

Modélisation hydroclimatique et impacts futurs des milieux humides sur le bassin versant de la rivière Saint-Charles

Par Stéphane Savary, Alain Rousseau

Contexte et approche

Les travaux de Spolidorio (2019), ont permis de mettre en place une plateforme de modélisation PHYSITEL-HYDROTEL, en utilisant des données de haute résolution et d'une meilleure représentation du territoire. Ici, l'analyse vise une intégration de scénarios de climats futurs à cette plateforme de modélisation hydrologique ainsi qu'une évaluation du rôle de l'impact de la présence des milieux humides dans des contextes de climats actuel et futur. Ainsi, 47 scénarios de changements climatiques, fournis par le consortium OURANOS, ont été utilisés. Le tableau résumé des scénarios de changements climatiques utilisé est présenté et expliqué en annexe A. Ces scénarios représentent des séquences météorologiques de précipitations et de températures en entrées au modèle HYDROTEL. Ce qui permet de mener alors une étude hydroclimatique basée sur les scénarios de changement climatique avec ou sans la prise en compte des milieux humides pour l'analyse conséquente du climat et de l'hydrologie (débits, hydrogrammes et indicateurs de crues et d'étiages Annexe B) et des services hydrologiques des milieux humides dans un contexte de climat changeant.

Résultats

Évolution du climat et tendances climatiques à l'échelle du bassin versant de la rivière Saint-Charles

Les figures 1 et 2 ainsi que le tableau 1 donnent une appréciation d'ensemble des tendances climatiques (températures et précipitations) à l'échelle du bassin versant de la rivière Saint-Charles sur la base des 47 scénarios de changements climatiques (horizon 1980-2099). Ces tendances agissent comme des marqueurs de changements globaux descriptifs de l'évolution projeté du climat. Les tendances et variations sont déterminées par rapport à la période de référence 1980-2019. Nos résultats montrent une augmentation constante des températures et de leurs variabilité (plage des centiles) pour la période 1980-2099 (Figure 1).

Cette augmentation de la température moyenne annuelle atteindrait 1.9°C pour l'horizon 2020-2059 et 4.3 °C pour l'horizon 2060-2099, ce qui correspond à des augmentations de 51% et 101% par rapport à la période de référence (Tableau 1).

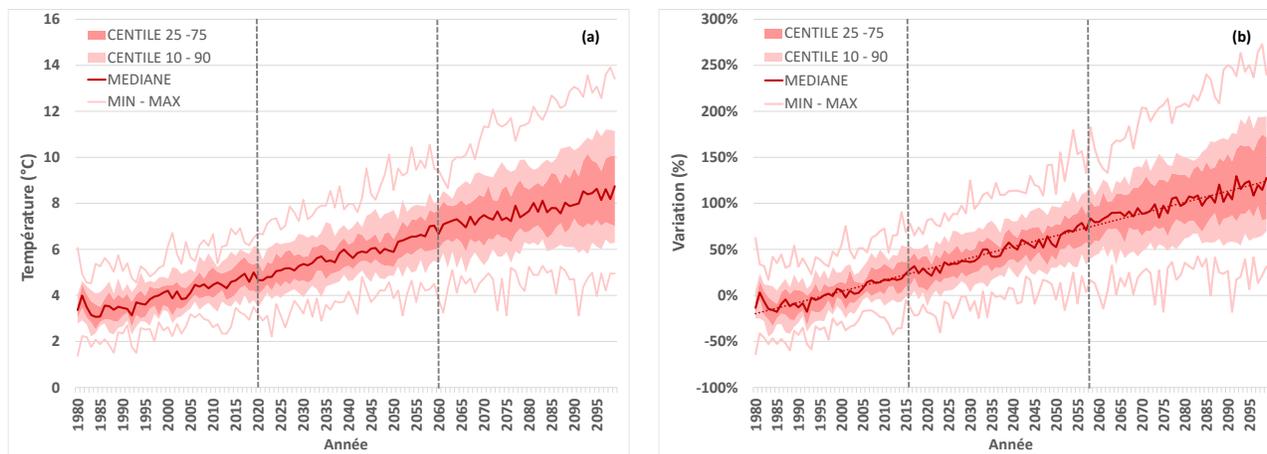


Figure 1 (a) Évolution et (b) variation des températures moyennes annuelles à l'échelle du bassin versant de la rivière Saint-Charles entre 1980 et 2099.

Nous observons une tendance moins prononcée au niveau de l'évolution et de la variabilité des précipitations pour la période 1980-2099 (Figure 2). En effet, nos résultats montrent une hausse de l'ordre de 4% et 9% pour des horizons 2020-2059 et 2060-2099 respectivement par rapport à la période de référence (Tableau 1).

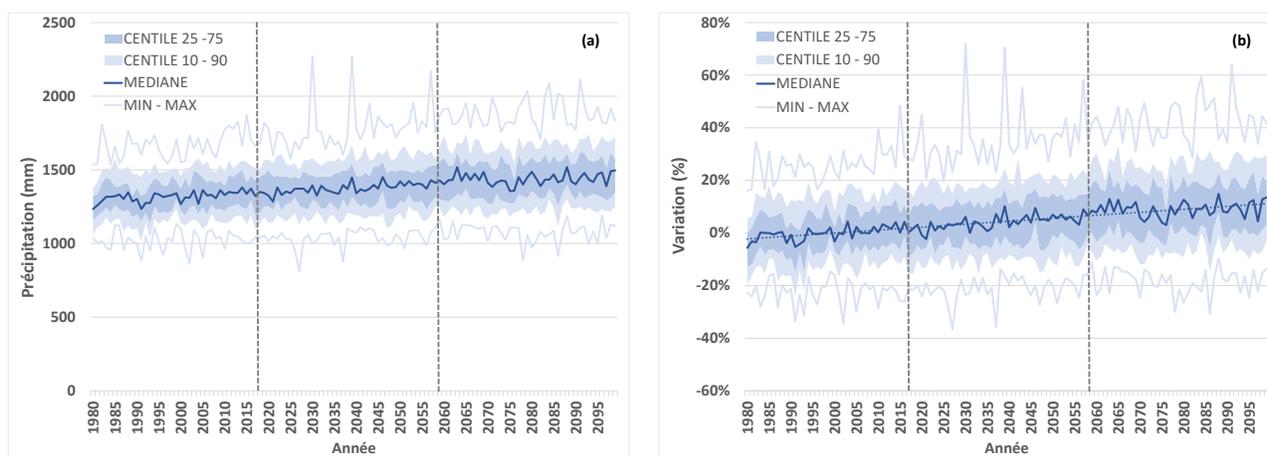


Figure 2 (a) Évolution et (b) variation des précipitations totales annuelles à l'échelle du bassin versant de la rivière Saint-Charles sur un horizon temporel de 1980-2099.

