

L'adaptation de la sécurité des ouvrages aux impacts des changements climatiques en utilisant des crues de faible récurrence et en informant les gestionnaires sur les incertitudes dans ce contexte

Mériem SAÏD, Anne-Catherine FAVRE,
Michel SLIVITZKY, Karine DION, Stéphane PUGIN

septembre 2012

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada

Fondsvert Québec



Table des matières

1. Introduction	3
2. Contexte / objectifs	3
3. Données	4
4. Méthodologies et résultats	6
5. Analyse et discussion	11
6. Conclusion et recommandations	12
7. Références	14

1. Introduction

Ce projet concerne l'adaptation de l'étude de la sécurité des ouvrages face aux changements climatiques. Il vise l'estimation des crues de faible récurrence (temps de retour $T = 20, 100, 1\,000$ et $10\,000$ ans) en tenant compte d'une potentielle non stationnarité induite par les changements climatiques.

Pour obtenir des séries de débits journaliers, nous avons utilisé la précipitation et les températures minimale et maximale journalières simulées par le Modèle régional canadien du climat (MRCC) en intrant du modèle hydrologique distribué HYDROTEL. Le couplage entre les sorties météo du MRCC et le modèle hydrologique a permis d'obtenir six séries¹ de 140 ans de débits journaliers par bassin versant d'intérêt. Les bassins versants qui revêtent un intérêt particulier dans le cadre de ce projet incluent le Haut-St-François, le lac Kénogami, la rivière Chaudière et la rivière Gatineau.

Une analyse fréquentielle des débits résultant permet d'estimer les quantiles d'intérêt. Il est très important dans ce contexte d'informer les gestionnaires sur les incertitudes statistiques et climatiques associées à une crue correspondant à un certain temps de retour.

Au cours de l'évolution du projet, il est apparu que l'éventuelle non stationnarité ne constituait pas un problème central. Par ailleurs, nous avons mis en évidence que les incertitudes statistiques et climatiques n'étaient pas les seules en jeu, et que l'incertitude due à la production elle-même des séries pouvait être très importante. Cette incertitude recouvre à la fois la calibration d'Hydrotel, le modèle lui-même (en ce sens qu'un autre modèle hydrologique pourrait être adopté) et l'utilisation elle-même d'un modèle hydrologique. En effet, ce projet de recherche visait explicitement l'analyse fréquentielle de débits issus du modèle Hydrotel. Cependant, l'utilisation d'un modèle hydrologique n'est pas la seule façon d'obtenir des débits maximum annuels en climat futur de sorte que cette utilisation peut elle-même être vue comme une incertitude.

2. Contexte / objectifs

La thématique générale de ce projet concerne l'analyse fréquentielle qui vise le traitement statistique des événements rares. La grandeur d'un événement rare est inversement proportionnelle à sa fréquence d'occurrence : des événements de très fortes magnitudes ont lieu moins fréquemment que des événements plus modérés. Le but de l'analyse fréquentielle consiste à faire le lien entre un événement hydrologique et sa fréquence d'occurrence par le biais des distributions de probabilité.

D'une part, la détermination des crues de faible récurrence (*i.e.* possédant un temps de retour élevé) est fondamentale pour un grand nombre d'applications dans le domaine des

¹ Dans le projet, seulement quatre séries devaient être considérées, à savoir les séries associées au MRCC piloté par le Modèle couplé climatique global (MCCG). Deux séries se sont ajoutées issues du pilote allemand ECHAM5.

ressources en eau. D'autre part, nous constatons une augmentation de l'intensité des précipitations qui, liée à d'autres phénomènes climatiques, pourrait d'ores et déjà avoir une incidence sur l'intensité et la fréquence des crues.

Dans le futur l'augmentation globale de la température induite par les changements climatiques va conduire à une augmentation de l'intensité et de la fréquence des précipitations intenses. Les changements climatiques conduiront donc vraisemblablement à une augmentation appréhendée à la fois de la fréquence et de l'intensité des extrêmes de débits. Il est par conséquent nécessaire d'adapter dès maintenant les approches d'évaluation de la sécurité des barrages pour en tenir compte puisqu'elles impliquent une vision et des investissements à long terme qui ne pourront être optimaux que s'ils considèrent adéquatement les changements climatiques.

Ce projet s'inscrit dans ce cadre et vise à l'adaptation de l'étude de la sécurité des barrages en utilisant les crues de faible récurrence. Il est très important dans ce contexte d'informer le gestionnaire sur les incertitudes associées à une crue correspondant à un certain temps de retour. Il est également fondamental de distinguer entre les différentes sources d'incertitude (statistiques, climatiques et dues à la production des séries), et de fournir des recommandations quant aux possibilités de les réduire.

