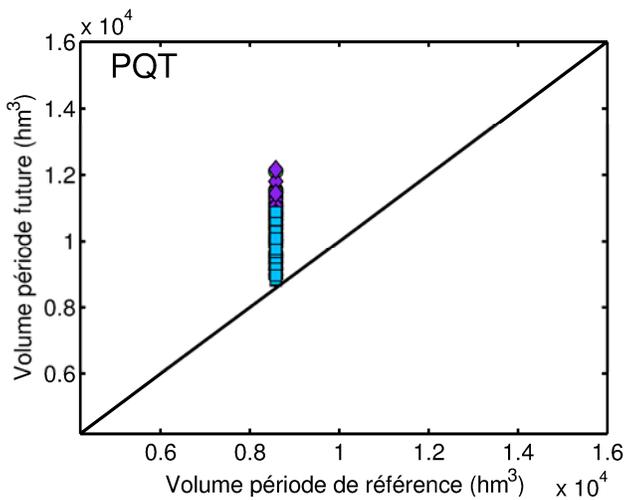
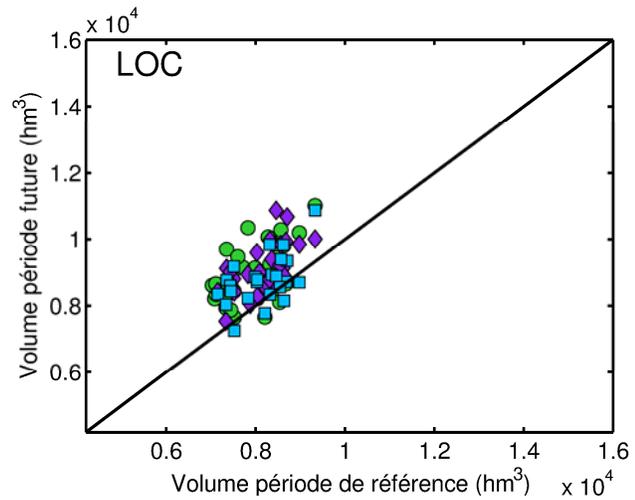
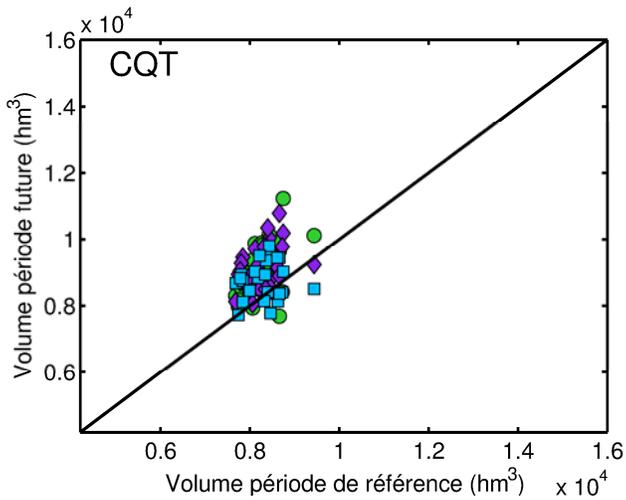
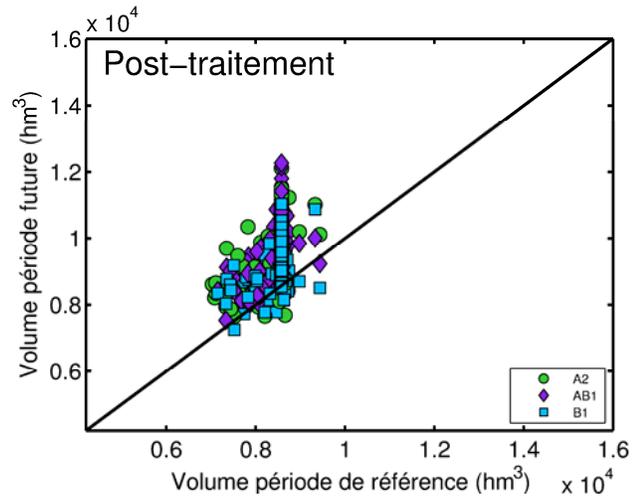
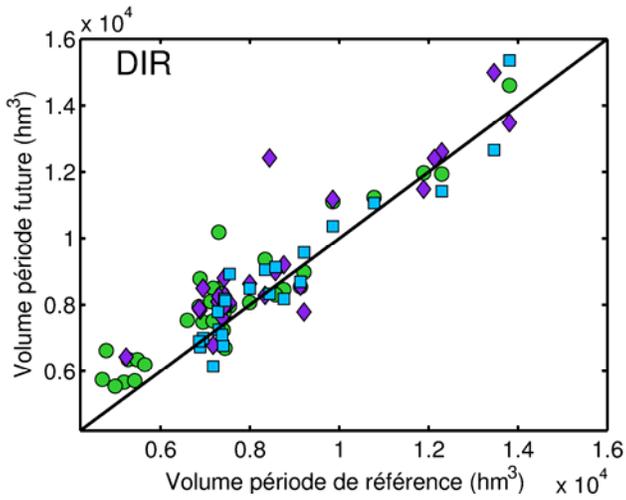
### 11.5.5 Moisie



### 11.5.6 Petit-Mécatina



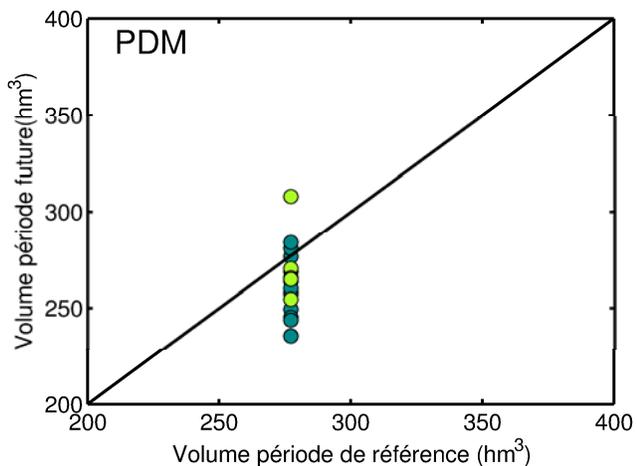
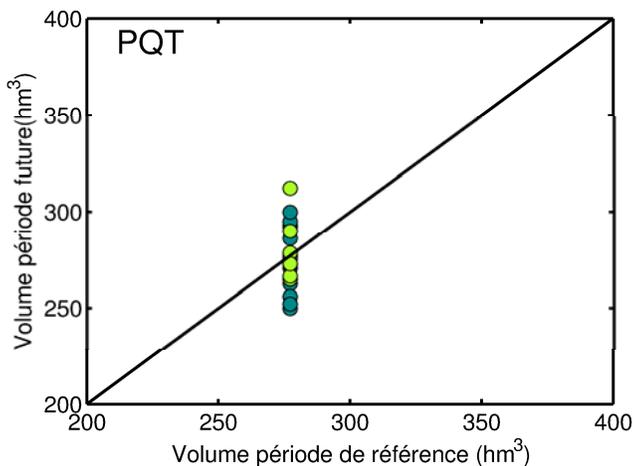
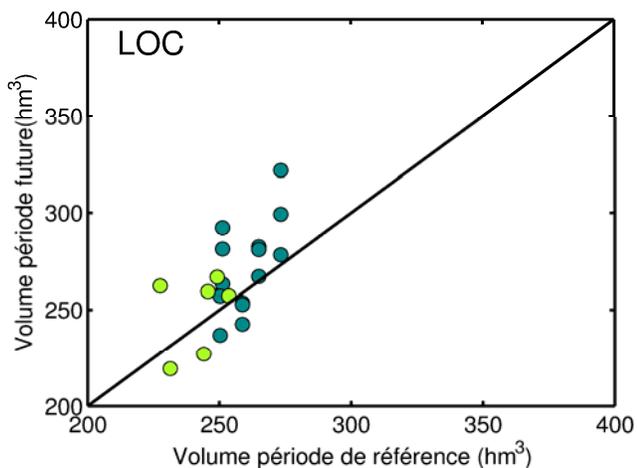
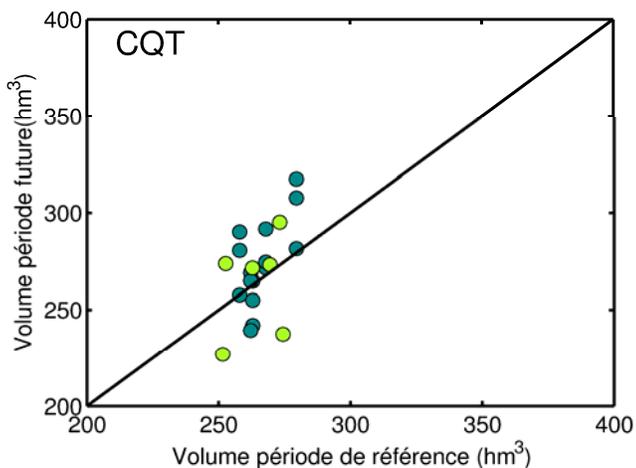
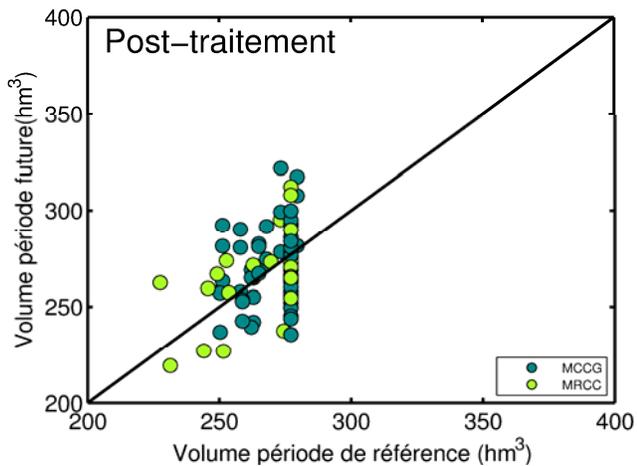
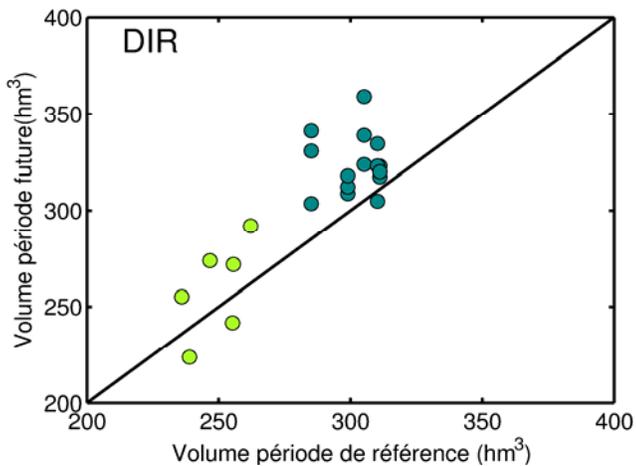
11.5.7 Manic 5



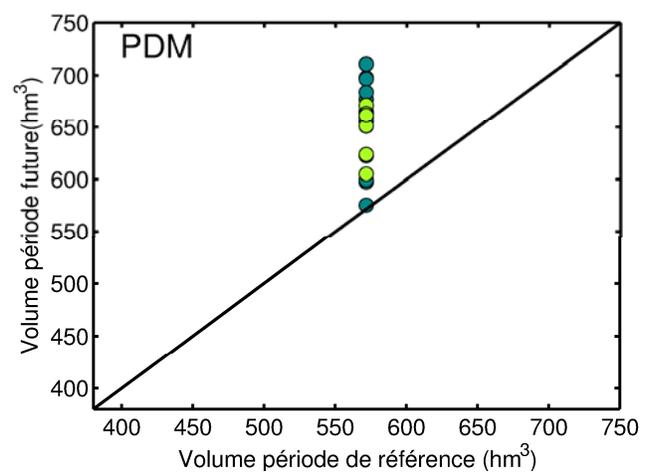
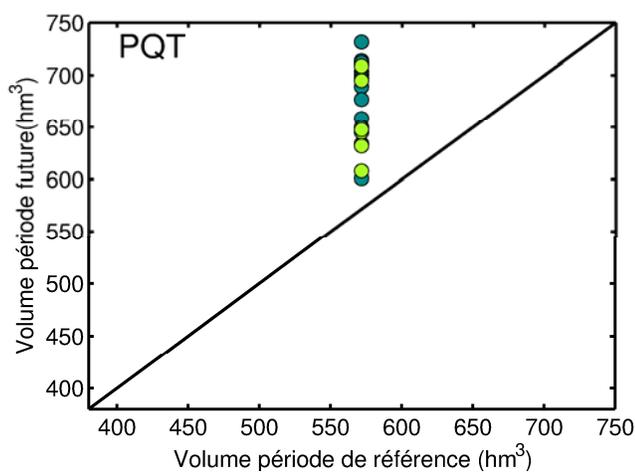
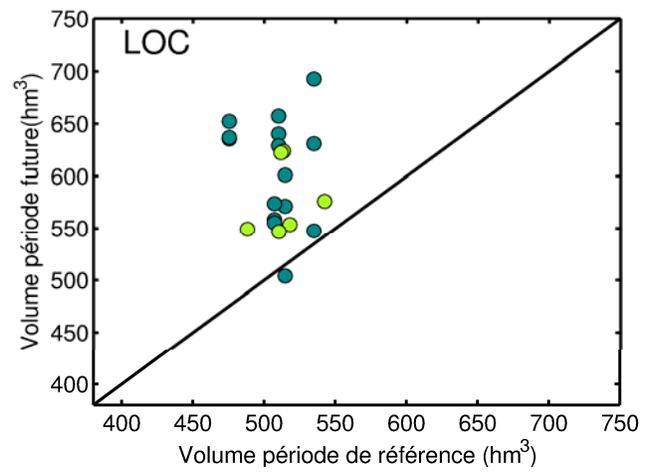
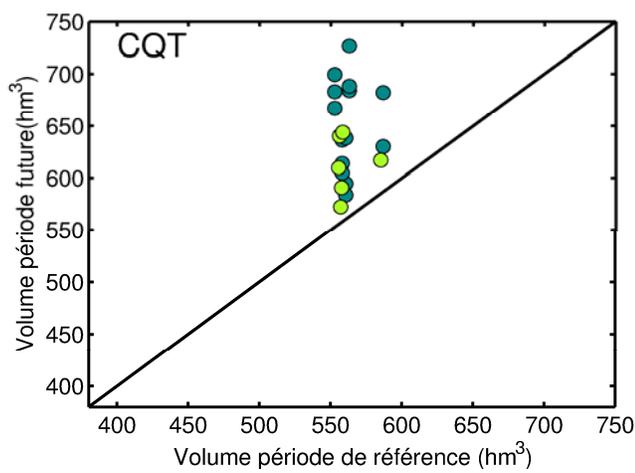
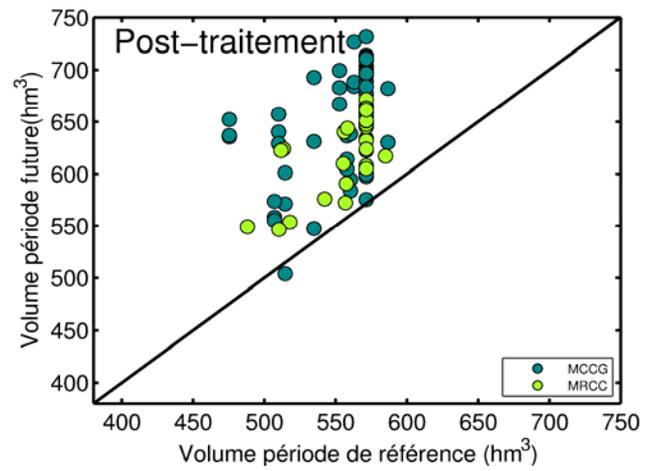
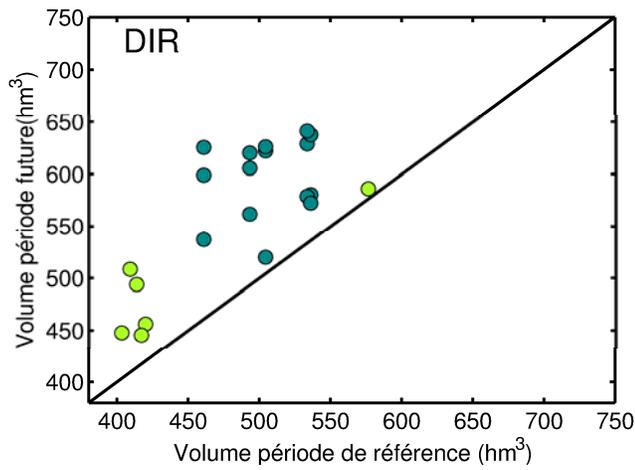
---