Tableau 1 Tendances et variations médianes des températures et précipitations à l'échelle du bassin versant de la rivière Saint-Charles.

Variable	Horizon climatique	
	2020-2059	2060-2099
Température moyenne annuelle	↑1.9°C (51%)	↑4.3°C (101%)
Précipitation totale annuelle	↑58 mm (4%)	↑119 mm (9%)

Impacts des scénarios de changements climatiques sur l'hydrologie

La figure 3 présente les hydrogrammes journaliers moyens annuels simulés dans la rivière Saint-Charles, directement en amont de la confluence de la rivière Lorette. Par rapport à la période de référence (1980-2019) ces hydrogrammes démontrent des tendances plus marquées pour la diminution des pointes de crues avec en moyenne une diminution de 9% de la pointe de crue à l'horizon 2020-2059 et en moyenne une diminution de 19% de le pointe de crue à l'horizon 2060-2099. Les hydrogrammes démontrent également un devancement de la pointe de crue limité en moyenne à 5 jours à 5 jours à l'horizon 2060-2099. Aussi les débits en période hivernale (novembre à mars) augmentent en moyenne de 20% à l'horizon 2020-2059 et de 40% à l'horizon 2060-2099. Finalement les débits en période estivale (juin à octobre) diminuent en moyenne de 7% à l'horizon 2020-2059 et de 14% à l'horizon 2060-2099. En complément les tableaux 2 et 3 apportent de précisions sur des indicateurs spécifiques de crues et d'étiages qui se rapportent alors aux évènements extrêmes.

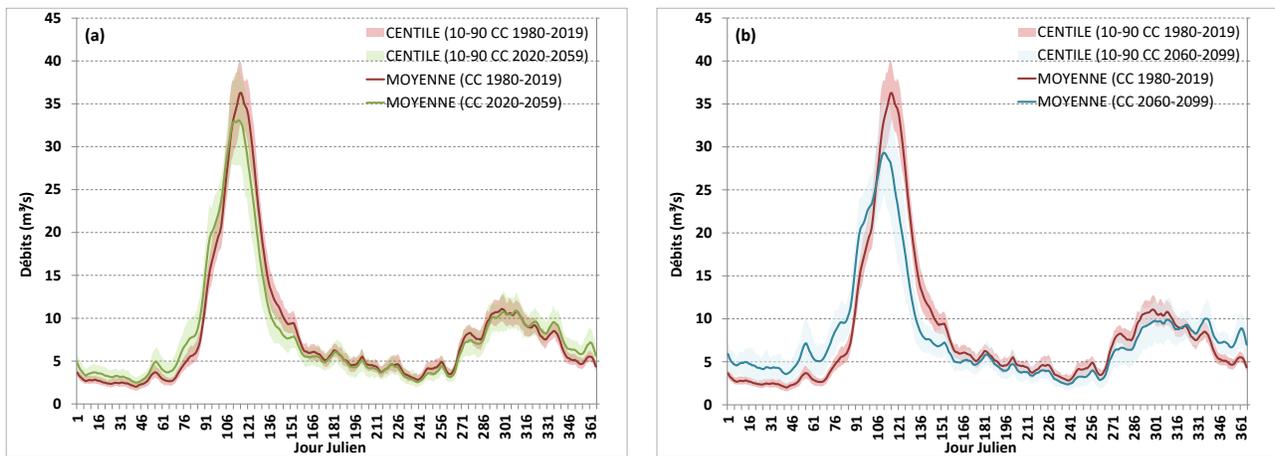


Figure 3 Impact des scénarios de changements climatiques sur les hydrogrammes annuels de la section de la rivière Saint-Charles localisée juste en amont de la confluence de la rivière Lorette, sur un horizon (a) 2020-2059 et (b) 2060 et 2099.

Tableau 2 Impacts relatifs des changements climatiques sur les crues (rivière Saint-Charles en amont de la confluence de la rivière Lorette).

Sous-bassin	Crue	2020-2059	2060-2099
Saint-Charles	Q2	-10.61%	-21.91%
	Q20	-10.17%	-18.98%
	Q100	-9.03%	-18.68%

Tableau 3 Impacts relatifs des changements climatiques sur les étiages (rivière Saint-Charles en amont de la confluence de la rivière Lorette).

Sous-bassin	Étiage	2020-2059	2060-2099
	Q2-7	18.96%	19.81%
Saint-Charles	Q10-7	31.15%	28.32%
	Q5-30	36.04%	45.27%

Les impacts des scénarios de changements climatiques sur l'hydrologie pour les autres sous-bassins versants sont présenté à l'Annexe C

Globalement, les résultats démontrent, pour l'ensemble des sous-bassins versant excepté celui de la rivière Jaune, une diminution des crues printanières pour les horizons 2020-2059 et de façon plus marquée pour l'horizon 2060-2099. Également les résultats démontrent une augmentation des étiages hivernaux, et une légère diminution des étiages estivaux. Ces résultats suggèrent donc des tendances vraisemblables vers des problématiques associées aux étiages estivaux plus sévères qui pourraient affecter l'approvisionnement en eau de surface plutôt que des problématiques d'inondations. Face à de telles tendances, il s'avère également pertinent d'investiguer l'évolution des débits directement en amont de la prise d'eau de Château. Un tel exercice permet de déterminer le nombre total de jour par an pendant lesquels les débits à la prise d'eau de Château sont inférieurs à un débit de 2 m³/s qui correspond au débits moyen prélevé au site de la prise d'eau pour les usages et besoins en eau potable. Il est important de préciser que la plate-forme de modélisation n'a pas la capacité de prendre en compte les règles de gestion du barrage en amont Jules-Allard situé à l'exutoire du lac Saint-Charles. Les résultats démontrent clairement une augmentation du nombre total de jour où le débit moyen journalier est inférieur à 2 m³/s pendant la période estivale. Également la perte potentielle des milieux humides accentue cette situation défavorable à l'approvisionnement en eau potable (figure 4 et 5).