Les principaux objectifs de ce projet concernent :

- L'évaluation de l'impact des changements climatiques sur les crues de faible récurrence (temps de retour $T = 20, 100, 1'000$ et $10'000$ ans).
- L'estimation des incertitudes climatique et statistique sur les crues de faible récurrence.
- L'étude de la gestion de l'incertitude climatique du point de vue de l'utilisateur.
- L'émission de recommandations d'adaptation selon les usagers (administrateurs des lois et propriétaires de barrages).

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, les incertitudes dues à la production des séries se sont ajoutées, en cours de projet, au point B.

3. Données

Trois bassins versants ont été considérés dans tout ou partie des analyses : Baskatong, Jules-Allard et Aux Saumons. Ces bassins sont brièvement décrits dans le tableau 1. Le bassin de la rivière Aux Saumons a été rajouté dans nos analyses car sa taille est du même ordre de grandeur que Jules-Allard mais il n'est pas influencé. Il est à noter que nous n'avons pas travaillé avec les bassins de la rivière Gatineau et du lac Kénogami, car nous n'avons pas été en mesure d'obtenir les paramètres d'Hydrotel sur ces bassins.

Code	Bassin versant	Station	Superficie (km ²)	Remarques
BAS	Baskatong	T59	15 833.0	Sous-bassin de la Gatineau
JAL	Jules-Allard	T40	1 262.6	Sous-bassins du Haut-Saint-François
SAU	Aux Saumons	T219	737.4	

Tab. 1. Description des bassins versants incluant code, numéro de la station et superficie.

Pour les données en climat actuel, nous disposons, pour chaque bassin, des séries chronologiques suivantes :

- [1] une série observée;
- [2] une série simulée via Hydrotel avec la météo observée en intrant;
- [3] une série simulée via Hydrotel avec la météo provenant du MRCC en intrant (voir le tableau 2).

QC	AMNO	Pilote	Période	MRCC
Simulations pilotées par MCGG3.1				
afx	aet	MCGG3.1 #4	1961–2099	4.2.3
agr	aev	MCGG3.1 #5	1961–2099	4.2.3
Simulations pilotées par ECHAM5				
aha	agx	ECHAM5 #1	1961–2099	4.2.3

[4] Tab. 2. Description des simulations du MRCC comprenant le domaine, le pilote, la période et la version du MRCC.

Notons que, pour le bassin Baskatong et toutes les séries obtenues par l'intermédiaire d'Hydrotel, nous disposons de deux calibrations : l'une d'elles a été obtenue par optimisation du critère de Nash-Sutcliffe sur tous les jours de l'année tandis que l'autre provient de la minimisation de l'erreur quadratique moyenne sur les pointes de crue printanières [Saïd, 2011, Annexe A]. Les périodes associées à des observations (débit ou météo) sont données dans le tableau 3 [Dion, 2011]. Pour les débits observés, la série du bassin Baskatong est complète mais il existe de nombreuses données manquantes pour Jules-Allard et Aux Saumons, principalement les mois d'hiver de décembre à février [Dion, 2011, Pugin, 2012].

Code	Bassin versant	Station	Débits	Météo
BAS	Baskatong	T59	1969–2007	1970–2005
JAL	Jules-Allard	T40	1970–2008	1961–2008
SAU	Aux Saumons	T219	1975–2008	1961–2008

Tab. 3. Périodes d'observation pour les débits et les données météorologiques

Pour l'analyse des changements climatiques, les séries ont été obtenues de la façon suivante :

1. la météo est toujours issue du MRCC (période 1961–2099);
2. l'écoulement annuel moyen peut être obtenu :
 - par Hydrotel avec la météo du MRCC en intrant;
 - par un couplage entre le bilan hydrologique et le bilan atmosphérique à partir des sorties du MRCC (sans recourir à un modèle hydrologique);
3. l'écoulement maximum annuel est produit :
 - par Hydrotel avec la météo du MRCC en intrant;
 - par GR4J avec la météo du MRCC en intrant;
 - en établissant un lien entre les maxima annuels des débits sommés sur d jours (volumes) produits par les simulations climatiques et les débits maximum annuels observés et en utilisant le lien ainsi établi en climat futur.

4. Méthodologies et résultats

Climat actuel

Rapports intermédiaires : [Dion, 2011](#); Farvacque *et al.*, 2011; [Saïd, 2011](#); Pugin, 2012.

Pour les trois bassins, le MRCC surestime toujours la moyenne des débits annuels moyens alors qu'Hydrotel la sous-estime presque toujours [Pugin, 2012]. Pour le bassin Baskatong, pour lequel nous disposons de deux calibrations d'Hydrotel, l'une d'elle a tendance à produire des débits annuels moyens surestimés tandis que l'autre conduit à des débits sous-estimés [[Saïd, 2011](#)]. Pour les trois bassins, les quantiles associés aux séries simulées (via le MRCC) ont tendance à presque toujours sous-estimer les quantiles des séries observées [[Dion, 2011](#)]. En termes de stationnarité, il n'y a pas lieu de s'inquiéter dans la mesure où les biais éventuels sont constants dans le temps [[Saïd, 2011](#); Pugin, 2012].