**11.6 Comparaison de la médiane des volumes (période référence et futur) entre le MRCC (Modèle régional Canadien du Climat) piloté par le MCCG (Modèle Canadien de Circulation Général) et le MCCG.**

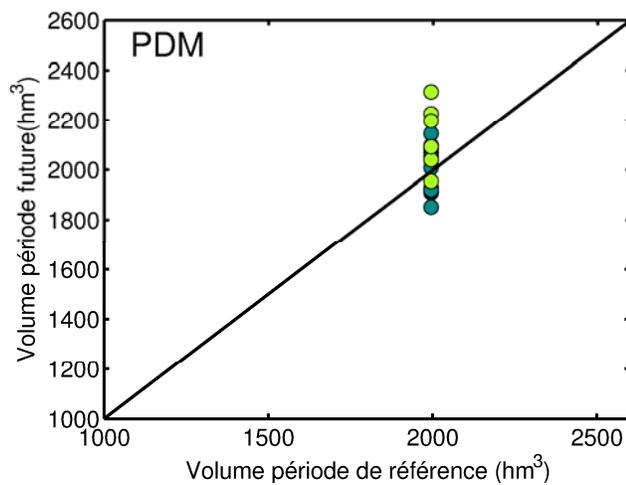
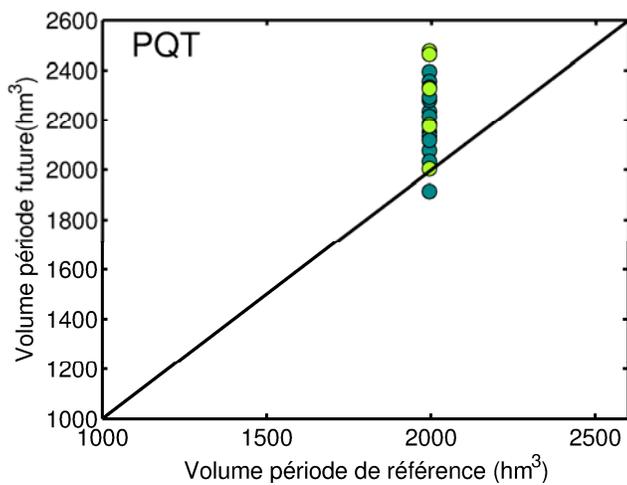
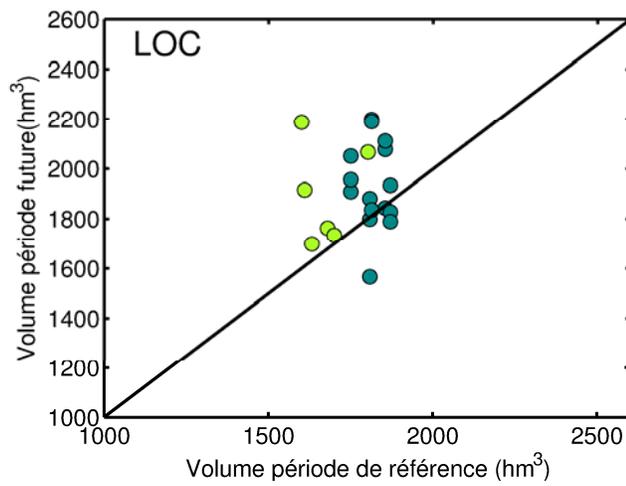
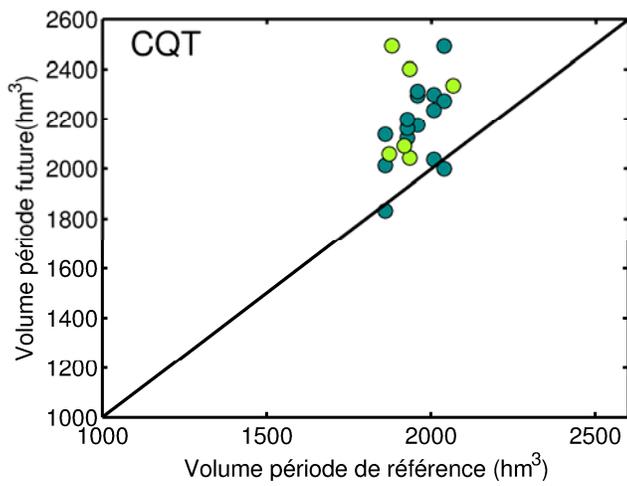
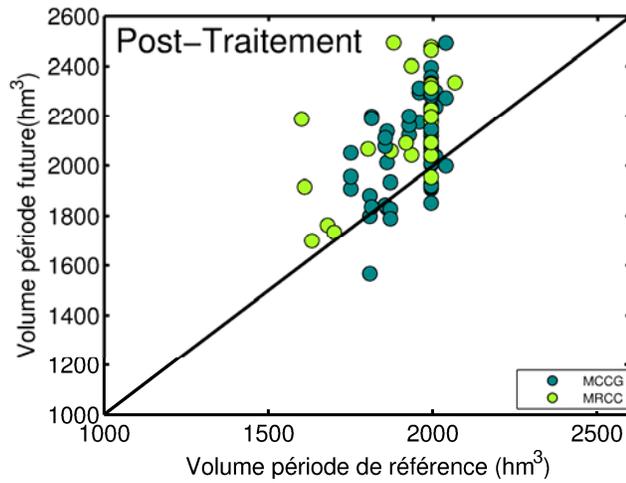
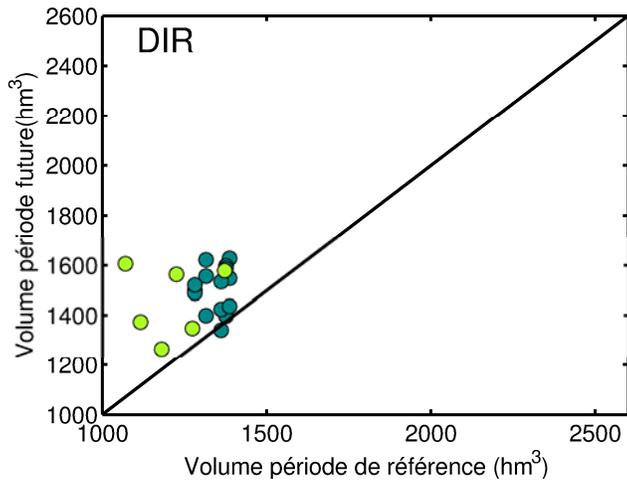
11.6.1 Rivière Au Tonnerre



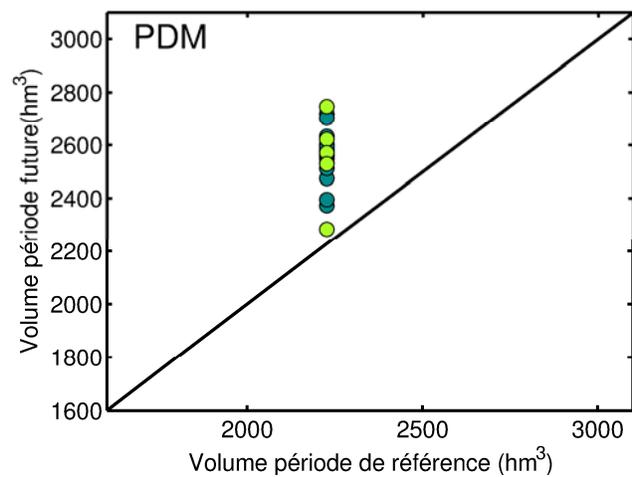
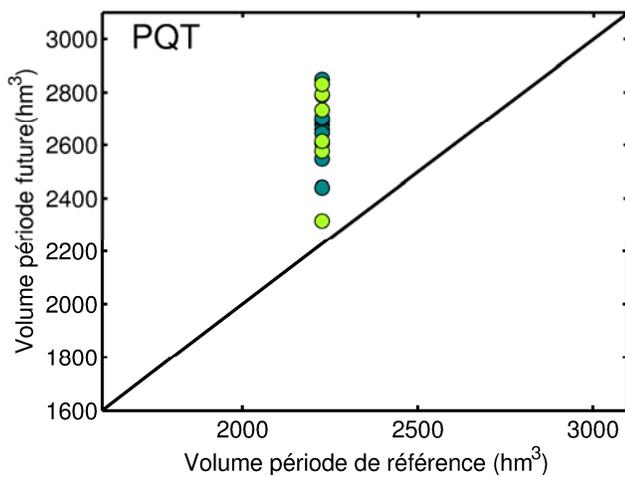
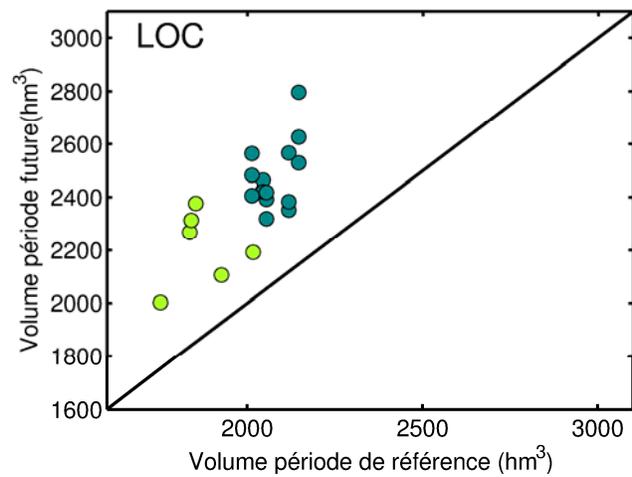
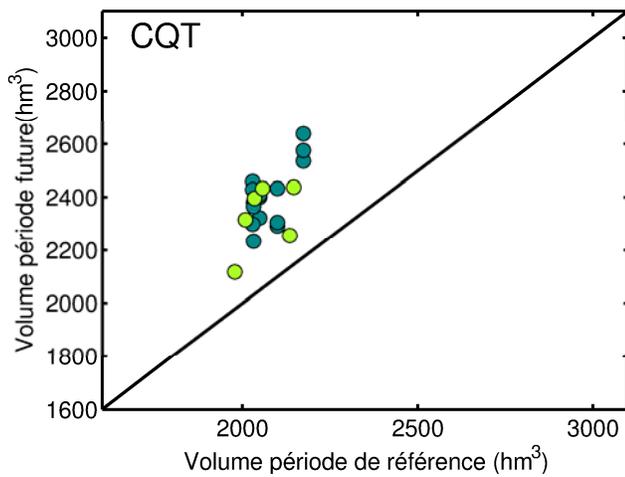
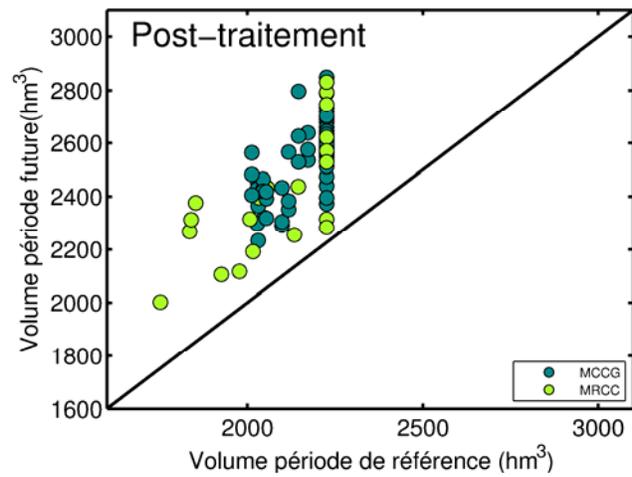
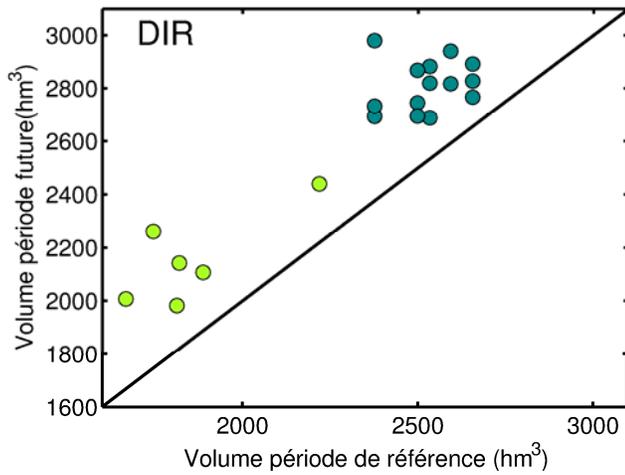
### 11.6.2 Rivière Godbout