Les figures suivantes présentent les nombre jour et leur variation où le débit moyen journalier est inférieur à 2m³/s en période estivale dans un contexte de changement climatique avec la présence des milieux humides actuels mais aussi considérant la perte potentielle de la totalité des milieux humides (à titre indicatif). Les figures 4 et 5 démontrent à la fois l'importante de la variabilité entre les scénarios de changements climatiques. Aussi elles démontrent des tendances marquées sur l'augmentation du nombre de jour moyen en période estivale ou les débits à la prise d'eau de Château sont inférieures à 2 m³/s. En présence des milieux humides actuels le nombre de jour passe approximativement de 23 à 45 entre 1980 – 2100 soit ultimement un nombre additionnel de 22 jours. La perte potentiel des milieux humides feraient passer le nombre de jour de 27 à 51 pour la période 1980-2100 donc un nombre additionnel de 24 jours mais aussi soulignant l'importance des milieux humides en support eau plus faibles débits estivaux.

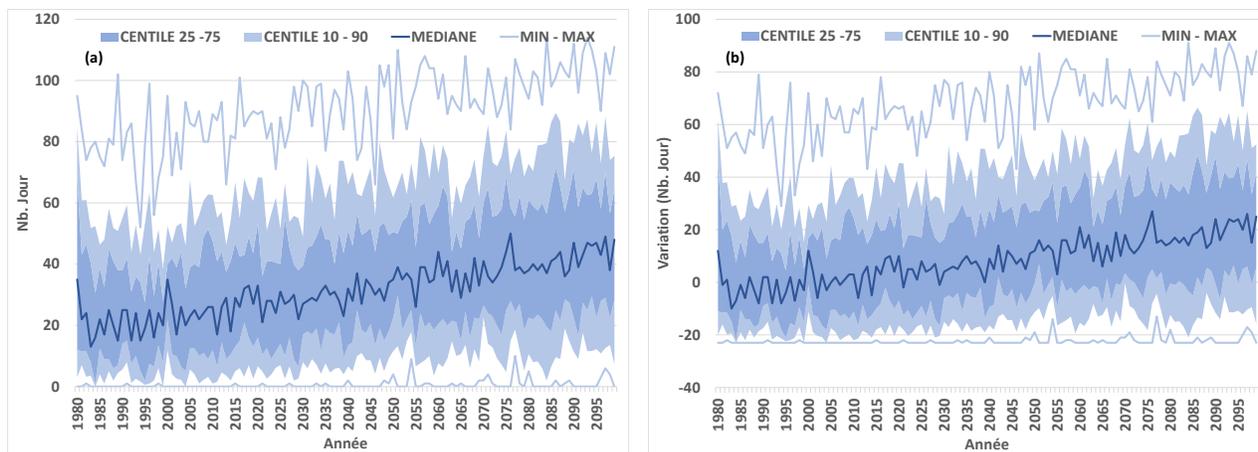


Figure 4 Évolution (a) et variation (b) annuelle du nombre de jour en période estivale inférieur à $2 \text{ m}^3/\text{s}$ à la prise d'eau de Château d'eau dans un contexte de changements climatiques considérant les milieux humides actuels

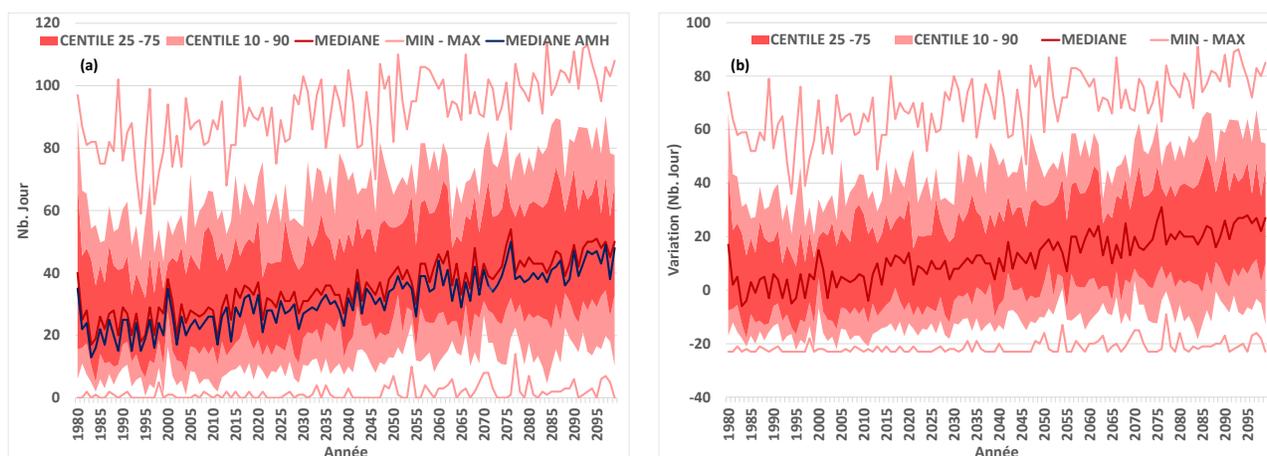


Figure 5 Évolution (a) et variation (b) annuelle du nombre de jour en période estivale inférieur à $2 \text{ m}^3/\text{s}$ à la prise d'eau de Château d'eau dans un contexte de changements climatiques considérant la perte de la totalité des milieux humides actuels.

Modélisation du rôle des milieux humides sur les crues et étiages dans un contexte de changements climatiques

Sans détailler les résultats de la modélisation de chaque scénario des changements climatiques, cette section vise essentiellement à présenter les impacts globaux des milieux humides sur les crues et les étiages dans le contexte du climat actuel et de constater les tendances générales de ces impacts dans un contexte de climat changeant.

À l'exutoire de la rivière Saint-Charles en amont de la rivière Lorette, les milieux humides atténuent les crues d'environ 10 % sous la période de référence (1980-2020), et ce tout indicateur confondu. Nos analyses montrent que ce rôle d'atténuation ne changera pas aux horizons 2020-2059 et 2060-2099. Les milieux humides permettent de soutenir les débits en périodes d'étiage à hauteur d'environ 8% sous la période de référence, avec une variabilité de $\pm 1\%$ selon l'indicateur considéré. La figure 6 et les tableaux 4 et 5 résument les impacts relatifs des milieux humides

existants sur les crues et les étiages dans la section de la rivière Saint-Charles localisée juste en amont de la confluence de la rivière Lorette