Écoulement annuel moyen pour la période 1961–2099

Rapports intermédiaires : [Saïd, 2011](#); [Saïd et al., 2012](#); Pugin, 2012.

Comparaison de deux calibrations d'Hydrotel, bassin Baskatong

Les analyses sur l'écoulement annuel moyen ont d'abord concerné la comparaison des deux calibrations pour le bassin Baskatong [[Saïd, 2011](#)]. Ces analyses montrent que la calibration d'Hydrotel a un effet important sur la série qui en résulte. En particulier, une calibration peut conduire à un écoulement annuel moyen systématiquement supérieur à ce que produit une autre calibration. Un exemple est présenté à la figure 1 (graphique de gauche). Un tel écart ne serait pas particulièrement préoccupant s'il était non seulement systématique mais également constant, ce qui n'est pas le cas, comme l'illustre la figure 1 (à droite) pour des séries associées à la simulation *aet* du MRCC².

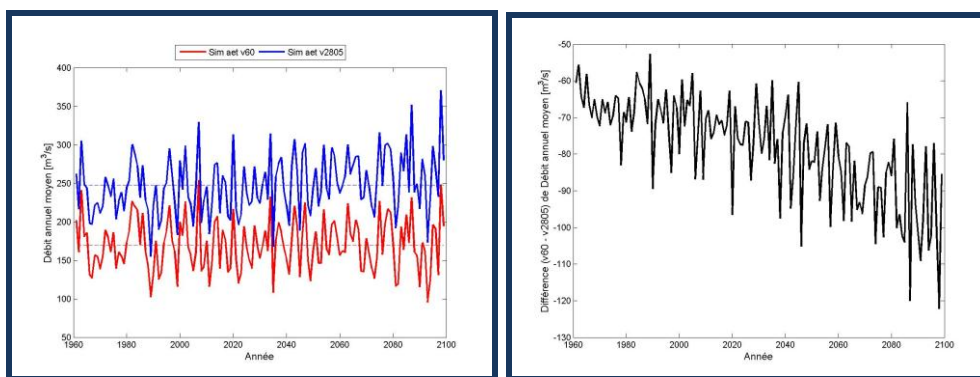


Fig. 1. Écoulement moyen annuel pour le bassin Baskatong et pour deux calibrations d'Hydrotel (v60 et v2805), météo issue de la simulation *aet* du MRCC. *Note* : le graphique de gauche montre l'écoulement et celui de droite la différence entre les deux calibrations.

[Source : [Saïd \(2011\)](#), figures 4.1 et 4.2].

² On obtient des schémas similaires pour les cinq autres simulations du MRCC.

Ce constat engendre d'importantes incertitudes en termes de signal de changement climatique. La figure 2 montre par exemple les intervalles de confiance à 95% pour les différences entre climat futur (2041–2070) et climat actuel (1961–1990) de l'écoulement annuel moyen. Pour cinq des douze séries, la différence est significative (l'intervalle ne contient pas zéro) et il existe donc un signal de changement climatique pour ces séries mais pas pour les sept autres. Notons en outre que l'absence de signal concerne majoritairement une des deux calibrations (v60).

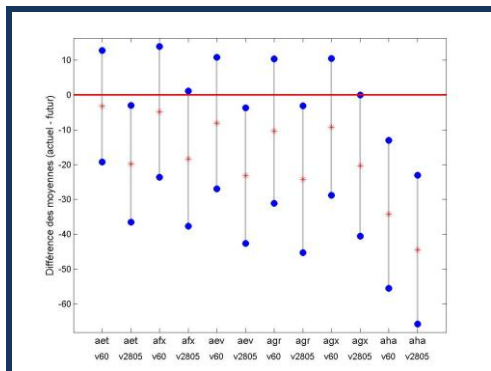


Fig. 2. Écoulement moyen annuel pour le bassin Baskatong et pour deux calibrations d'Hydrotel (v60 et v2805) : intervalles de confiance à 95% pour la différence des moyennes entre climat futur (2041–2070) et climat actuel (1961–1990). [Source : Saïd (2011), figure 5.1]

Comparaison des séries obtenues par Hydrotel ou par bilan hydrique

Comme nous l'avons dit plus haut, l'écoulement annuel moyen peut être obtenu sans recourir à un modèle hydrologique mais en utilisant seulement les sorties du MRCC; on obtient alors l'écoulement par bilan hydrique. La comparaison des séries ainsi obtenues avec celles provenant d'Hydrotel permet de rendre compte de l'incertitude induite par l'utilisation d'un modèle hydrologique. Cette comparaison a été effectuée suivant différents critères [Saïd et al., 2012; Pugin, 2012]. En particulier, nous avons noté que, pour une simulation donnée du MRCC, la série issue d'Hydrotel est en moyenne inférieure à celle obtenue directement du MRCC. En outre, les diagnostics de stationnarité peuvent changer selon que l'écoulement moyen est obtenu via Hydrotel ou directement du MRCC. La figure 3 illustre ces deux constats pour les séries associées à la simulation *aet* et pour le bassin Baskatong³.