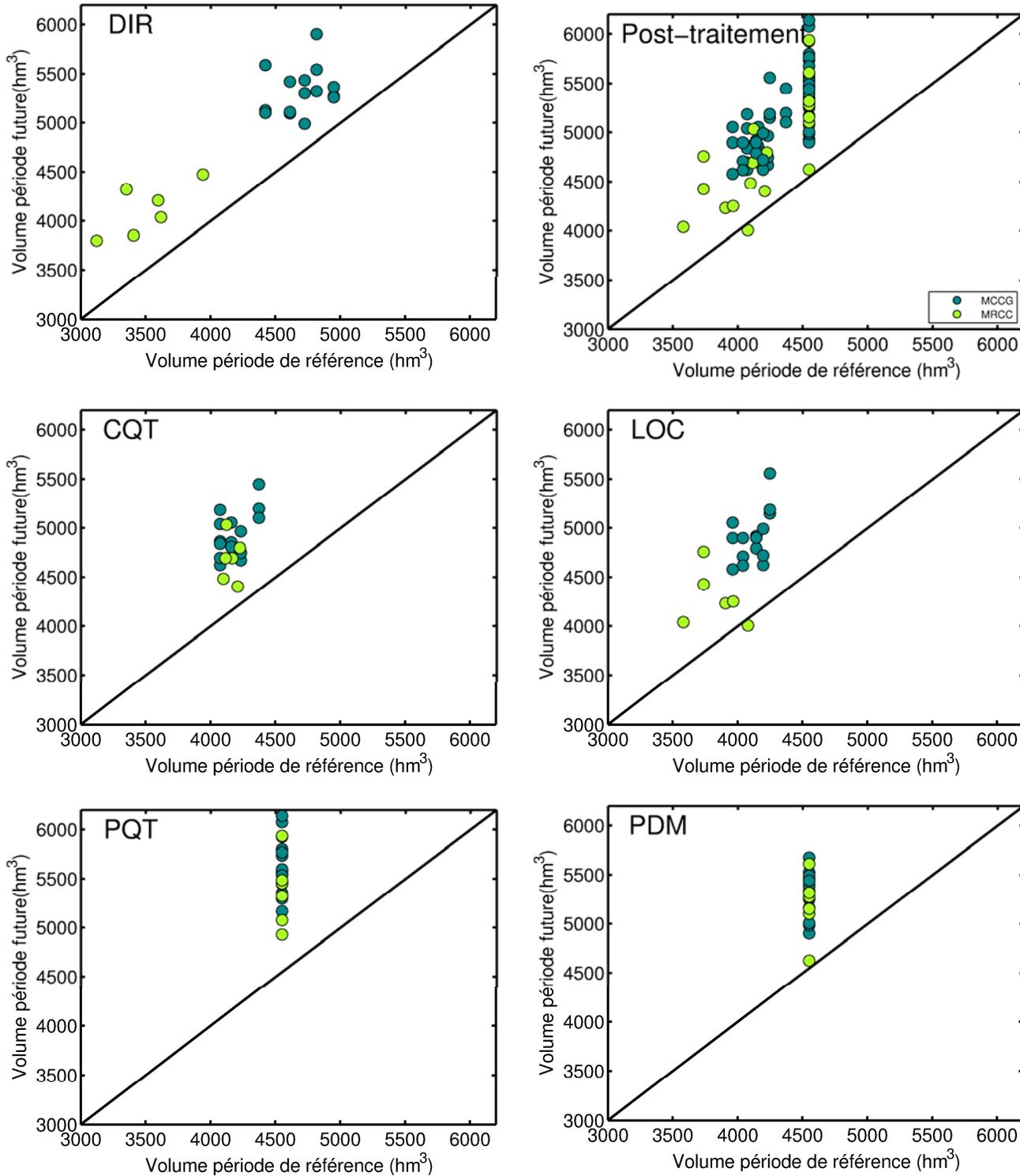
11.6.3 Rivière St-Paul



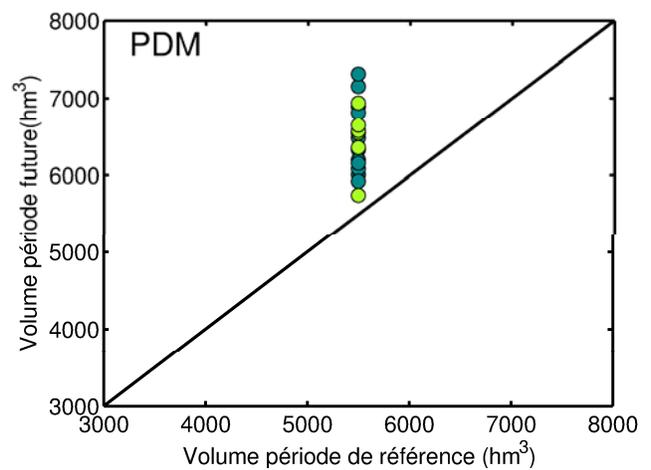
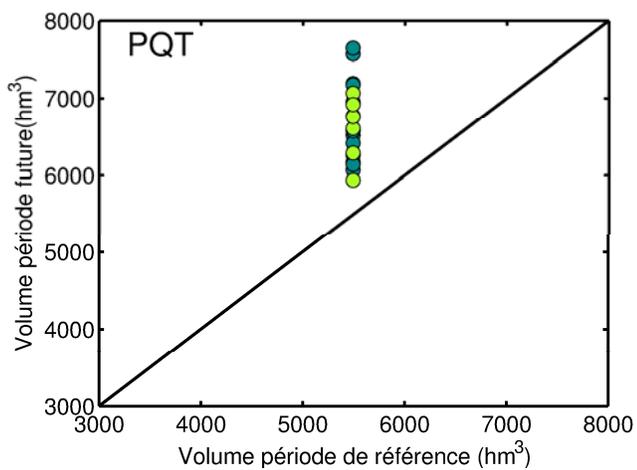
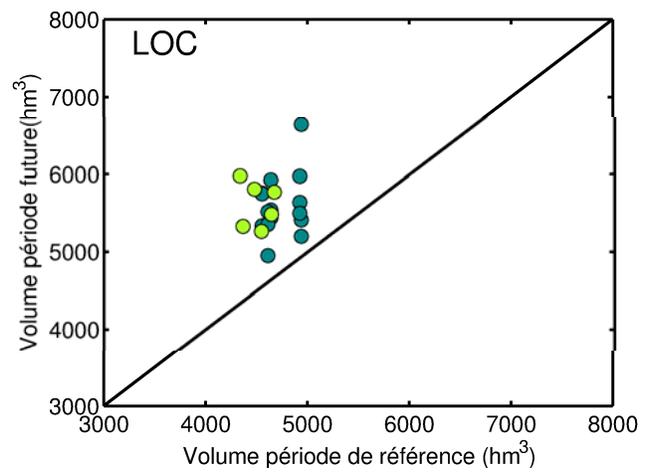
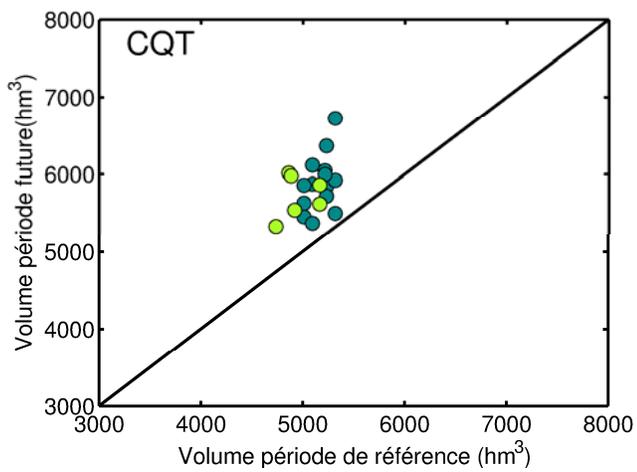
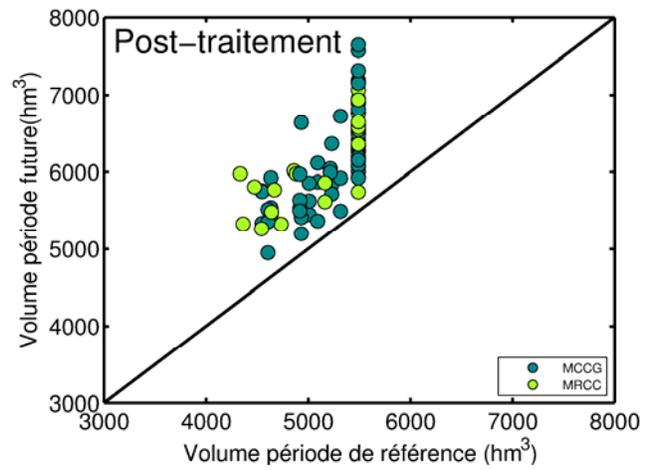
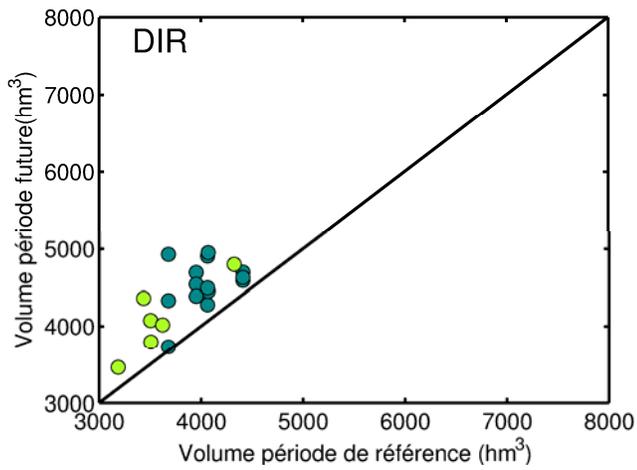
### 11.6.4 Rivière Magpie



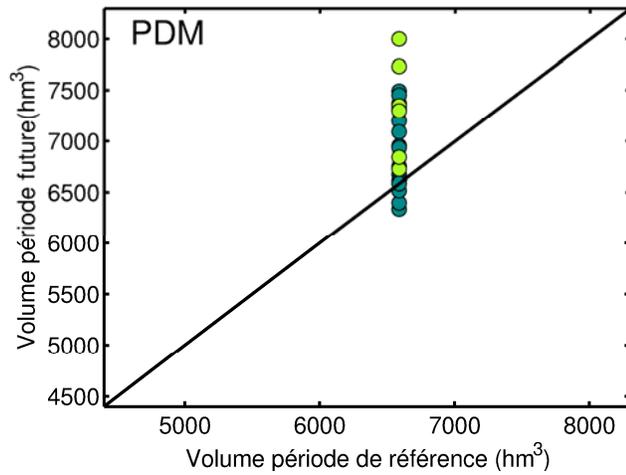
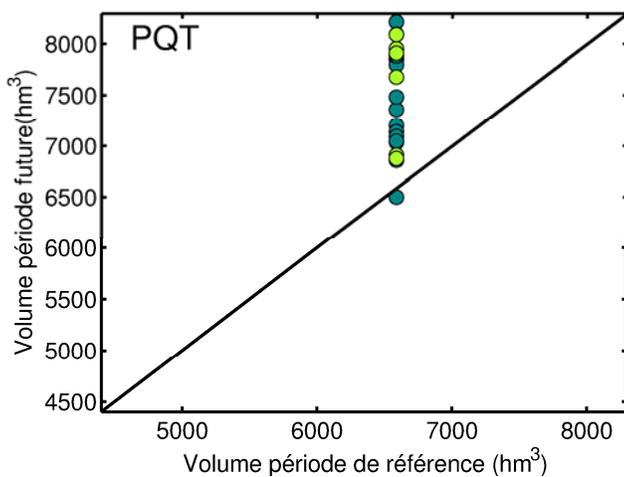
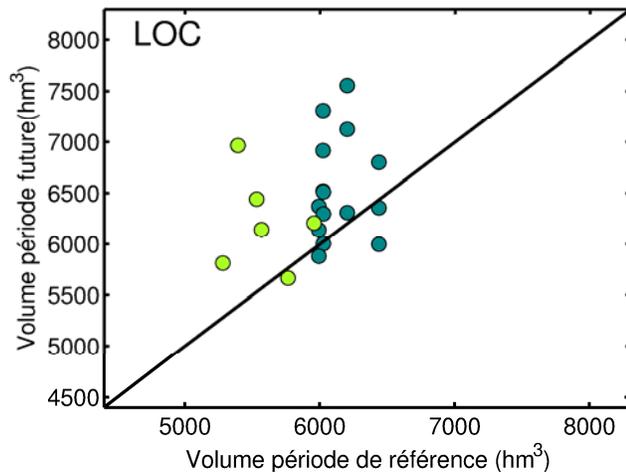
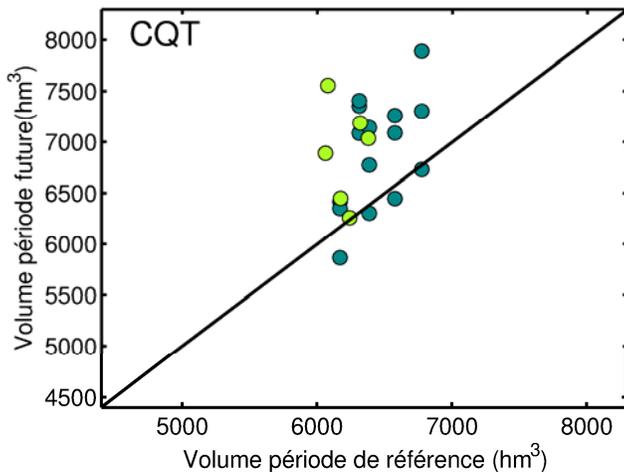
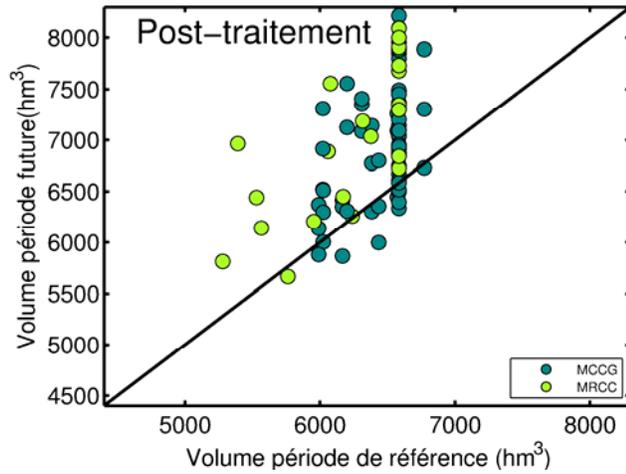
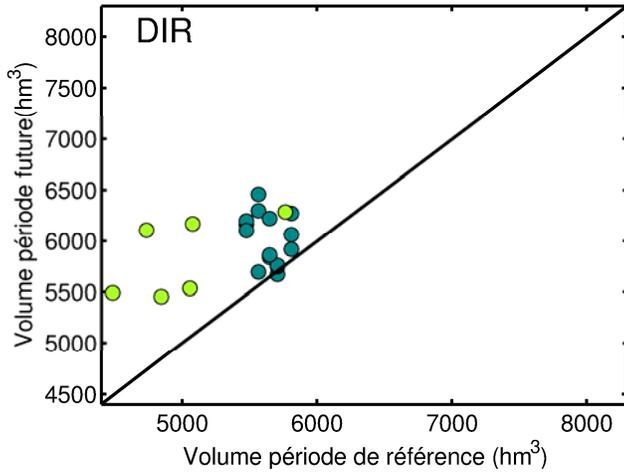
### 11.6.5 Rivière Natashquan