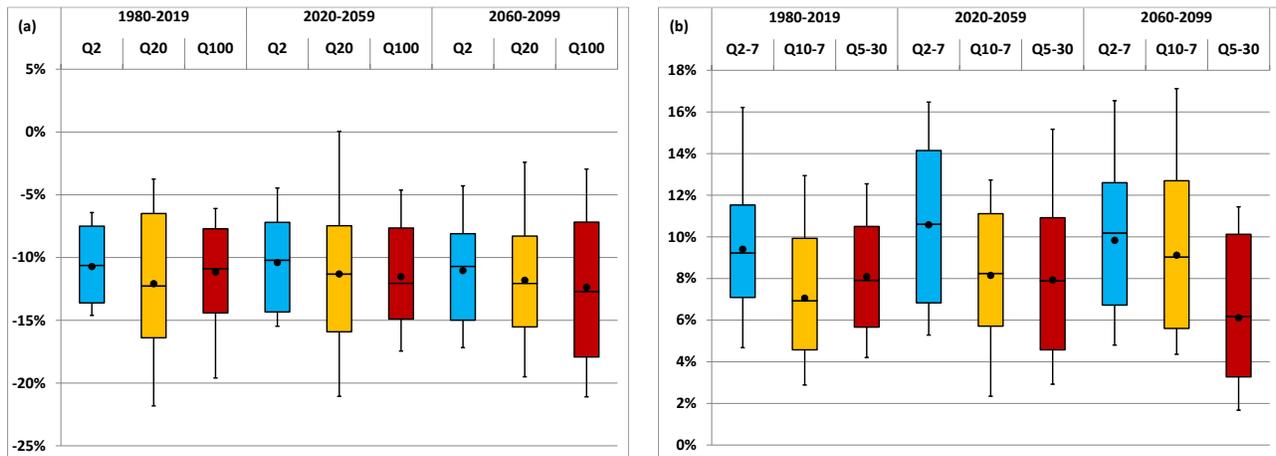


Figure 6 : Impacts modélisés des milieux humides dans un contexte de climat actuel (1980-2019) et de changements climatiques (horizons 2020-2059 et 2060-2099) sur (a) les crues et (b) les étiages dans la section de la rivière Saint-Charles localisée juste en amont de la confluence de la rivière Lorette.

Si l'impact des milieux humides varie peu sous les différents horizons temporels et selon les différents indicateurs de débit évalués, des différences importantes sont observées entre les sous bassins versants de la rivière Saint-Charles. Par ordre croissant les milieux humides ont un rôle plus important dans l'atténuation des crues sur les sous-bassins versants des rivières Nelson, Du Berger, Lorette, Jaune et Des Hurons. Aussi, par ordre croissant les milieux humides ont un rôle plus important dans le soutien aux étiages sur les sous-bassins versant des rivières Lorette, Du Berger, Jaune, Nelson et des hurons. En complément, les résultats démontrent des tendances plutôt constantes avec des variations modérées du rôle des milieux humides dans l'atténuation des crues pour les horizons futurs mais une hausse et des tendances plus marquées dans le rôle des milieux humides en support aux étiages pour les horizons futurs notamment pour les sous-bassins versants des rivières Lorette, Du Berger et Jaune.

Tableau 4 Impacts relatifs moyen des milieux humides sur les crues à l'échelle des sous-bassins de la rivière Saint-Charles

Sous-bassin	Crue	1980-2019	2020-2059	2060-2099
Des Hurons	Q2	-8.5%	-9.6%	-10.1%
	Q20	-6.7%	-7.8%	-9.4%
	Q100	-6.3%	-8.5%	-10.4%
Jaune	Q2	-13.1%	-12.4%	-11.2%
	Q20	-13.7%	-13.7%	-14.2%
	Q100	-15.6%	-15.1%	-16.1%
Nelson	Q2	-23.9%	-22.8%	-21.7%
	Q20	-31.2%	-30.5%	-29.7%
	Q100	-33.0%	-32.1%	-32.5%
Lorette	Q2	-16.8%	-17.3%	-17.0%

	Q20	-18.3%	-17.5%	-18.2%
	Q100	-16.8%	-18.3%	-18.9%
Du Berger	Q2	-23.0%	-23.9%	-25.1%
	Q20	-24.9%	-27.9%	-28.5%
	Q100	-24.5%	-26.6%	-28.0%
Saint-Charles	Q2	-10.7%	-10.4%	-11.0%
	Q20	-12.1%	-11.3%	-11.8%
	Q100	-11.2%	-11.5%	-12.4%

Tableau 5 Impacts relatifs moyen des milieux humides sur les étiages à l'échelle des sous-bassins de la rivière Saint-Charles.

Sous-bassin	Étiage	1980-2019	2020-2059	2060-2099
Des Hurons	Q2-7	8.5%	10.9%	12.7%
	Q10-7	8.9%	11.7%	14.2%
	Q5-30	6.9%	7.8%	8.0%
Jaune	Q2-7	19.7%	24.1%	23.5%
	Q10-7	15.3%	19.1%	22.0%
	Q5-30	12.2%	12.6%	9.8%
Nelson	Q2-7	9.4%	11.1%	14.2%
	Q10-7	7.5%	11.4%	17.5%
	Q5-30	6.8%	6.8%	7.0%
Lorette	Q2-7	28.4%	37.5%	51.3%
	Q10-7	7.8%	17.5%	40.8%
	Q5-30	13.9%	22.6%	23.1%
Du Berger	Q2-7	17.5%	19.8%	22.4%
	Q10-7	10.3%	14.0%	20.6%
	Q5-30	5.7%	5.1%	6.1%
Saint-Charles	Q2-7	9.4%	10.6%	9.8%
	Q10-7	7.1%	8.1%	9.1%
	Q5-30	8.1%	7.9%	6.1%

Les graphiques de modélisation du rôle des milieux humides sur les cures et étiages dans un contexte de changements climatiques pour les autres sous-bassins sont présentés à l'annexe D

CONCLUSION

Ces travaux démontrent la grande pertinence de la plate-forme de PHYSITEL-HYDROTEL comme outil de modélisation hydroclimatique et d'évaluation des impacts des milieux humides sur le bassin versant de la rivière Saint-Charles.

Les résultats de modélisation des scénarios climatiques démontrent que les changements et les tendances à la hausse du régime climatique des températures et précipitations entraîneront des conséquences sur la circulation de l'eau dans l'atmosphère mais également sur le cycle hydrologique du territoire. Ces conséquences se manifesteront plus spécifiquement par (1) une diminution des pointes de crues printanières et un devancement de celles-ci; (2) une augmentation des débits hivernaux de novembre à mars et (3) une diminution des débits estivaux de juin à octobre. De tels changements sont observables sur l'ensemble du bassin versant de la rivière Saint-Charles sauf pour le sous-bassin de la rivière Jaune et ils présentent des tendances plus marquées vers l'horizon 2060 – 2099 par comparaison avec l'horizon 2020 – 2059.