³ Pour la partie gauche, le même schéma est obtenu pour les six simulations et les trois bassins à l'étude. Pour la partie droite, les cas où une série est stationnaire (*i.e.*, sans tendance) et pas l'autre concernent quatre simulations sur six pour chacun des trois bassins.

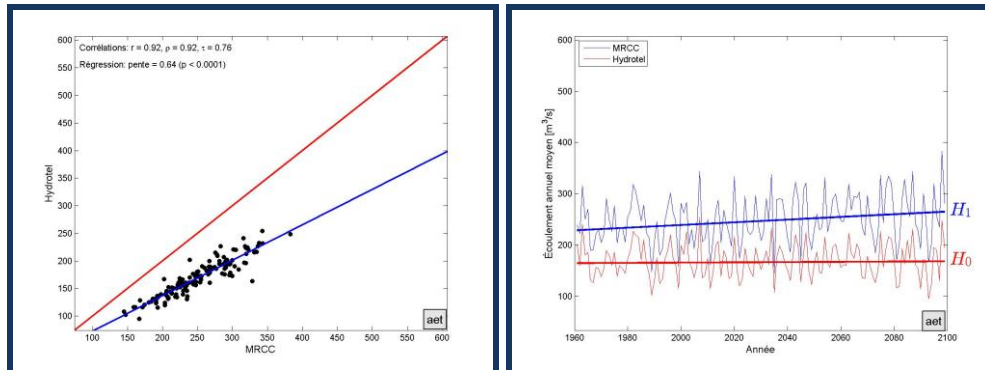


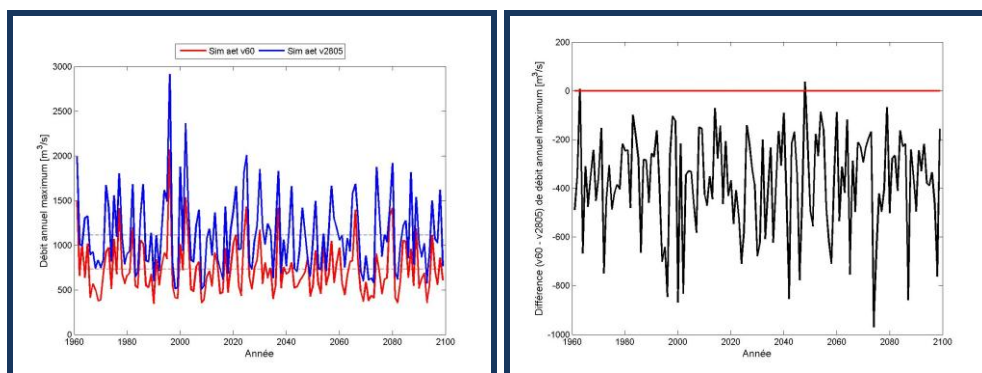
Fig. 3. Écoulement moyen annuel pour le bassin Baskatong et la simulation *aet* : diagramme de dispersion (à gauche) et séries temporelles (à droite) pour les séries obtenues via Hydrotel ou directement du MRCC. *Note* : dans le graphique de droite, les droites montrent les tendances estimées de façon non paramétrique et la mention H_0 [resp., H_1] signifie que la tendance n'est pas [resp., est] significative. [Source : Saïd *et al.* (2012), figures 2.1 et 3.1].

Ces différences en termes de stationnarité ont les mêmes conséquences que celles déjà signalées dans la comparaison des deux calibrations d'Hydrotel (bassin Baskatong seulement) : le signal de changement climatique, évalué en comparant des fenêtres de climat actuel et futur, diverge selon l'origine de la série (Hydrotel ou bilan); voir notamment Saïd *et al.*, 2012, tableau 4.1.

Débit maximum annuel pour la période 1963–2099

Rapports intermédiaires : Saïd, 2011; Callegaro *et al.*, 2012; Saïd, 2012.

Comme pour l'écoulement annuel moyen (figure 1), les deux calibrations d'Hydrotel disponibles pour le bassin Baskatong ont été comparées en terme de débit maximum annuel. Les graphiques de la figure 4 sont similaires à ceux de la figure 1 associés à l'écoulement moyen annuel et à la simulation *aet*. On note que l'écart est presque toujours systématique mais qu'il est constant⁴.



⁴ On obtient des schémas similaires pour les cinq autres simulations du MRCC.