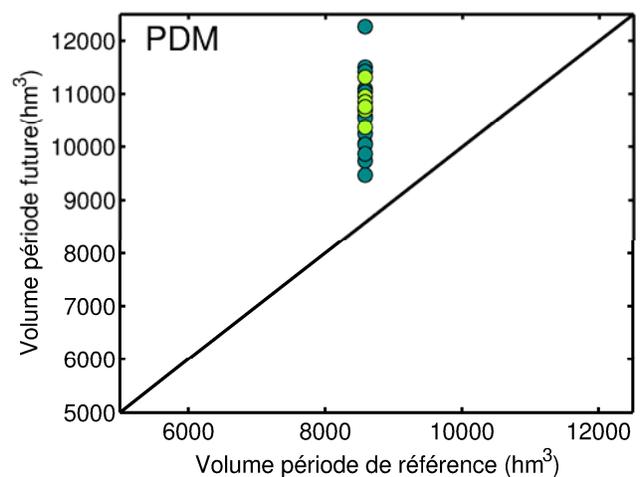
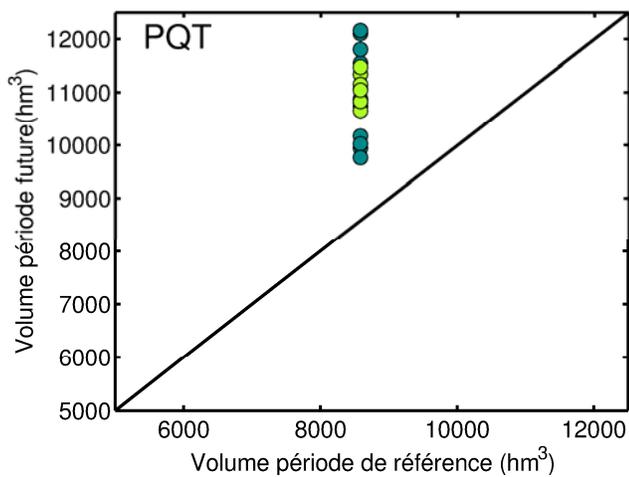
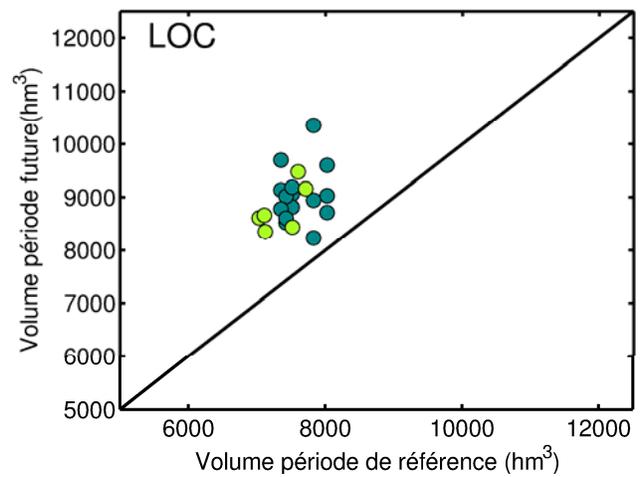
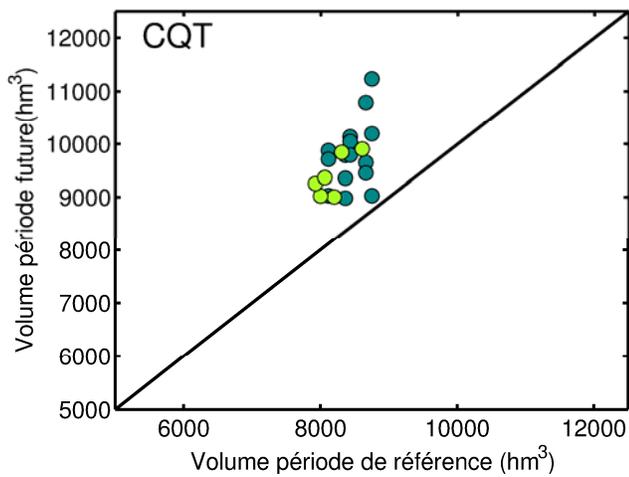
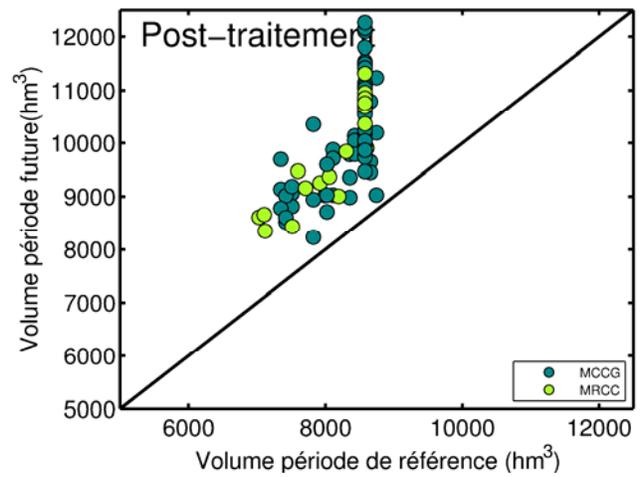
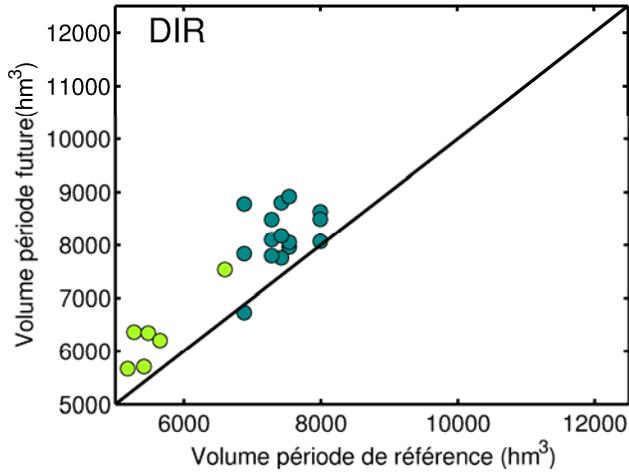
### 11.6.6 Rivière Moisie



**11.6.7 Rivière Petit Mécatina**



### 11.6.8 Rivière Manic-5



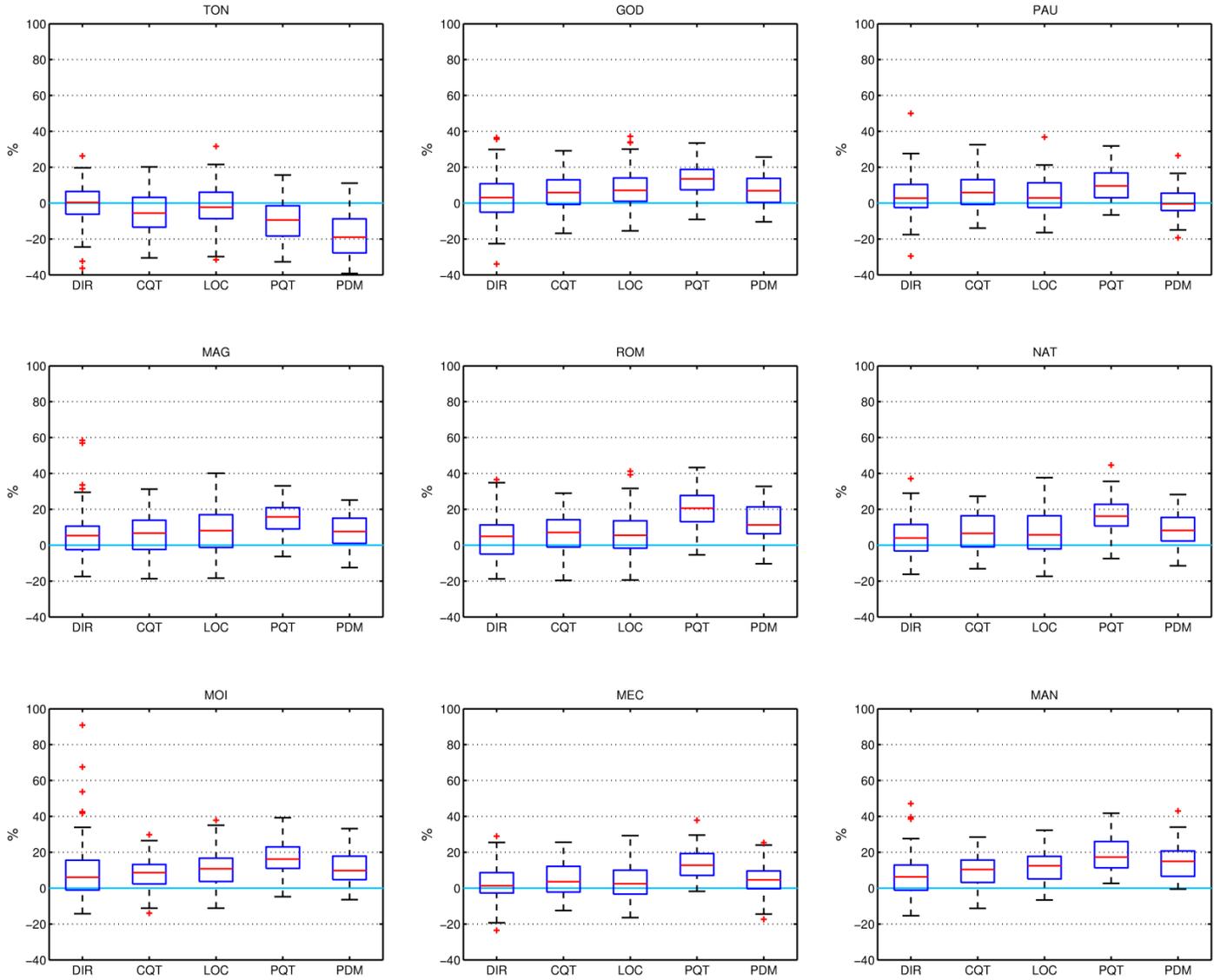
## 11.7 Lois d'ajustement choisies

Bassin	Loi	Référence					Futur					Total des scénarios	
		DIR	CQT	LOC	PQT	PDM	DIR	CQT	LOC	PQT	PDM	Refer	Futur
Au Tonnerre	Gamma	11	11	11	0	0	32	19	19	29	35	33	134
	Gumbel	5	6	6	0	0	13	10	11	1	5	17	40
	GEV	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	1	2
	Log-Normale	10	8	10	1	1	12	17	14	51	43	30	137
	Pearson 3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	Weibull	11	12	11	0	0	26	35	39	2	0	34	102
Godbout	Gamma	17	17	13	0	0	25	18	27	1	0	47	71
	Gumbel	1	4	7	1	1	10	15	11	58	47	14	141
	GEV	0	0	0	0	0	2	3	2	1	2	0	10
	Log-Normale	4	6	2	0	0	7	12	8	18	30	12	75
	Pearson 3	0	1	1	0	0	1	0	1	5	4	2	11
	Weibull	16	10	15	0	0	38	35	34	0	0	41	107
Saint-Paul	Gamma	21	15	15	0	0	23	25	29	49	26	51	152
	Gumbel	3	2	4	0	0	8	7	10	1	0	9	26
	GEV	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
	Log-Normale	3	9	5	1	1	13	13	11	12	2	19	51
	Pearson 3	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1
	Weibull	11	12	13	0	0	39	36	32	21	55	36	183
Magpie	Gamma	12	11	14	1	1	22	30	29	42	42	39	165
	Gumbel	5	2	5	0	0	17	12	14	14	11	12	68
	GEV	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	3
	Log-Normale	10	14	11	0	0	16	15	12	9	10	35	62
	Pearson 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Weibull	11	11	8	0	0	27	25	27	18	20	30	117
Romaine	Gamma	17	13	10	1	1	26	27	25	26	26	42	130
	Gumbel	4	4	4	0	0	16	14	14	6	2	12	52
	GEV	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2
	Log-Normale	8	10	12	0	0	14	12	13	25	12	30	76
	Pearson 3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	Weibull	9	10	12	0	0	27	29	31	26	42	31	155
Natashquan	Gamma	13	15	14	1	1	27	24	21	26	31	44	129
	Gumbel	6	5	6	0	0	18	14	14	19	7	17	72
	GEV	0	0	0	0	0	0	5	1	1	2	0	9
	Log-Normale	9	8	8	0	0	7	13	17	19	14	25	70
	Pearson 3	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
	Weibull	10	9	10	0	0	31	27	29	18	29	29	134
Moisie	Gamma	14	12	14	0	0	22	17	26	3	12	40	80
	Gumbel	4	4	6	0	0	26	16	14	41	29	14	126
	GEV	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2
	Log-Normale	9	6	7	0	0	11	16	13	8	11	22	59
	Pearson 3	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
	Weibull	10	14	10	1	1	24	34	28	30	31	36	147
Petit-Mécatina	Gamma	16	19	21	0	0	22	30	28	30	23	56	133
	Gumbel	3	1	2	1	1	12	12	12	24	4	8	64
	GEV	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
	Log-Normale	7	8	5	0	0	11	9	14	16	10	20	60
	Pearson 3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	Weibull	11	8	9	0	0	37	31	29	13	46	28	156
Manic 5	Gamma	16	10	13	0	0	30	23	24	47	36	39	160
	Gumbel	6	8	7	0	0	19	14	15	2	1	21	51
	GEV	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