Les résultats supportent aussi l'importance du rôle des milieux humides dans l'atténuation des crues et le support aux étiages (Blanchette et coll. 2022, Blanchette et coll. 2019, Fossey et coll. 2016). Les services hydrologiques des milieux humides, autant en climat actuel que futur, sont bénéfiques au maintien du cycle hydrologique et doivent être protégés. Les résultats démontrent clairement les impacts relatifs constants des milieux humides dans l'atténuation des crues, ce qui peut contribuer à réduire les risques d'inondations pour des secteurs plus vulnérables. Les impacts relatifs des milieux humides dans le support aux étiages présentent des tendances croissantes et soulignent leurs rôles accrus et leurs importances face à de telles conditions hydrologiques. Leurs supports aux étiages contribuent ainsi à l'approvisionnement en eau et aux usages des eaux de surface.

Ces constats encouragent et supportent les stratégies de conservation et de maintien des milieux humides sur le territoire afin de bénéficier de leurs services hydrologiques pour les années courantes et celles à venir.

Annexe A : Scénarios de changements climatiques

Le tableau 1 résume les scénarios de changements climatiques utilisés pour la modélisation du bassin de la rivière Saint-Charles dans un contexte du climat changeant. L'ensemble de modèles regroupe des modèles climatiques à l'échelle globale (MCG) issue de projet d'intercomparaison des modèles couplés – Phase 5 (CMIP5 - <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/>), ainsi que les modèles climatiques à l'échelle régionaux (MCR) générés par le « *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* » (CORDEX - <https://cordex.org/>). À noter que les MCR utilisent les données de sortie des MCG aux frontières de la région d'intérêt afin d'augmenter la résolution spatiale des données climatiques. Les scénarios climatiques, établis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), permet d'obtenir les simulations climatiques dans le futur en utilisant des forçages radiatifs pour simuler des trajectoires représentatives de concentration dans l'atmosphère (« *Representative concentration pathways* » ou RCP). Dans le cadre de ce projet, deux scénarios climatiques ont été utilisés, à savoir : un scénario avec des concentrations modérées (RCP 4.5), et un scénario très pessimiste avec des concentrations élevées (RCP 8.5). Pour plus de détails le lecteur est invité à consulter le site d'OURANOS.

Tableau 1 Scénarios de changements climatiques.

CMIP5			CORDEX			
Modèle	RCP		Pilote	RCM	RCP	
	4.5	8.5			4.5	8.5
access1.0	✓		canesm2	canrcm4	✓	✓
access1.3	✓	✓	canesm2-r2	crcm5-ouranos		✓
bcc-csm1.1	✓		canesm2-r3	crcm5-ouranos		✓
bcc-csm1.1m		✓	cnrm-cm5	crcm5-ouranos	✓	✓
canesm2	✓	✓	gfdl-esm2m	regcm4		✓
cmcc-cm	✓	✓	mpi-esm-lr	regcm4		✓
cnrm-cm5		✓	canesm2	rca4	✓	✓
csiro-mk3.6.0	✓	✓	canesm2	crcm5-uqam	✓	
fgoals-g2		✓	ec-earth	hirham5	✓	✓
gfdl-cm3	✓	✓	ec-earth	rca4	✓	✓
gfdl-esm2g		✓	mpi-esm-mr	crcm5-uqam	✓	✓
gfdl-esm2m	✓					
giss-e2-h	✓					
giss-e2-r	✓					
inmcm4	✓	✓				
ipsl-cm5a-lr	✓	✓				
miroc5	✓	✓				
miroc-esm-chem	✓	✓				
mpi-esm-lr		✓				
mpi-esm-mr	✓					
noresm1-m	✓					

Annexe B : Indicateurs utilisés pour évaluer l'impact des scénarios de changements climatiques sur l'hydrologie et le rôle des milieux humides

La détermination des indicateurs de crues est basée sur l'application d'une loi statistique de type log-normale appliquées aux valeurs de débits maximaux annuels afin de déterminer des valeurs de crues pour diverses périodes de retour (2 ans, Q2, 20 ans Q20, 100 ans Q100). La même méthode s'applique pour les débits d'étiages mais cette fois sur les minimums annuels des débits moyens 7 jours (Q2-7, débit d'étiage moyen 7 jours pour une période de retour de 2 ans; Q10-7, débit d'étiage moyen 7 jours pour une période de retour de 10ans, Q5-30, débit d'étiage moyen 30 jours pour une période de retour de 5 ans). L'impact des milieux humides sur les indicateurs de crues et étiages est basé sur la comparaison de ces mêmes indicateur déterminés à partir des résultats de simulation pairées avec ou sans la prise en compte des milieux humides dans la modélisation (à titre d'exemple voir équation 1).

$$IMPACT = (INDICATEUR_{AMH} - INDICATEUR_{SMH}) / INDICATEUR_{SMH} * 100 \quad (\text{Éq 1})$$

où :

IMPACT : L'impact relatif des milieux humides sur un indicateur de crue ou d'étiage;

INDICATEUR_{AMH} : Indicateur de crue ou d'étiage avec la prise en compte des milieux humides (m³/s);

INDICATEUR_{SMH} : Indicateur de crue ou d'étiage sans la prise en compte des milieux humides (m³/s);

L'équation 1 s'applique pour chaque indicateur, chaque scénario de changements climatiques et chaque période d'analyse temporelle.

Aussi afin de prévenir toute distorsion relative, les résultats de débits ont été débiaisés par rapport aux débits observés aux stations hydrométriques. Cette méthode assez simple consiste corriger le biais dans le futur en utilisant un filtre calculé à partir des observations et simulations dans la période de référence. Dans le cadre de ce projet, un filtre multiplicatif moyen 7 jours a été appliqué aux débits simulés du bassin versant de la rivière Saint-Charles La documentation sur l'application de méthodes de correction aux débits simulés dans un contexte de climat changeant est encore très limité. Néanmoins, le lecteur est référé aux travaux fait par Chen et al. (2013) et Pierce et al., (2015) pour obtenir plus d'information.