Fig. 4. Débit maximum annuel pour le bassin Baskatong et pour deux calibrations d'Hydrotel (v60 et v2805), météo issue de la simulation aet du MRCC. Note : débit à gauche et différence à droite. [Source : Saïd (2011), figures 4.3 et 4.4].

Nous avons également étudié en détail les différentes sources d'incertitudes en comparant des séries de débit maximum annuel obtenu via Hydrotel ou via GR4J [Saïd, 2012]. Dans ces analyses, nous avons distingué les sources d'incertitude de la façon suivante :

- *Incertainitudes statistiques* : elles résultent des différentes approches permettant d'étudier un même critère. Si l'on s'intéresse par exemple à la valeur centrale, on peut opter pour la moyenne ou pour la médiane. On peut alors considérer les 12 séries disponibles⁵ comme 12 réalisations équiprobables. La différence maximale entre moyenne et médiane parmi ces 12 réalisations permet de quantifier l'incertitude statistique.
- *Incertainitudes climatiques* : elles concernent les six simulations du MRCC, qui sont autant de réalisations équiprobables du climat. Pour chaque modèle (Hydrotel ou GR4J) et un critère donné (ex. : la moyenne), on peut alors calculer l'écart entre le maximum et le minimum des six simulations : on obtient ainsi deux valeurs (correspondant aux deux modèles) et on prend le maximum de ces deux valeurs.
- *Incertainitudes dues à la production des séries* : elles sont associées aux écarts entre les modèles. Pour chacune des six simulations et un critère donné (ex. : l'écart-type), on calcule la différence entre les deux modèles; on obtient ainsi six valeurs (correspondant aux six simulations) et le maximum de ces six valeurs permet de quantifier l'incertitude due à la production des séries par des modèles hydrologiques différents.

Les valeurs ainsi calculées ne sont pas toujours directement interprétables mais leurs ordres de grandeur respectifs rendent compte du poids de chaque type d'incertitude en comparaison des autres.

Un exemple est donné dans le tableau 4 où les différentes sources d'incertitude sont quantifiées pour l'estimation de la valeur centrale et de la dispersion. Pour la valeur centrale, nous avons considéré la moyenne ou la médiane, tandis que la dispersion est estimée par l'écart-type ou par l'écart absolu moyen. Pour chaque bassin et chaque critère, l'incertitude la plus importante est indiquée en jaune. On peut noter que l'incertitude statistique est toujours largement inférieure aux deux autres sources et que celle due à la production des séries est généralement la plus importante.

Incertainitudes	Valeur centrale	Dispersion
Baskatong		
Statistiques	140	113
Climatiques	406 (374)	213 (152)
Production	457 (444)	137 (115)
Jules-Allard		
Statistiques	24	53
Climatiques	168 (159)	73 (36)
Production	202 (184)	110 (63)

⁵ Il s'agit des six séries provenant d'Hydrotel et des six autres issues de GR4J, chacune des six étant associée à une simulation du MRCC.

Aux Saumons		
Statistiques	18	26
Climatiques	69 (64)	38 (23)
Production	129 (112)	71 (48)

Tab. 4. Écoulement maximum annuel, période 1963–2099, bassins Baskatong, Jules-Allard et Aux Saumons : quantification des sources d'incertitude pour la valeur centrale et la dispersion. *Note* : les nombres entre parenthèses indiquent que des mesures non paramétriques ont été calculées (médiane et écart absolu moyen). [Source : Saïd (2012), tableau 2.1].

Nous avons répété cet exercice pour d'autres critères, et notamment :

- la stationnarité évaluée par le biais des tendances de long terme, estimées soit par la méthode des moindres carrés (équivalente au maximum de vraisemblance) soit par l'approche non paramétrique de Sen;
- l'estimation des paramètres de la loi généralisée des valeurs extrêmes (*Generalized Extreme Value*, GEV) pour trois méthodes d'estimation;
- l'estimation des quantiles associés pour différents temps de retour (20, 100, 1 000 et 10 000 ans).

Dans tous les cas, l'incertitude statistique est mineure en comparaison des deux autres sources. Pour l'estimation des quantiles, qui constituait un des principaux objectifs de ce projet, l'incertitude due à la production des séries est la plus importante pour le bassin Baskatong tandis que pour les bassins Jules-Allard et Aux Saumons, c'est l'incertitude climatique qui domine. Ces résultats sont résumés dans le tableau 5.