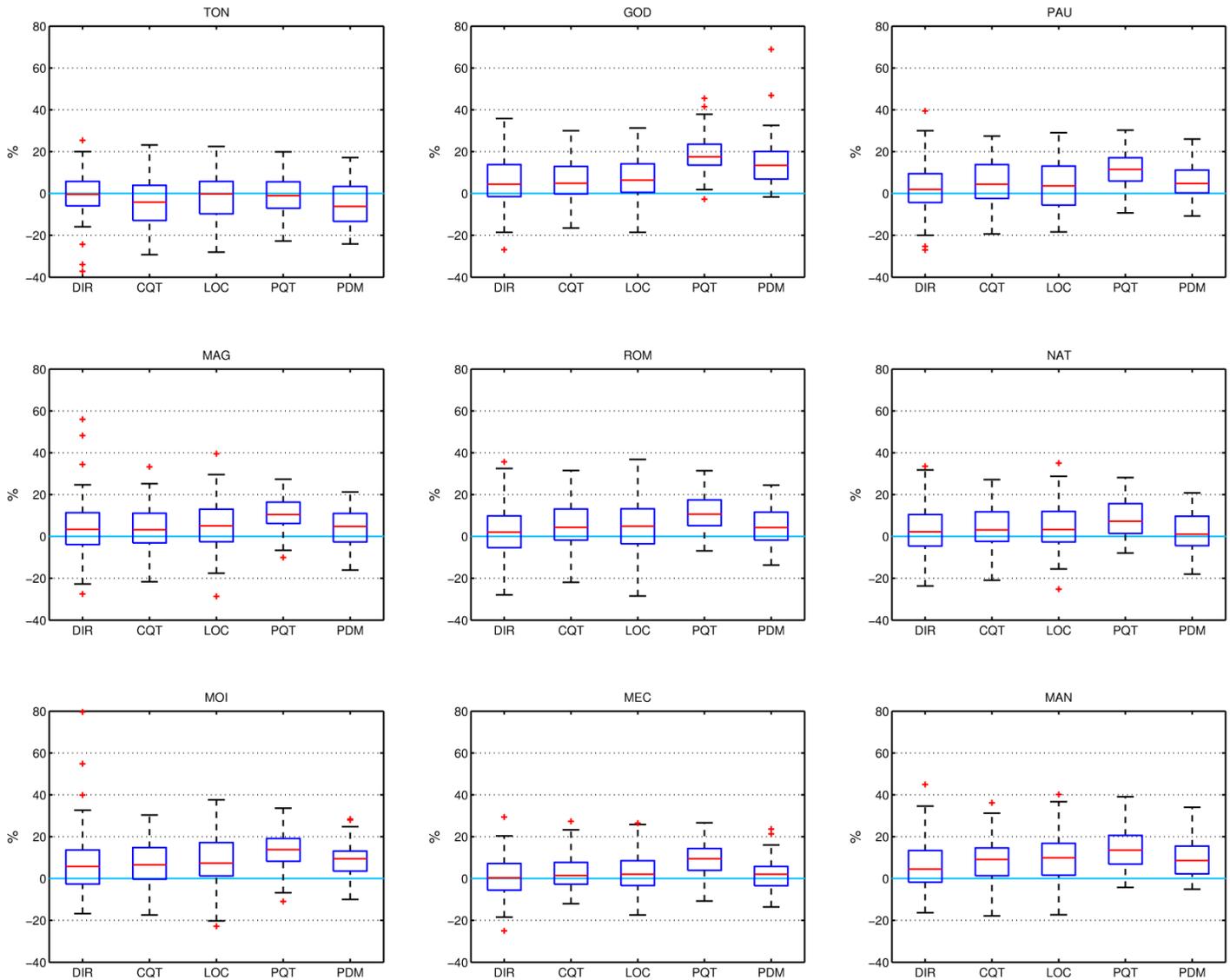
	Log-Normale	3	4	5	0	0	10	10	9	18	16	12	63
	Pearson 3	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	2
	Weibull	13	15	12	1	1	24	35	35	16	29	42	139

# 11.8 Écart relatif entre les volumes de crue future et de référence (fut-ref/ref), pour une certaine période de récurrence