Chen, J., Brissette, F. P., Chaumont, D., & Braun, M. (2013). Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America [Article]. *Water Resources Research*, 49(7), 4187-4205. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20331>

Pierce, D. W., Cayan, D. R., Maurer, E. P., Abatzoglou, J. T., & Hegewisch, K. C. (2015). Improved Bias Correction Techniques for Hydrological Simulations of Climate Change. *Journal of Hydrometeorology*, 16(6), 2421-2442. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0236.1>

Annexe C : Impacts des scénarios de changements climatiques sur l'hydrologie des sous-bassins versants de la rivière Saint-Charles

Exutoire de la rivière Des Hurons

La figure 1 présente les hydrogrammes journaliers moyens annuels simulés à l'exutoire de la rivière Des Hurons. Par rapport à la période de référence (1980-2019) ces hydrogrammes démontrent en moyenne une diminution de 8% et un devancement de la pointe de crue 5 jours à l'horizon 2020-2059 et une diminution de 19% et un devancement de la pointe de crue de 7 jours à l'horizon 2060-2099. Aussi les débits en période hivernale (novembre à mars) augmentent en moyenne de 25% à l'horizon 2020-2059 et de 55% à l'horizon 2060-2099. Finalement les débits en période estivale (juin à octobre) diminuent en moyenne de 5% à l'horizon 2020-2059 et de 13% à l'horizon 2060-2099. En complément les tableaux 1 et 2 apportent de précisions sur des indicateurs spécifiques de crues et d'étiages qui se rapportent alors aux événements extrêmes.

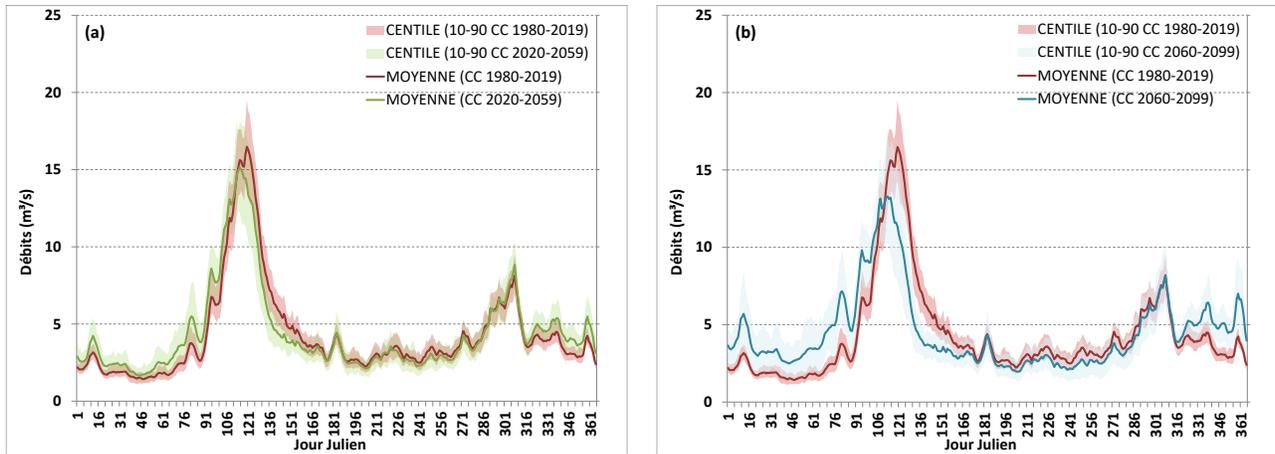


Figure 1 Impact des scénarios de changements climatiques sur les hydrogrammes annuels de la rivière Des Hurons, sur un horizon (a) 2020-2059 et (b) 2060 et 2099.

Tableau 1 Impacts relatifs des changements climatiques sur les crues (rivière des Hurons).

Sous-bassin	Crue	2020-2059	2060-2099
Saint-Charles	Q2	-10.08%	-20.04%
	Q20	-15.28%	-21.32%
	Q100	-12.33%	-17.30%

Tableau 2 Impacts relatifs des changements climatiques sur les étiages (rivière des Hurons).

Sous-bassin	Étiage	2020-2059	2060-2099
Saint-Charles	Q2-7	15.23%	35.63%
	Q10-7	21.67%	45.71%
	Q5-30	28.51%	48.43%

Exutoire de la rivière Jaune

La figure 2 présente les hydrogrammes journaliers moyens annuels simulés à l'exutoire de la rivière Jaune. Par rapport à la période de référence (1980-2019) ces hydrogrammes démontrent en moyenne une augmentation de 14% et un devancement limité de la pointe de crue de 4 jours à l'horizon 2020-2059 et une augmentation de 35% et un devancement de la pointe de crue de 19 jours à l'horizon 2060-2099. Aussi les débits en période hivernale (novembre à mars) augmentent en moyenne de 32% à l'horizon 2020-2059 et de 64% à l'horizon 2060-2099. Finalement les débits en période estivale (juin à octobre) diminuent en moyenne de 10% à l'horizon 2020-2059 et de 20% à l'horizon 2060-2099. En complément les tableaux 3 et 4 apportent de précisions sur des indicateurs spécifiques de crues et d'étiages qui se rapportent alors aux événements extrêmes qui ne sont pas représentés sur des hydrogrammes moyens annuels.

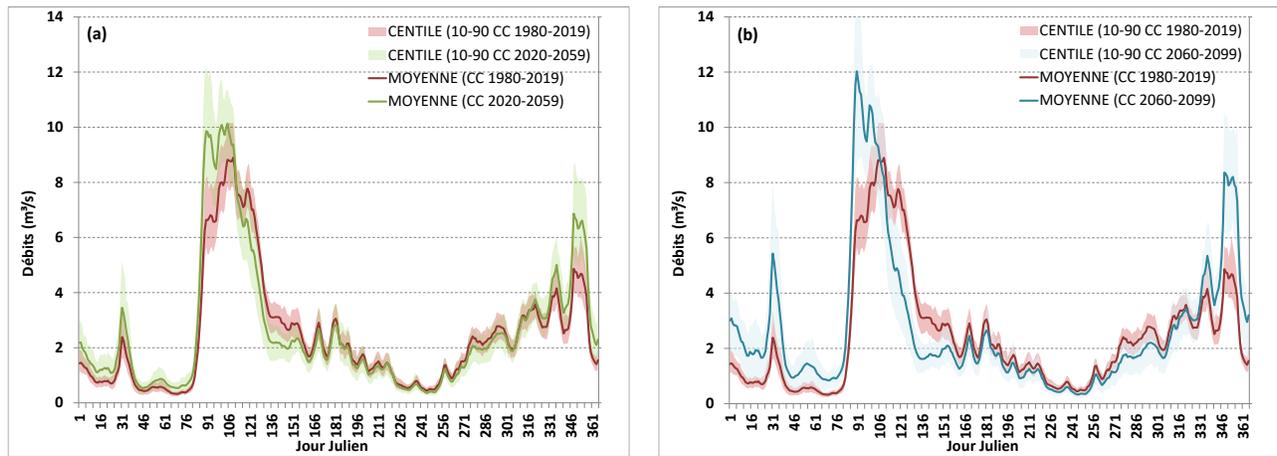


Figure 2 Impact des scénarios de changements climatiques sur les hydrogrammes annuels de la rivière Jaune, sur un horizon (a) 2020-2059 et (b) 2060 et 2099.