Incertitudes	20 ans	100 ans	1 000 ans	10 000 ans
Baskatong				
Statistiques	73.9	237.1	708.8	1619.3
Climatiques	677.9	754.3	1307.1	2410.8
Production	814.1	1277.5	2209.9	3540.1
Jules-Allard				
Statistiques	17.5	61.1	232.9	592.1
Climatiques	387.3	609.8	1093.2	1860.9
Production	275.4	466.3	929.7	1688.0
Aux Saumons				
Statistiques	10.6	24.6	60.1	145.7
Climatiques	258.2	387.8	638.8	995.4
Production	125.3	234.0	468.4	817.7

Tab. 5. Débit maximum annuel, période 1963–2099, bassins Baskatong, Jules-Allard et Aux Saumons : quantification des sources d'incertitude pour l'estimation, dans le modèle GEV, des quantiles associés aux temps de retour 20, 100, 1 000 et 10 000 ans. *Note* : pour les incertitudes climatiques et dans la production des séries, l'évaluation est basée sur la méthode d'estimation des paramètres des moments de probabilité pondérés (*probability weighted moments*, PWM). [Source : Saïd (2012), tableau 6.1].

Afin de mieux visualiser la signification de ces différentes sources d'incertitude, la figure 5 montre l'estimation des quantiles pour le temps de retour 1'000 ans et pour le bassin Baskatong. Les quantiles sont associés à la distribution GEV estimée selon trois méthodes (méthode des moments de probabilité pondérés, *probability weighted moments*, PWM,

méthode du maximum de vraisemblance, *maximum likelihood*, ML et *maximum product of spacing*, MPS).

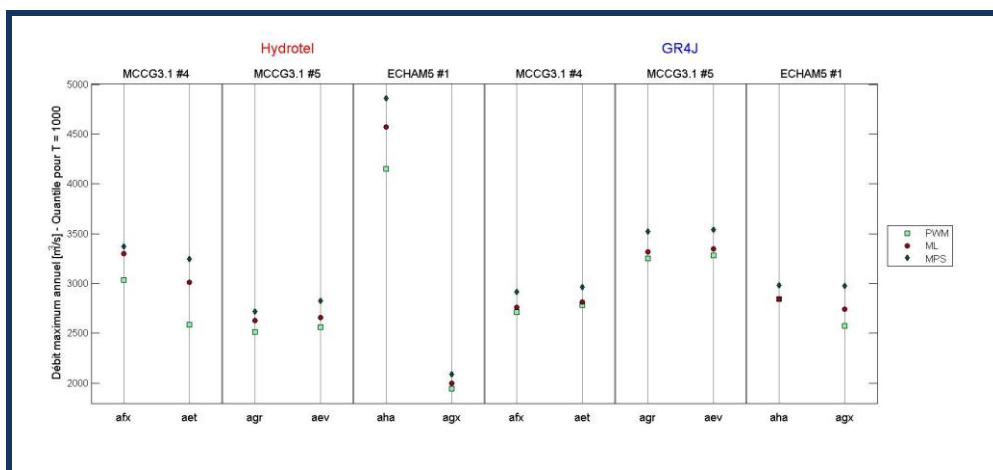


Fig. 5. Débit maximum annuel pour le bassin Baskatong, période 1963–2009 : quantiles pour le temps de retour 1'000 ans associés au modèle GEV et pour trois méthodes d'estimation (méthode des moments de probabilité pondérés, *probability weighted moments*, PWM, méthode du maximum de vraisemblance, *maximum likelihood*, ML et *maximum product of spacing*, MPS) [Source : Saïd (2012), figure 6.3].

5. Analyse et discussion

À l'origine du projet, les incertitudes statistiques et climatiques apparaissaient comme potentiellement les plus importantes. Cependant, au fur et à mesure de l'avancement des travaux, les incertitudes dues à la production des séries se sont avérées très importantes voire majeures. Ces incertitudes sont induites par deux facteurs : la calibration du modèle Hydrotel et le choix du modèle Hydrotel lui-même.

Nous avons constaté en particulier que la calibration du modèle Hydrotel pouvait avoir une influence primordiale sur le débit moyen annuel [figures 1 à 3 ci-dessus, Saïd (2011), Saïd et al. (2012)]. Cette étude, basée sur le bassin Baskatong et sur deux calibrations, montre en effet que l'écart entre le débit moyen annuel s'accroît, toutes chose égales par ailleurs, avec le temps. Une conséquence immédiate de ce constat concerne le signal de changement climatique qui peut être présent ou non selon la calibration utilisée. Notons toutefois que ce problème ne semble pas exister pour le débit maximum annuel [figure 4, Saïd (2011)].

Pour évaluer l'incertitude, dans la production des séries, imputable au choix du modèle, nous avons comparé les séries issues d'Hydrotel et de GR4J. Notons que, pour des raisons d'accessibilité au code du modèle, nous avons utilisé une version très simple de GR4J (sans module de neige). Les deux modèles ont été calibrés suivant la même procédure basée sur le critère de Nash-Sutcliffe. Cette comparaison a fait ressortir le rôle central du choix du modèle dans les séries de débit maximum annuel qui en découlent.