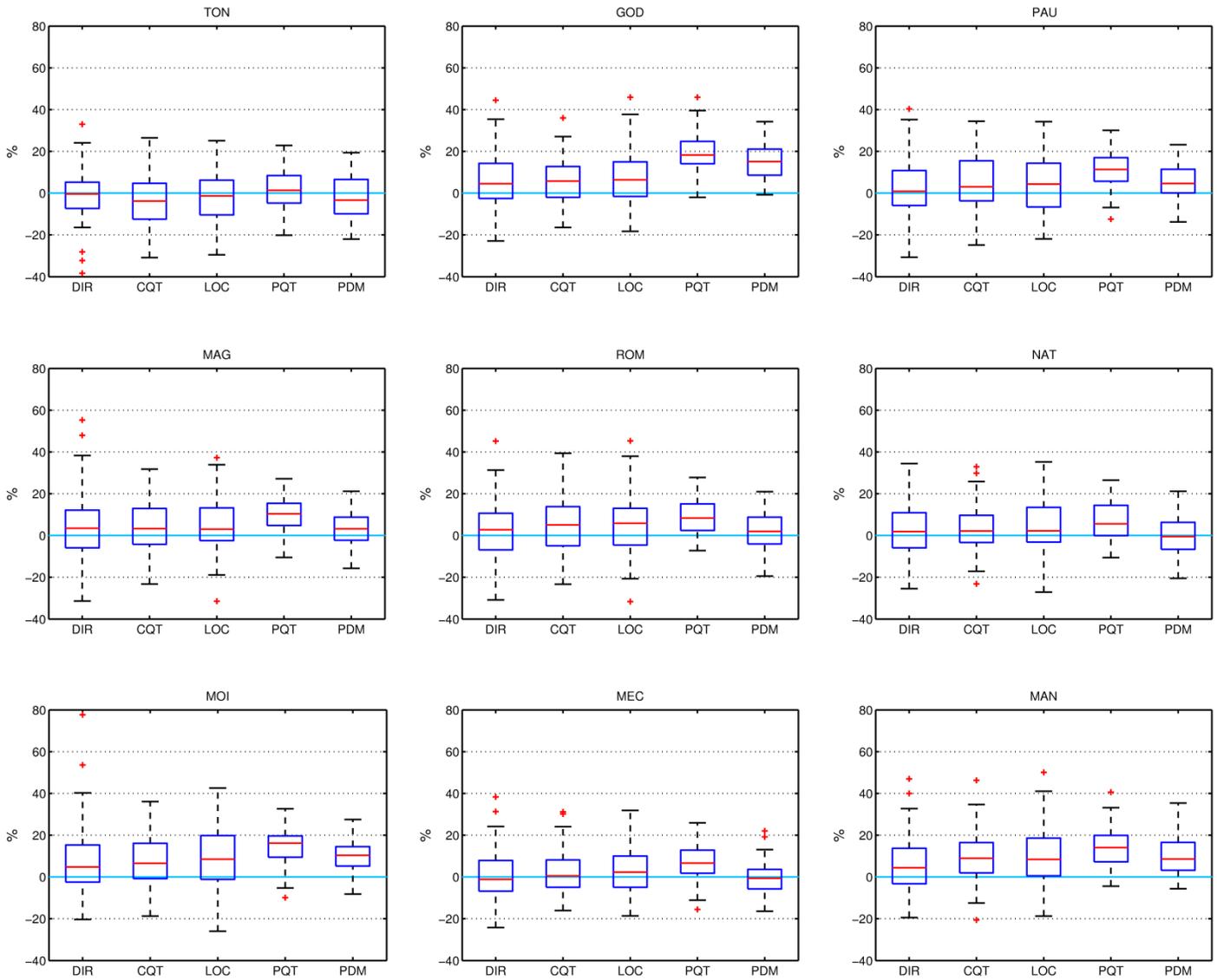
## 11.8.1 2 ans



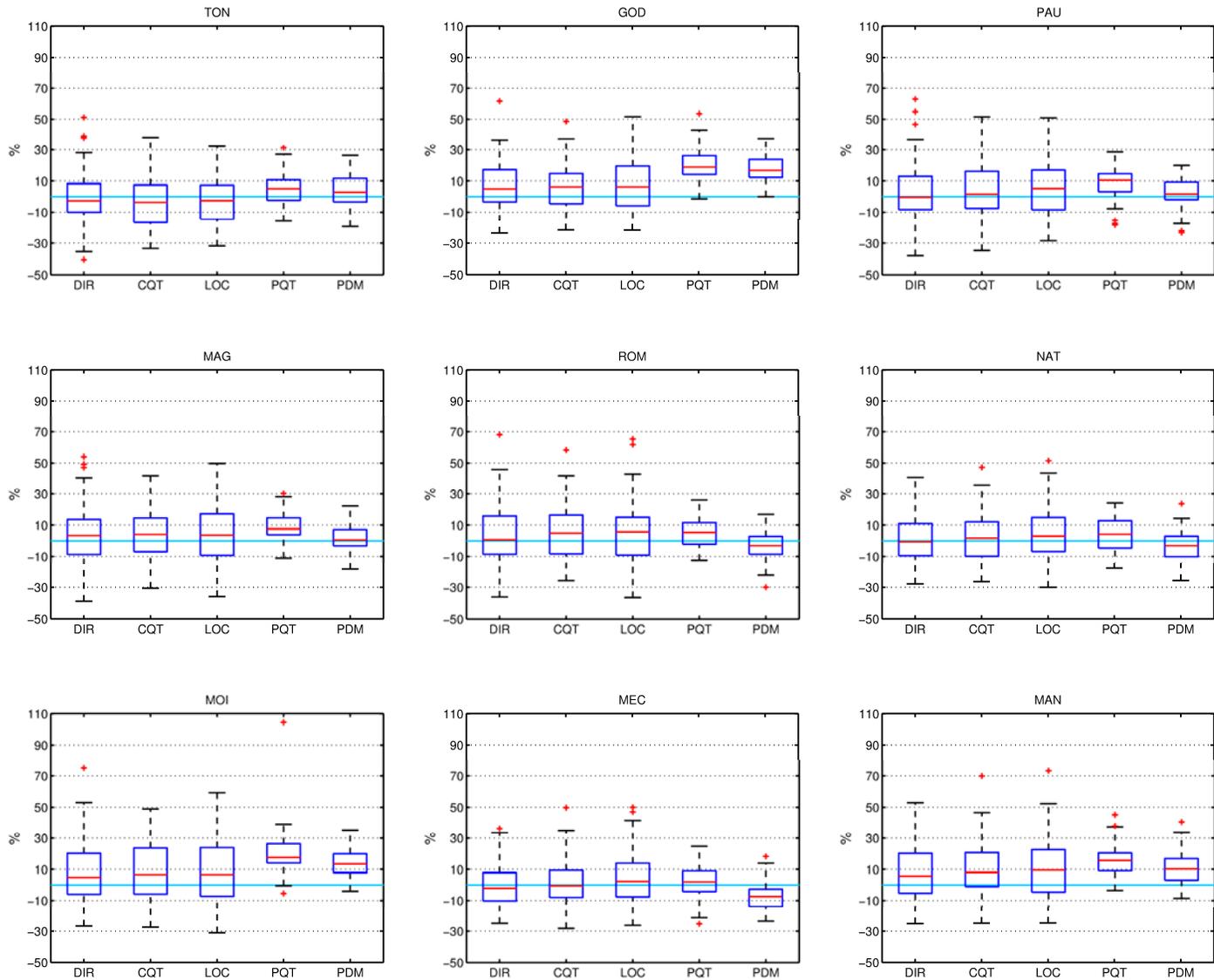
### 11.8.2 10 ans



### 11.8.3 20 ans



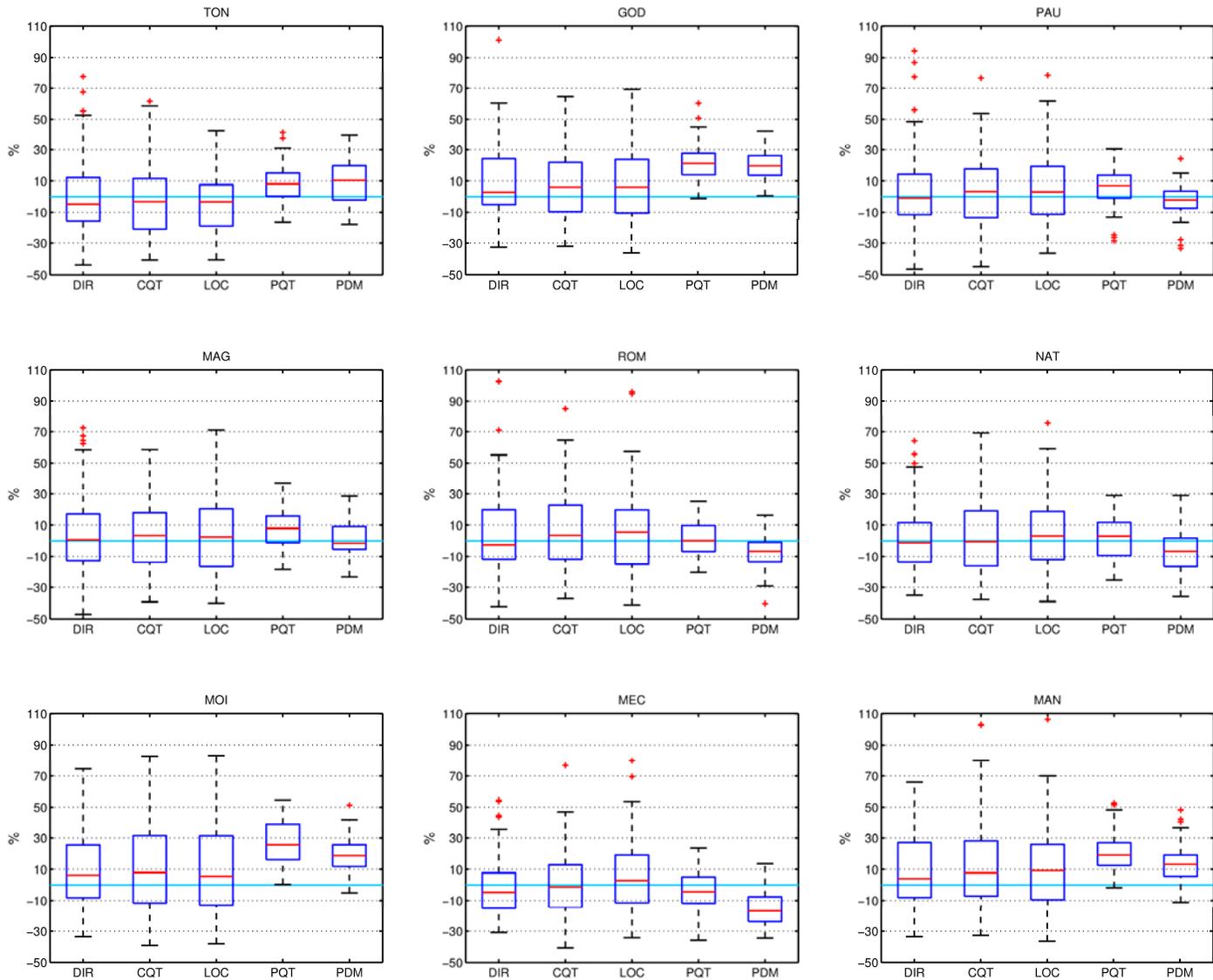
11.8.4 100 ans



\*Valeur à l'écart non montré dans le graphique :

Bassin GOD : 133 (DIR), 209 (LOC), 524 (PQT), 1171 (PDM)

11.8.5 1000 ans



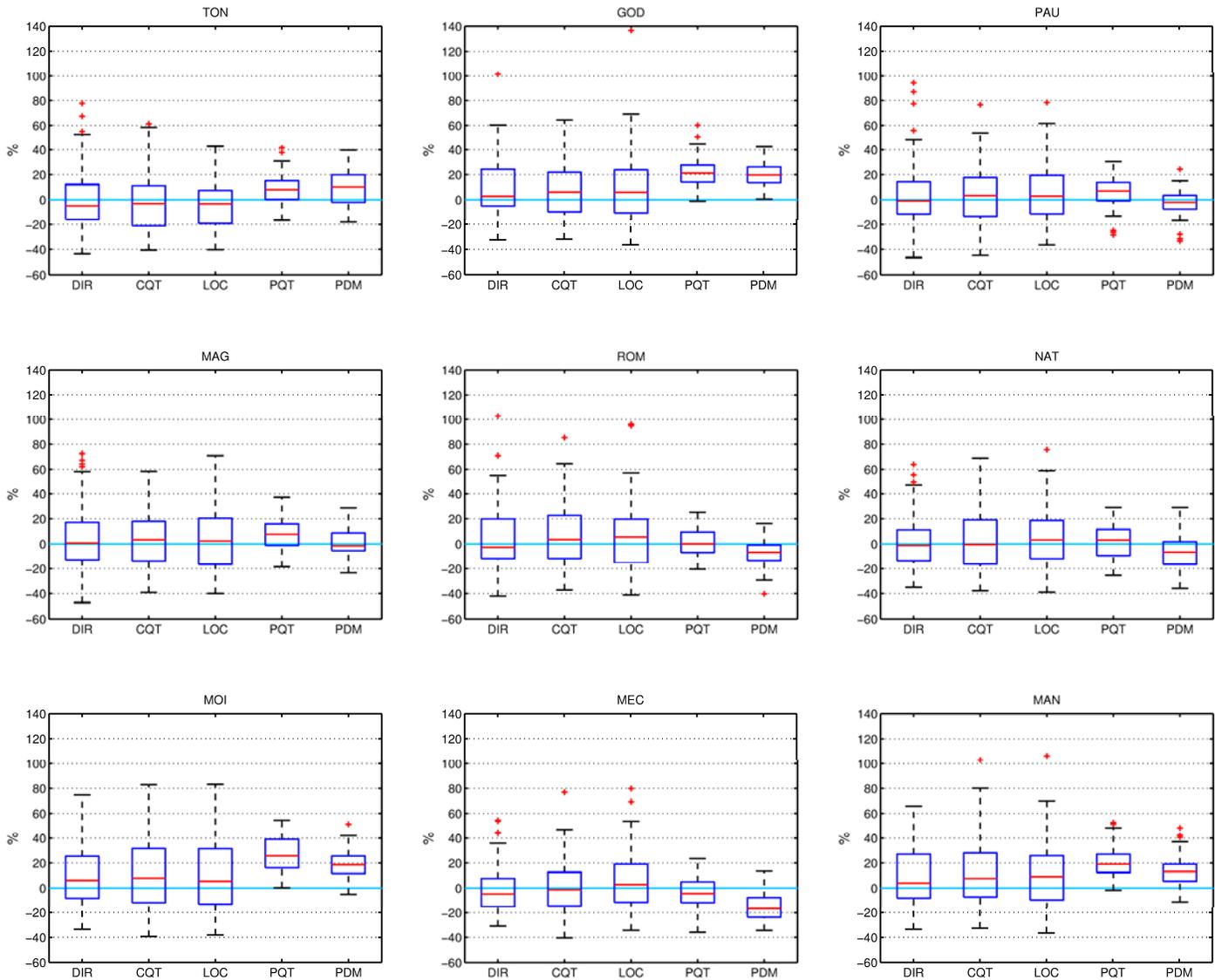
\*Valeur à l'écart non montré dans le graphique :

Bassin MEC : 536 (DIR)

Bassin MOI : 470 (PQT)

Bassin GOD : 447 (DIR), 1116 (LOC), 3918 (PQT), 3408 et 13 073 (PDM)

11.8.6 10000 ans



\*Valeur à l'écart non-montré dans le graphique :

Bassin MEC : 1695 (DIR)

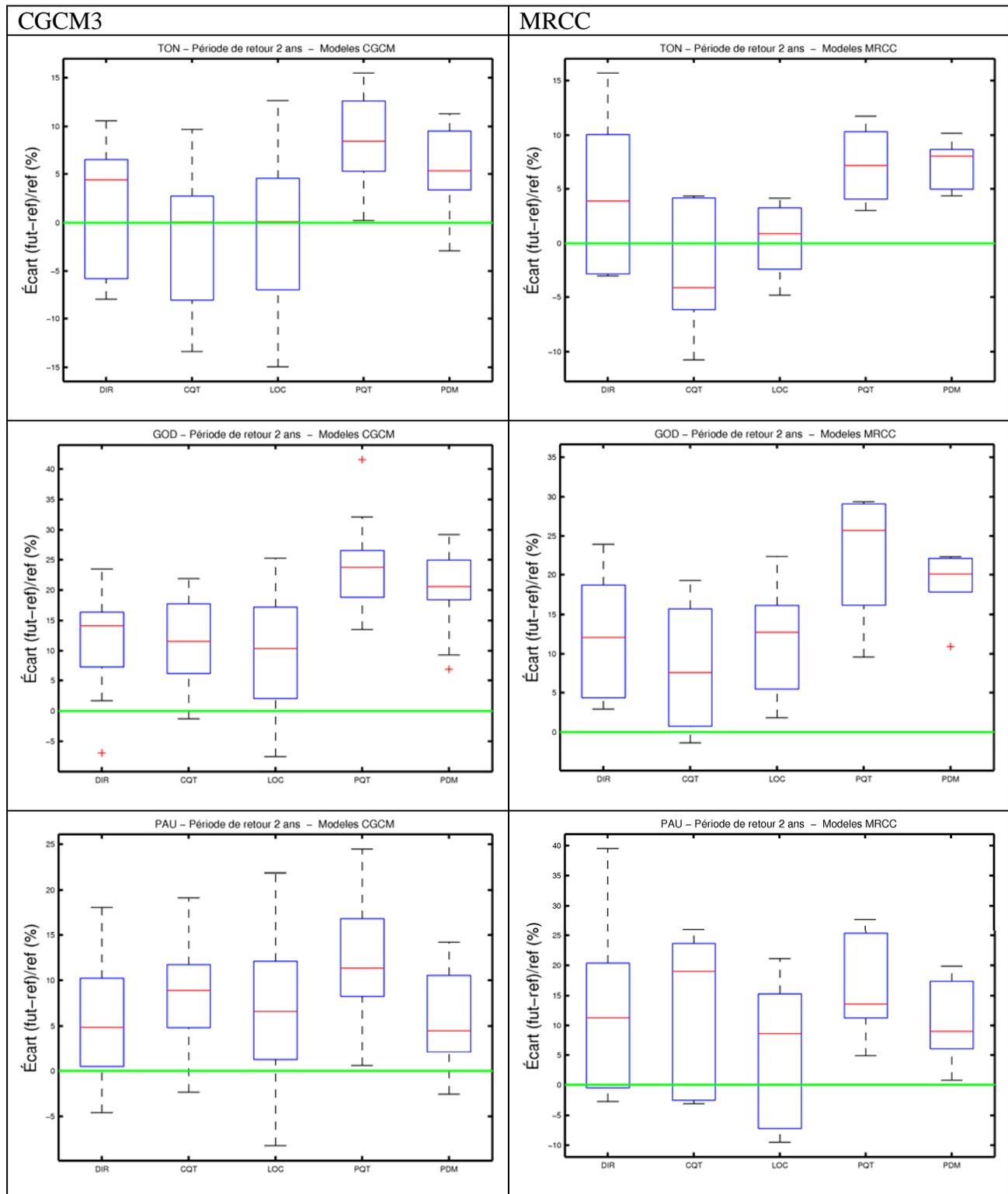
Bassin MOI : 1740 (PQT)

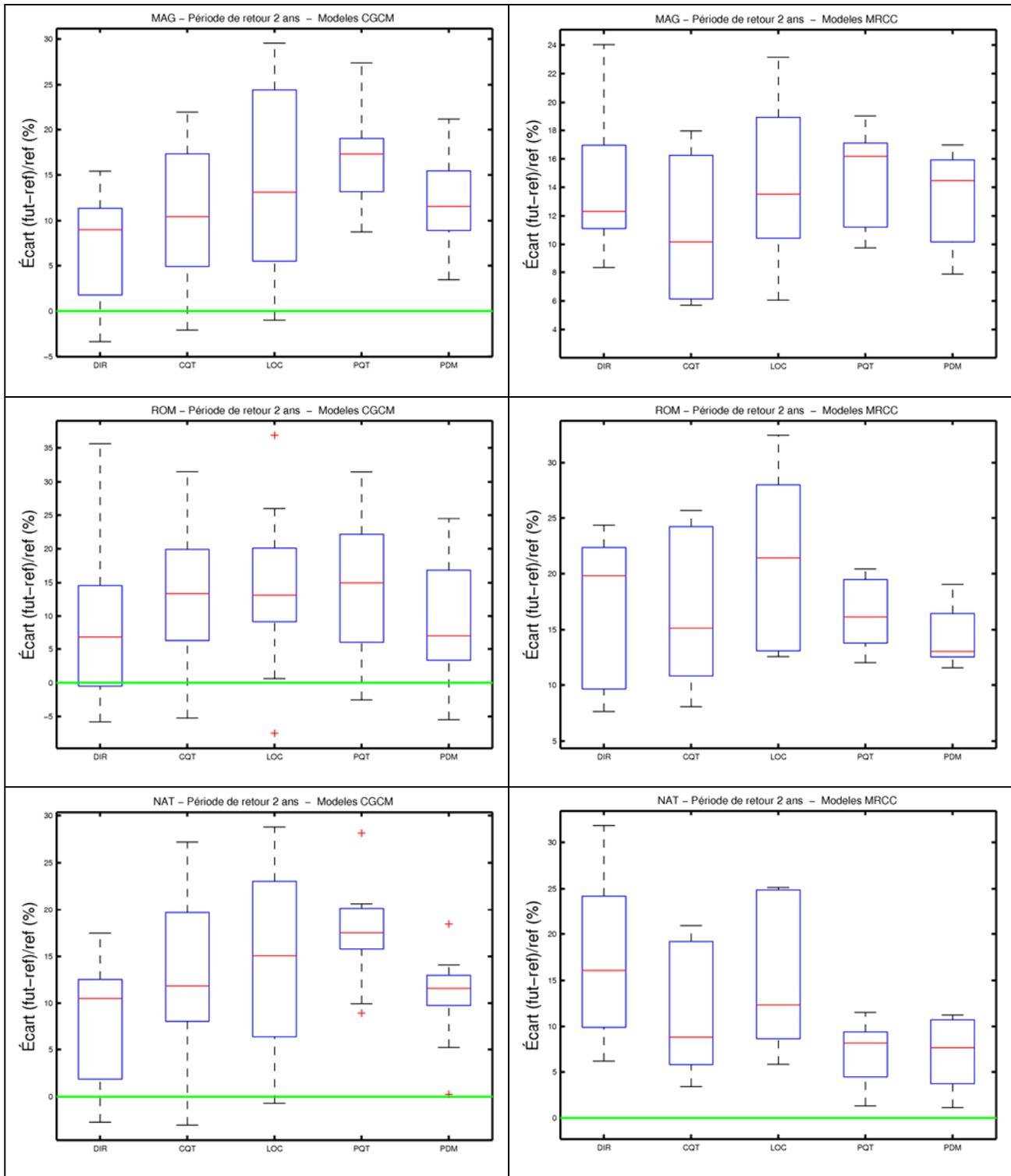
Bassin GOD : 1320 (DIR), 294 et 5325 (LOC), 21 829 et 145 332 (PDM), 1740 (PQT)