Tableau 3 Impacts relatifs des changements climatiques sur les crues (rivière Jaune).

Sous-bassin	Crue	2020-2059	2060-2099
Saint-Charles	Q2	18.75%	32.18%
	Q20	17.87%	33.24%
	Q100	22.74%	30.34%

Tableau 4 Impacts relatifs des changements climatiques sur les étiages (rivière Jaune).

Sous-bassin	Étiage	2020-2059	2060-2099
Saint-Charles	Q2-7	20.17%	9.74%
	Q10-7	43.39%	22.60%
	Q5-30	19.32%	15.37%

Exutoire de la rivière Nelson

La figure 3 présente les hydrogrammes journaliers moyens annuels simulés à l'exutoire de la rivière Nelson. Par rapport à la période de référence (1980-2019) ces hydrogrammes démontrent en moyenne une diminution de 22% et un retardement limité de la pointe de crue de 3 jours à l'horizon 2020-2059 et une diminution de 40% de la pointe de crue à l'horizon 2060-2099. Aussi les débits en période hivernale (novembre à mars) augmentent en moyenne de 19% à l'horizon 2020-2059 et de 35% à l'horizon 2060-2099. Finalement les débits en période estivale (juin à octobre) diminuent en moyenne de 8% à l'horizon 2020-2059 et de 17% à l'horizon 2060-2099. En complément les tableaux 5 et 6 apportent de précisions sur des indicateurs spécifiques de crues et d'étiages qui se rapportent alors aux événements extrêmes.

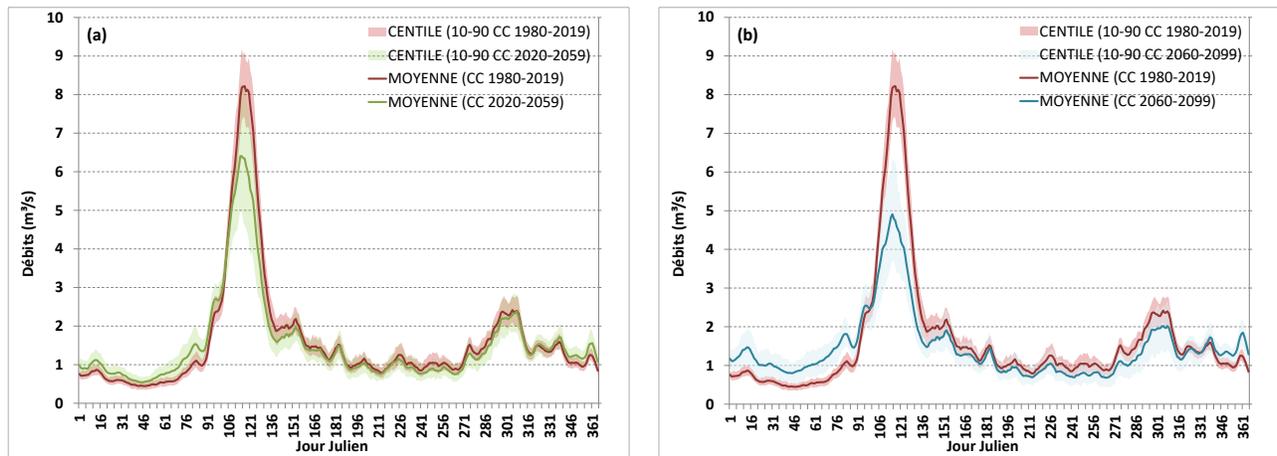


Figure 3 Impact des scénarios de changements climatiques sur les hydrogrammes annuels de la rivière Nelson, sur un horizon (a) 2020-2059 et (b) 2060 et 2099.

Tableau 5 Impacts relatifs des changements climatiques sur les crues (rivière Nelson).

Sous-bassin	Crue	2020-2059	2060-2099
Saint-Charles	Q2	-21.28%	-38.97%
	Q20	-23.87%	-43.42%
	Q100	-27.48%	-46.90%

Tableau 6 Impacts relatifs des changements climatiques sur les étiages (rivière Nelson).

Sous-bassin	Étiage	2020-2059	2060-2099
Saint-Charles	Q2-7	21.95%	51.67%
	Q10-7	28.53%	63.74%
	Q5-30	34.68%	62.91%

Exutoire de la rivière Lorette

La figure 4 présente les hydrogrammes journaliers moyens annuels simulés à l'exutoire de la rivière Lorette. Par rapport à la période de référence (1980-2019) ces hydrogrammes démontrent en moyenne une diminution de 26% de la pointe de crue à l'horizon 2020-2059 et une diminution de 36 de la pointe de crue à l'horizon 2060-2099. Aussi les débits en période hivernale (novembre à mars) augmentent en moyenne de 25% à l'horizon 2020-2059 et de 50% à l'horizon 2060-2099. Finalement les débits en période estivale (juin à octobre) diminuent en moyenne de 2% à l'horizon 2020-2059 et de 5% à l'horizon 2060-2099. En complément les tableaux 7 et 8 apportent de précisions sur des indicateurs spécifiques de crues et d'étiages qui se rapportent alors aux événements extrêmes.