Nous avons apporté un soin particulier et développé des approches originales concernant la quantification des différentes sources d'incertitudes (statistique, climatique et due à la production des séries) et leur comparaison. Cette comparaison a montré que l'incertitude statistique joue un rôle mineur par rapport aux deux autres sources énoncées ci-dessus, tant en valeur centrale qu'en dispersion, du point de vue de la stationnarité et de l'estimation des quantiles associés à différents temps de retour. De plus les incertitudes statistiques pourraient être réduites. En particulier, la méthode d'estimation du modèle GEV possède un effet sur les quantiles, effet qui est naturellement une fonction croissante du temps de retour. Parmi les trois méthodes étudiées, deux sont bien documentées dans la littérature : le maximum de vraisemblance, dont on sait qu'il produit des résultats peu fiables pour la loi GEV, et la méthode des moments de probabilité pondérés, qui est traditionnellement celle qui est utilisée en hydrologie fréquentielle. La troisième méthode (*maximum product of spacing*) est plus rarement utilisée et mériterait d'être étudiée en profondeur. Elle semble produire des quantiles généralement supérieurs à ceux des deux autres méthodes ce qui, du point de vue du dimensionnement engendrerait des coûts supplémentaires.

Nous avons également constaté que les incertitudes climatiques sont importantes et même majeures pour de petits bassins, tels Jules-Allard ou Aux Saumons, tandis que celles dues à la production des séries constituent la principale source d'incertitude pour le bassin versant de la rivière Baskatong. Notons que ces constats reposent sur l'étude et la quantification des incertitudes telles que présentées par exemple dans les tableaux 4 et 5 ci-dessus. Afin d'évaluer le poids respectif de ces deux sources, nous avons également effectué des analyses basées sur le modèle d'analyse de variance (ANOVA) où les deux facteurs considérés concernent la simulation climatique et le modèle hydrologique [voir Saïd (2012)]. Ces analyses ont été mises en œuvre à la fois par des approches paramétriques et non paramétriques afin de tenir compte d'éventuelles incertitudes statistiques. Cette étude montre que l'incertitude associée à la production des séries (facteur modèle hydrologique) demeure toujours plus importante que l'incertitude climatique (facteur simulation climatique).

6. Conclusion et recommandations

Certaines incertitudes statistiques pourraient être réduites, notamment en termes d'estimation des paramètres du modèle GEV et de calcul des intervalles de confiance associés aux quantiles. Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, il serait tout d'abord intéressant d'étudier les deux méthodes d'estimation concurrentes (méthode des moments de probabilité pondérés, *probability weighted moments* et *maximum product of spacing*). La méthode du maximum de vraisemblance peut être exclue en vertu des résultats qui existent déjà dans la littérature.

Les incertitudes climatiques, mesurées à partir des différentes simulations du MRCC, peuvent difficilement être circonvenues, sauf si nous disposons de nouvelles simulations. Il serait intéressant, particulièrement pour les petits bassins versants, d'utiliser des simulations climatiques provenant du MRCC avec une résolution spatiale plus fine (~10 km au lieu de ~45 km présente dans cette étude).

Les incertitudes dues à la production des séries devraient constituer le point central de recherches à venir. Concernant l'incertitude induite par la calibration, il serait nécessaire de

disposer d'autres calibrations, et ce pour plusieurs modèles hydrologiques. En l'état, les analyses ont été basées sur seulement deux calibrations pour le bassin versant de la rivière Baskatong. Il est possible que, du à l'effet du hasard, l'une d'elles ait un comportement plus « extrême » que l'autre et il serait donc important d'évaluer si une telle caractéristique est rare ou commune. Par ailleurs, l'incertitude due à la production des séries et résultant du choix du modèle hydrologique utilisé devrait également être affinée. En particulier, il serait important de considérer d'autres modèles hydrologiques adaptés au climat québécois, et notamment une version de GR4J avec module de neige (Valéry, 2010) ou encore le modèle HSAMI utilisé notamment à Hydro-Québec.

Nous avons par ailleurs commencé à développer une nouvelle approche ne faisant pas appel à un modèle hydrologique, en établissant un lien entre les maxima annuels des volumes calculés sur d jours produits par les simulations climatiques (sans avoir recours à un modèle hydrologique) en climat actuel et les débits maximum annuels observés et en utilisant le lien ainsi établi en climat futur. Notons que le fait d'utiliser ce lien en climat futur constitue une hypothèse relativement forte mais qu'elle est *a priori* du même type que l'hypothèse implicite suivant laquelle la calibration d'un modèle hydrologique, effectuée à partir du climat actuel, reste valide en climat futur. Cette approche devrait être étudiée jusqu'à son terme afin notamment de quantifier les incertitudes qu'elle engendre et de les comparer à celles attachées aux séries produites par l'intermédiaire du modèle Hydrotel. En outre, le type de relation mathématique (entre les maxima annuels des volumes calculés sur d jours produits par les simulations climatiques en climat actuel et les débits maximum annuels observés) reste à affiner : les analyses préliminaires ont été réalisées avec un lien linéaire qui ne constitue probablement pas la relation la plus adéquate.