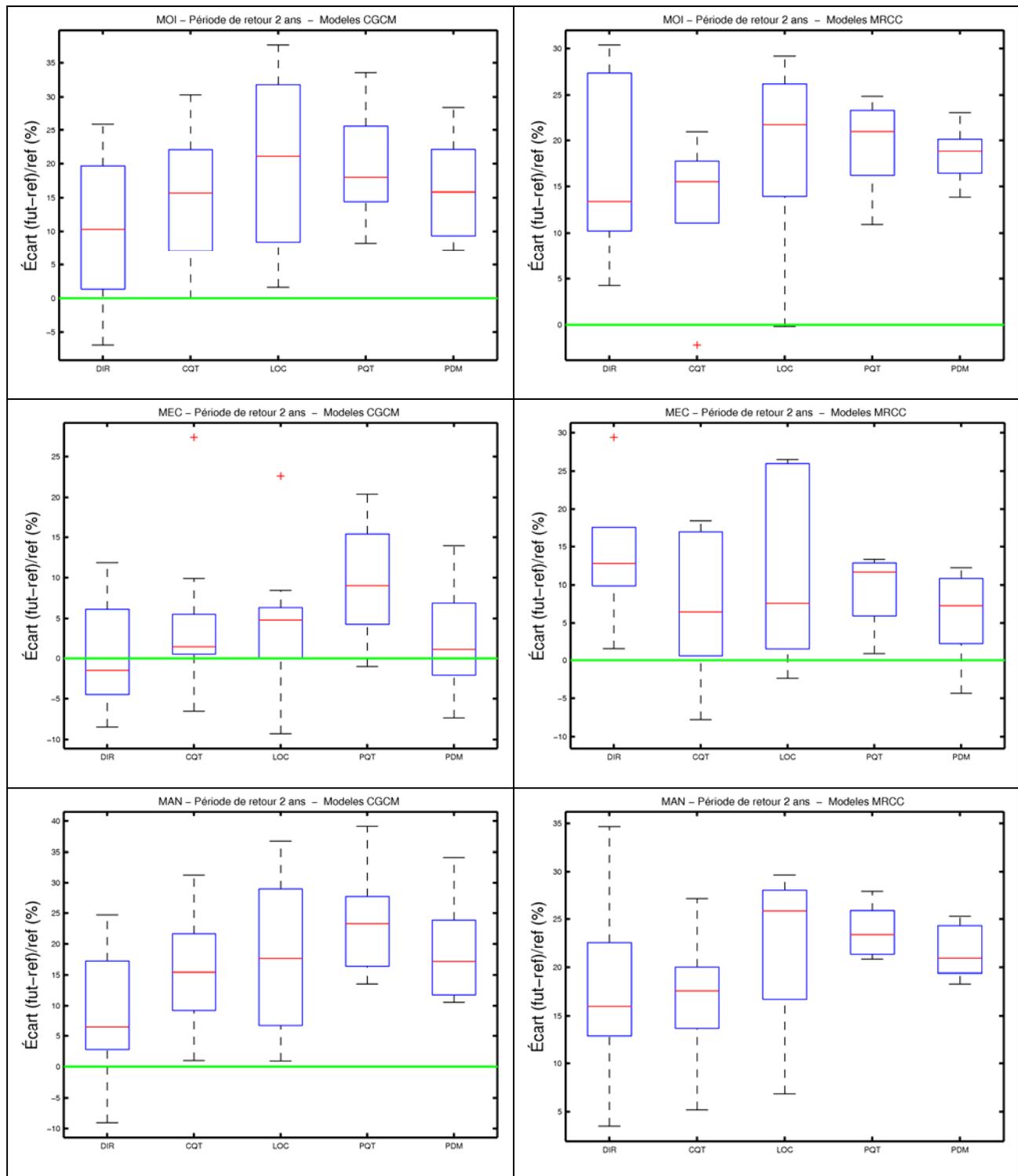
---

## **11.9 Écart entre le volume futur et de référence pour les périodes de retour 2 ans, 20 ans et 100 ans pour les scénarios hydrologiques simulés avec les scénarios du CGCM et du MRCC**