Étant donné le grand nombre d'incertitudes mis en lumière dans ce projet, il convient d'être extrêmement prudent en termes de recommandations pour les décideurs et gestionnaires. En particulier, la question de la stationnarité (et donc d'un éventuel signal de changement climatique) dépend fortement de la méthode adoptée pour produire les séries. Pour le débit annuel moyen, la calibration d'Hydrotel ou la production des séries (Hydrotel ou bilan) ne conduisent pas toujours aux mêmes conclusions, loin s'en faut [Saïd, 2011; Saïd *et al.*, 2012; Pugin, 2012]. Plus précisément, certaines séries indiquent une tendance croissante dans le débit annuel moyen tandis que d'autres exhibent une tendance décroissante ou une absence de tendance significative. Pour ce qui concerne le débit maximum annuel, le modèle hydrologique utilisé (Hydrotel ou GR4J) entraîne également des différences dans les conclusions en termes de tendances, les séries obtenues via le modèle GR4J semblant plus souvent non stationnaires pour le bassin Baskatong [Saïd, 2012]. Ce constat est majeur puisque la mise en œuvre d'une analyse fréquentielle classique repose sur l'hypothèse de stationnarité. Dans le cas contraire, il est possible d'inclure des paramètres qui dépendent du temps ou des indices climatiques explicatifs dans le modèle utilisé pour l'analyse fréquentielle.

En outre, il faudrait être en mesure de préciser la nature des éventuelles non-stationnarités. Certaines séries exhibent une tendance significative qui pourrait être induite par une rupture abrupte, c'est-à-dire un saut se traduisant par exemple par une moyenne plus élevée après le point de rupture mais cette moyenne restant constante avant et après changement. Dans ce cas, l'impact en termes de changement climatique et donc d'adaptation est très différent : si la non-stationnarité peut réellement être assimilée à une tendance, par exemple croissante, alors on peut s'attendre à ce que l'augmentation se poursuive dans le futur. En revanche, si la non-stationnarité relève d'une rupture entre deux régimes eux-mêmes constants, le signal de

changement climatique n'est pas quantifié de la même façon. Cette question de la nature des non-stationnarités est récurrente dans l'analyse des séries de projections climatiques et devrait faire l'objet d'une grande attention étant donné son impact majeur sur l'adaptation aux changements climatiques.

7. Références

- [1] Callegaro C., Laverne G., Lafarge T. & Chardey T. (2012). Génération d'hydrogrammes de crues afin d'estimer l'impact des changements climatiques. Compte-rendu atelier de l'ingénierie, filière HOE/ENSE3. 47 p.
- [2] Dion, K. (2011). Étude des relations en moyenne et en variance entre les quantiles des observations et les quantiles des simulations. Rapport technique, Département de mathématiques et statistique, Université Laval, Québec, QC, CA, 18 janvier 2011, 42 p.
- [3] Farvacque, E., Villemagne, A. & Autin, P. (2011). Comparaison des débits observés et des débits simulés obtenus par couplage entre un modèle hydrologique et des sorties de modèles climatiques. Compte-rendu atelier de l'ingénierie, filière HOE/ENSE3. 46 p.
- [4] Pugin, S. (2012). Comparaison des écoulements annuels moyens issus du MRCC et de Hydrotel pour la période 1961-2099. 15 mars 2012, 50 p.
- [5] Saïd M. (2011). Comparaison de deux ensembles de simulations issues du modèle Hydrotel pour le bassin Baskatong. Rapport technique, Département de mathématiques et statistique, Université Laval, Québec, QC, CA, 10 mai 2011, 31 p.
- [6] Saïd M., Favre A.-C. & Slivitzky M. (2012). Comparaison des simulations d'écoulement annuel moyen issues du MRCC ou d'Hydrotel pour la période 1961-2099 et pour les bassins Baskatong, Jules-Allard et Aux Saumons. Rapport technique, Département de mathématiques et statistique, Université Laval, Québec, QC, CA, 16 mars 2012, 40 p.
- [7] Saïd, M. (2012). Évaluation des incertitudes pour l'écoulement maximum annuel issu des modèles Hydrotel et GR4J pilotés par la météo du MRCC pour la période 1963 -2099 et pour les bassins Baskatong, Jules-Allard et Aux Saumons. Rapport technique, Département de mathématiques et statistique, Université Laval, Québec, QC, CA, 22 octobre 2012, 41 p.
- [8] Valéry, A. (2010). Modélisation précipitations-débit sous influence nivale, élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de doctorat, ENGREF, Cemagref, Paris, 405 p.