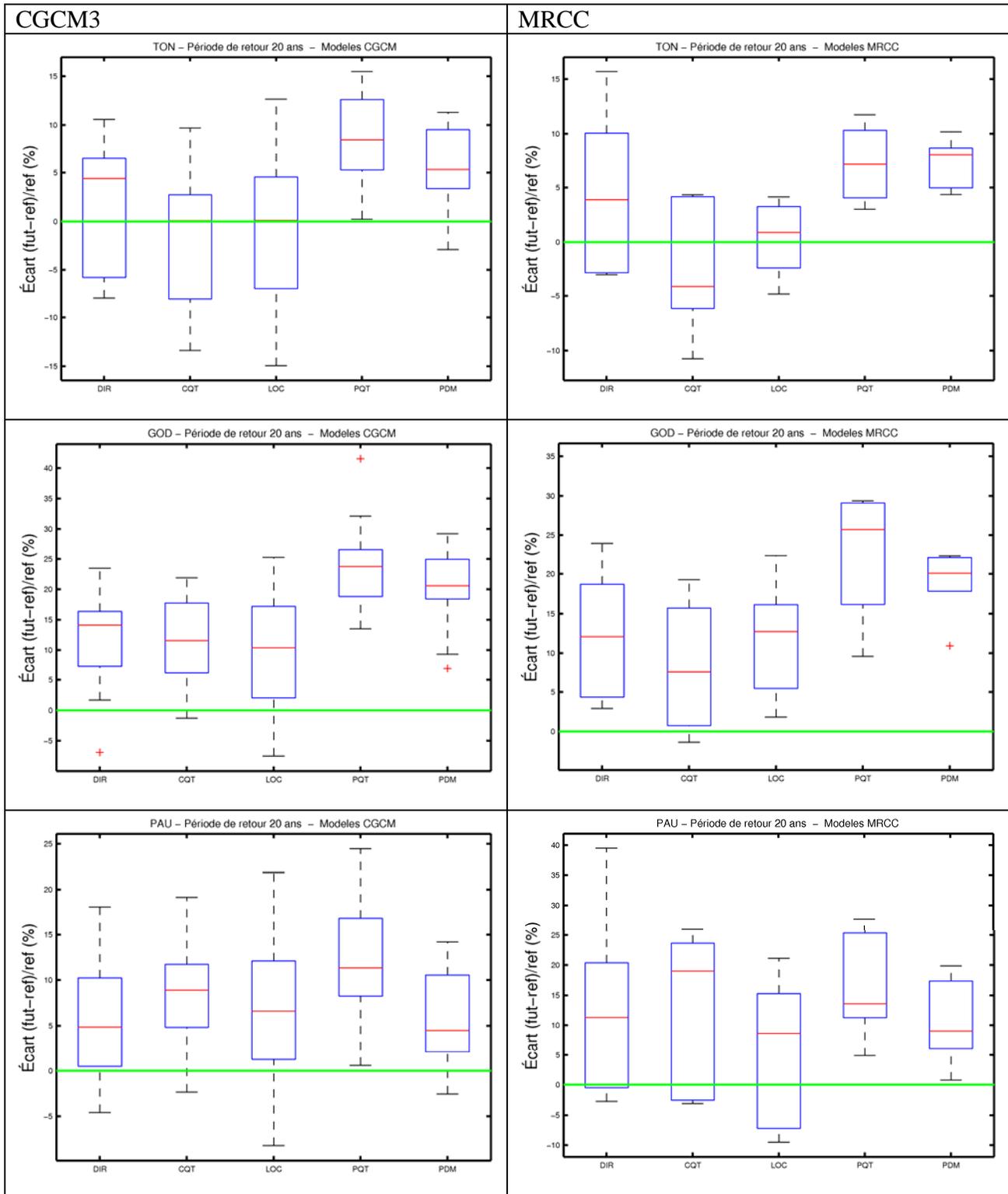
11.9.1 2 ans

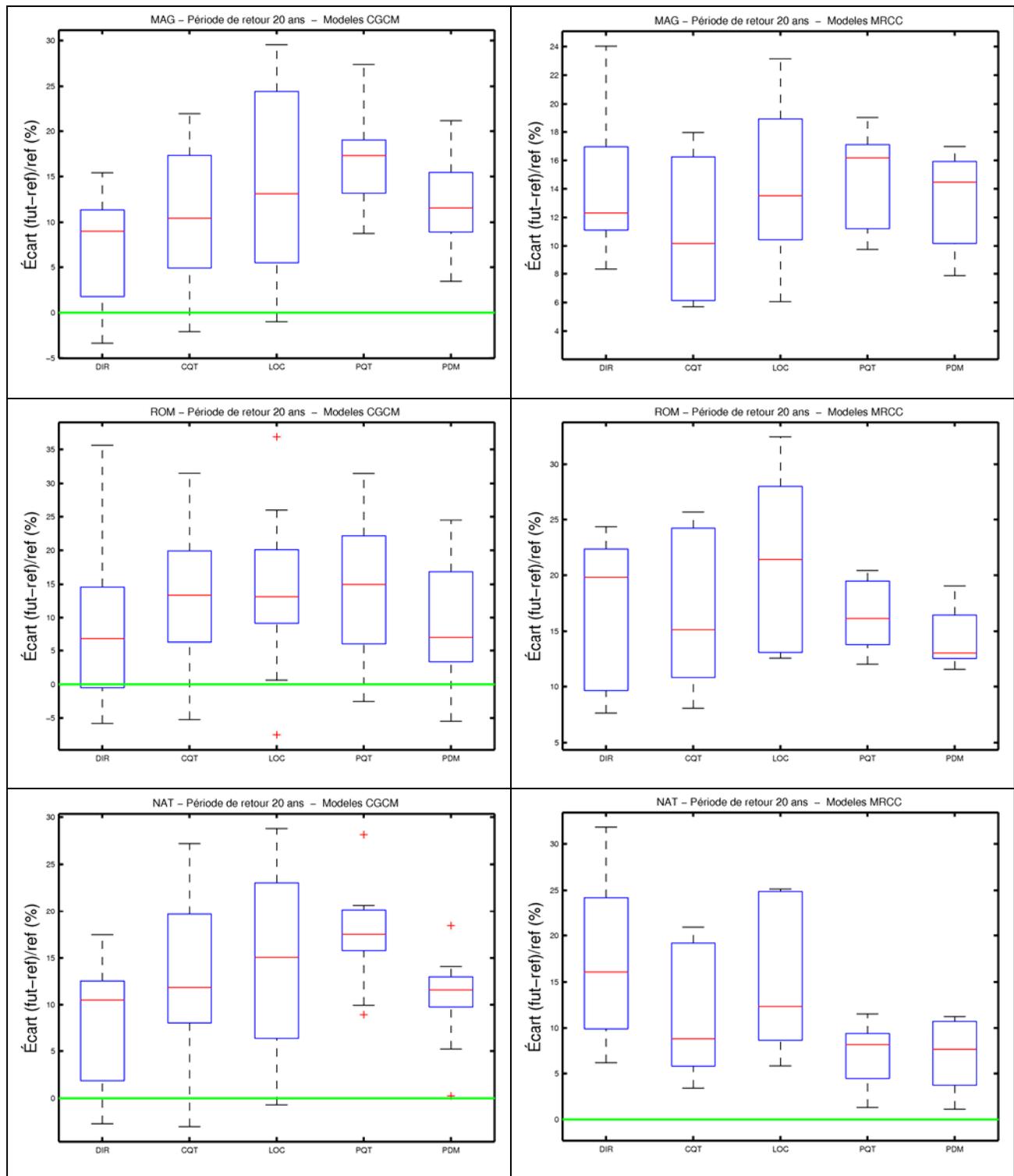


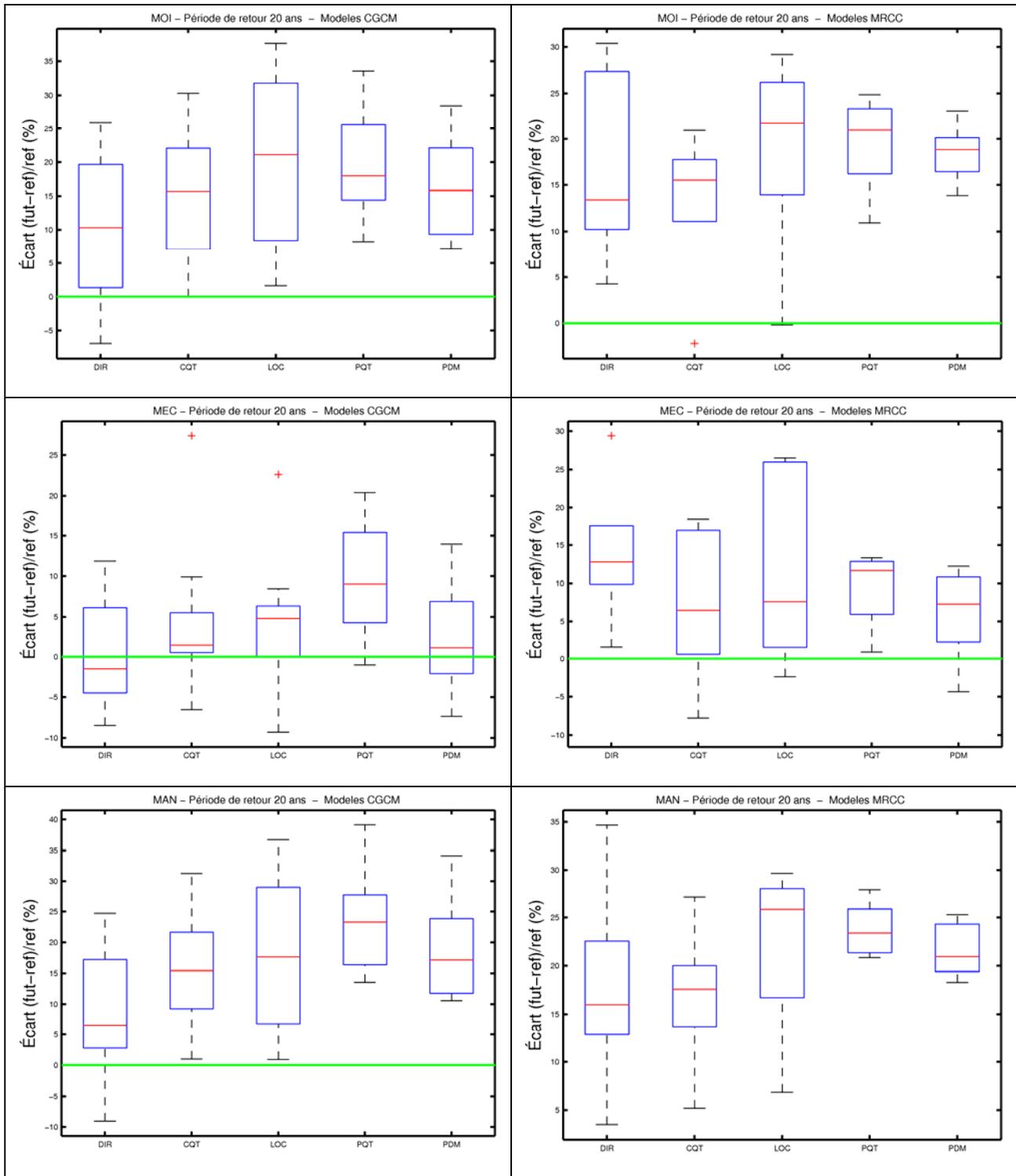




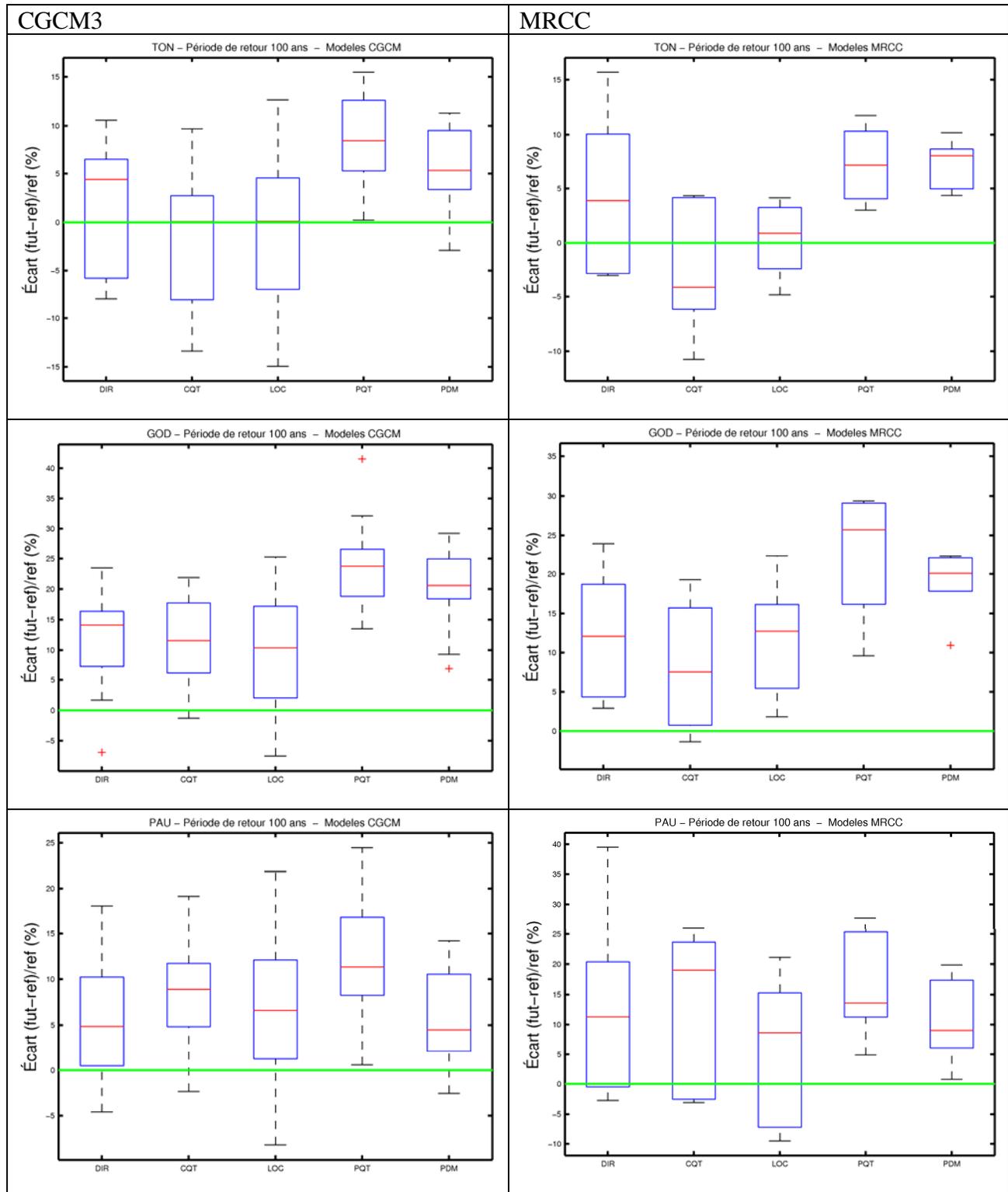
11.9.2 20 ans

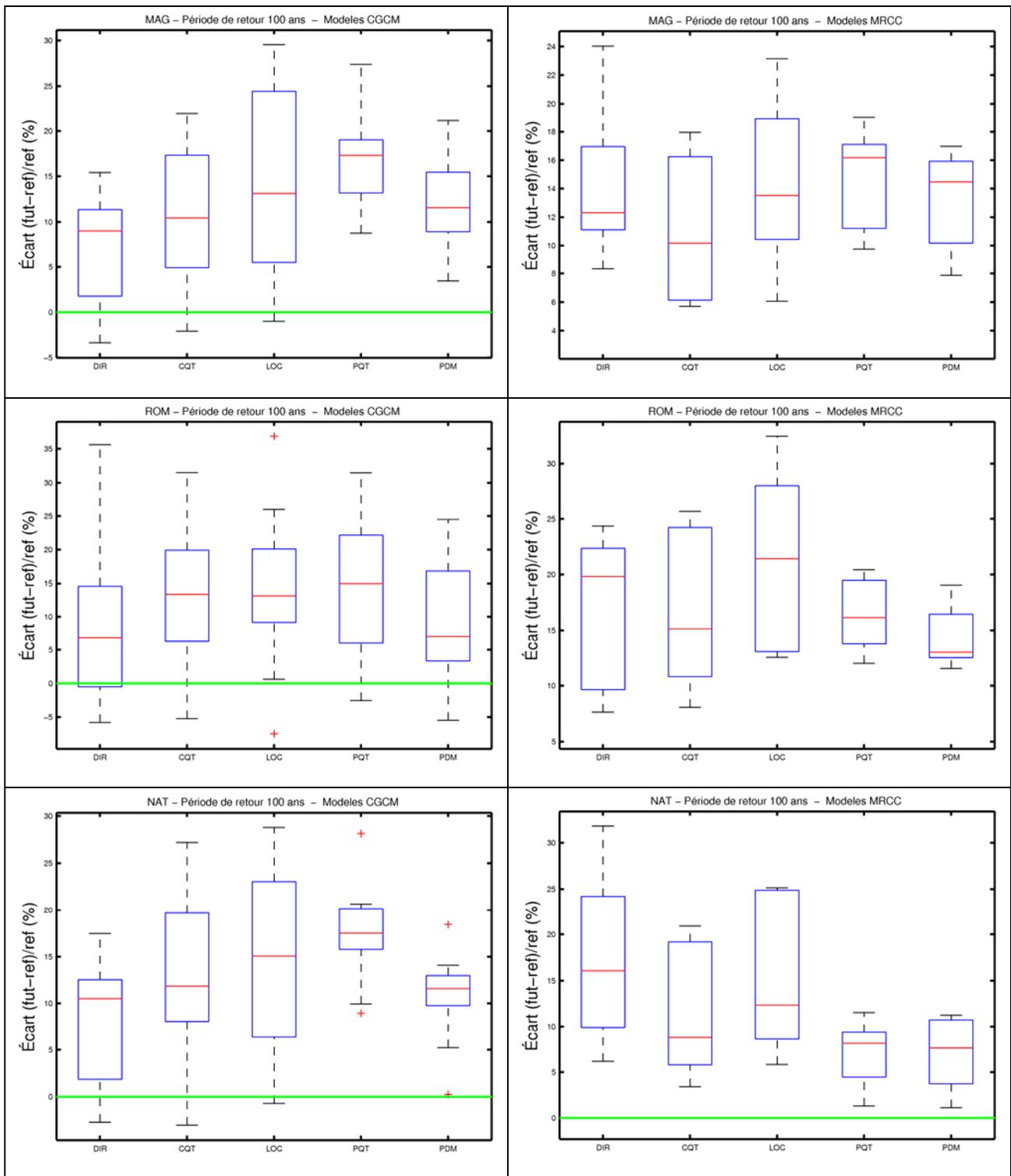


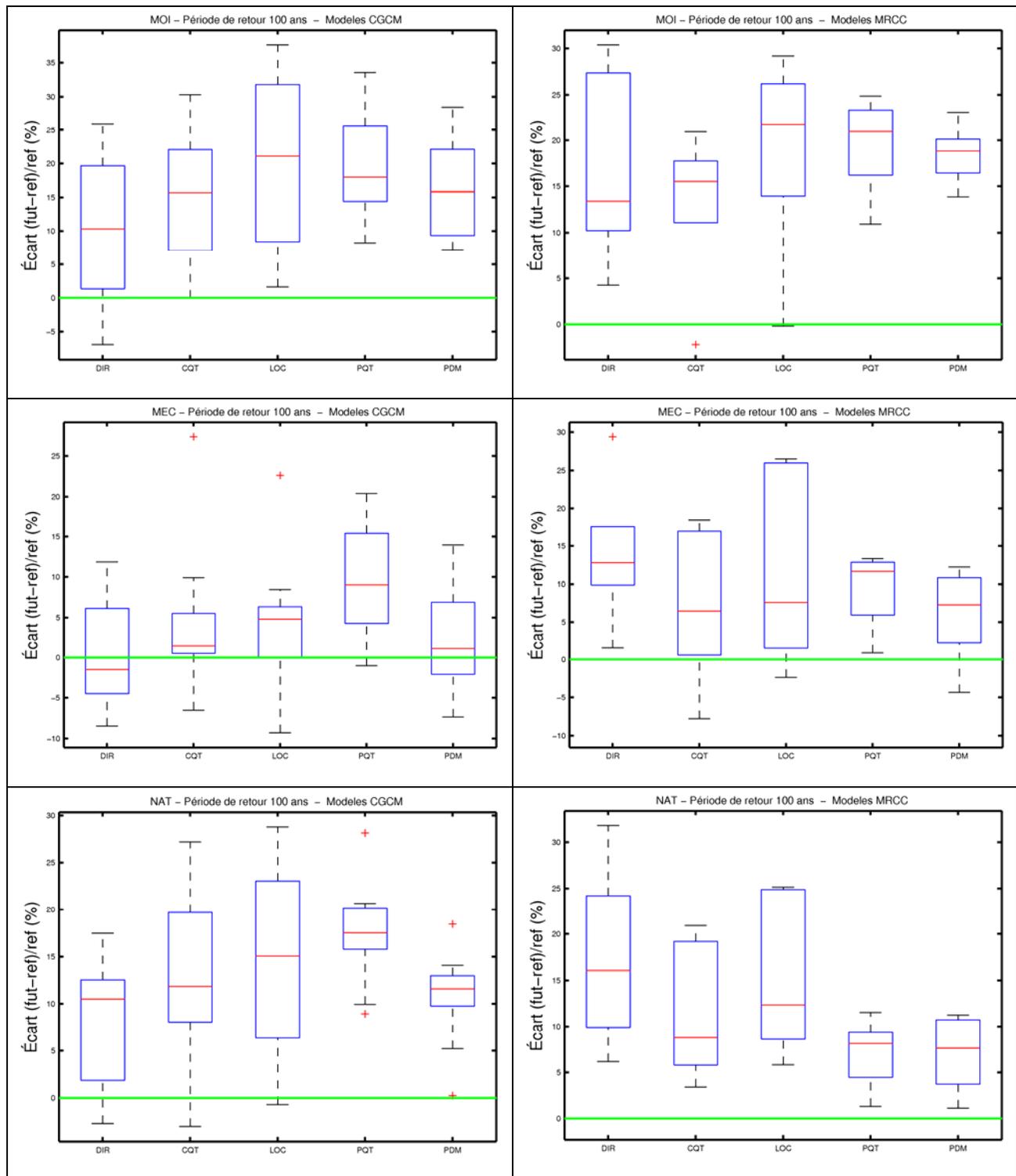




11.9.3 100 ans













Unité structurelle  
Direction principale ou direction –  
Hydro-Québec Équipement et services partagés  
Division d'Hydro-Québec

---