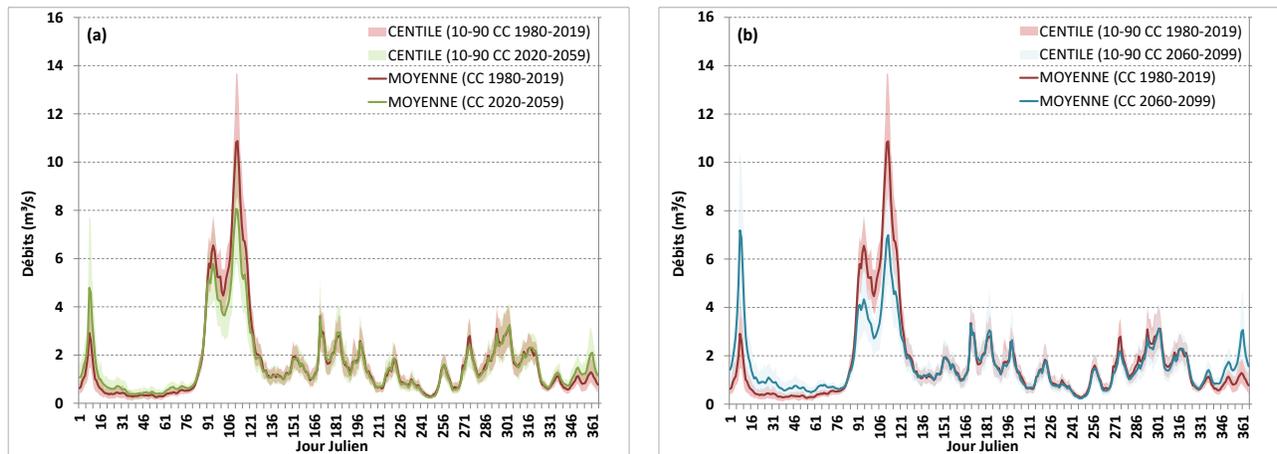


Figure 7 Impact des scénarios de changements climatiques sur les hydrogrammes annuels de la rivière Lorette, sur un horizon (a) 2020-2059 et (b) 2060 et 2099.

Tableau 7 Impacts relatifs des changements climatiques sur les crues (rivière Lorette).

Sous-bassin	Crue	2020-2059	2060-2099
Saint-Charles	Q2	-19.50%	-23.71%
	Q20	-30.33%	-32.23%
	Q100	-35.60%	-29.39%

Tableau 8 Impacts relatifs des changements climatiques sur les étiages (rivière Lorette).

Sous-bassin	Étiage	2020-2059	2060-2099
Saint-Charles	Q2-7	26.13%	30.67%
	Q10-7	76.93%	71.94%
	Q5-30	40.73%	117.59%

Exutoire de la rivière Du Berger

Sur la base des scénarios de changements climatiques, le figure 8 présente les hydrogrammes journaliers moyens annuels simulés à l'exutoire de la rivière Du Berger. Par rapport à la période de référence (1980-2019) ces hydrogrammes démontrent en moyenne une diminution de la pointe de crue de 11% à l'horizon 2020-2059 et une diminution de la pointe de crue de 22% à l'horizon 2060-2099. Aussi les débits en période hivernale (novembre à mars) augmentent en moyenne de 15% à l'horizon 2020-2059 et de 27% à l'horizon 2060-2099. Finalement les débits en période estivale (juin à octobre) diminuent en moyenne de 2% à l'horizon 2020-2059 et de 4% à l'horizon 2060-2099. En complément les tableaux 9 et 10 apportent de précisions sur des indicateurs spécifiques de crues et d'étiages qui se rapportent alors aux évènements extrêmes.

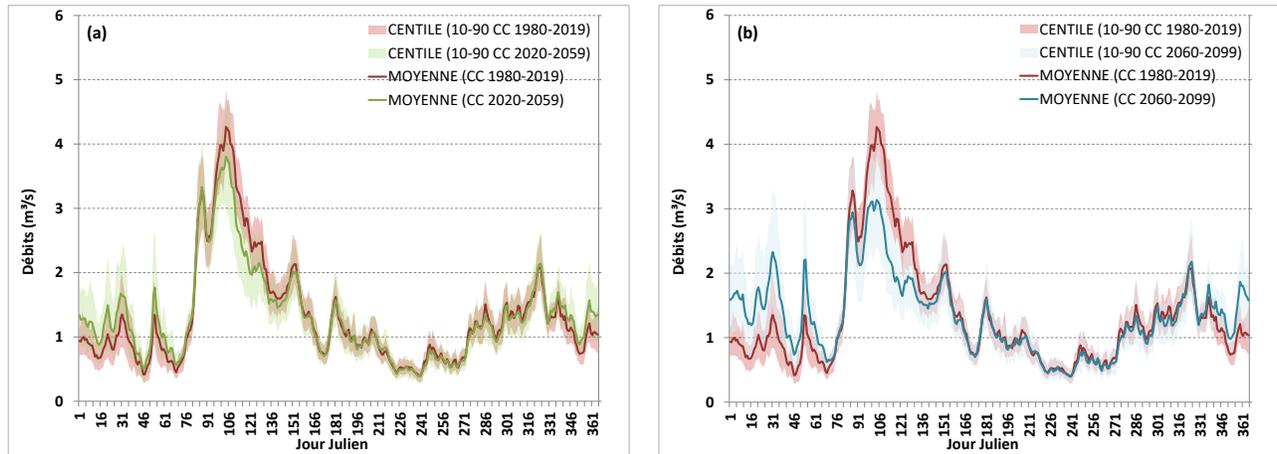


Figure 8 Impact des scénarios de changements climatiques sur les hydrogrammes annuels de la rivière Du Berger, sur un horizon (a) 2020-2059 et (b) 2060 et 2099.

Tableau 9 Impacts relatifs des changements climatiques sur les crues (rivière Du Berger).

Sous-bassin	Crue	2020-2059	2060-2099
Saint-Charles	Q2	-8.32%	-20.44%
	Q20	-13.63%	-24.99%
	Q100	-20.83%	-31.96%

Tableau 10 Impacts relatifs des changements climatiques sur les étiages (rivière Du Berger).

Sous-bassin	Étiage	2020-2059	2060-2099
Saint-Charles	Q2-7	2.44%	4.44%
	Q10-7	17.55%	12.84%
	Q5-30	2.97%	-0.93%

Annexe D : Modélisation du rôle des milieux humides sur les crues et étiages dans un contexte et de changements climatiques à l'échelle des sous-bassins de la rivière Saint-Charles.

Sans détailler les résultats de la modélisation de chaque scénario des changements climatiques, cette section vise essentiellement à présenter les impacts globaux des milieux humides sur les crues et les étiages dans le contexte du climat actuel et de constater les tendances générales de ces impacts dans un contexte de climat changeant à l'échelle des sous-bassins versants de la rivière Saint-Charles.

Exutoire de la rivière Des Hurons

À l'exutoire de la rivière Des Hurons, les milieux humides atténuent les crues en moyenne de 8% pour l'indicateur Q2 à 6% pour l'indicateur Q100 pour la période de référence (1980-2020). Les résultats montrent que ce rôle d'atténuation augmentera légèrement vers les horizons 2020-2059 et 2060-2099. Les milieux humides permettent de soutenir les débits en période d'étiages en moyenne entre 7% pour l'indicateur Q5-30 et 8% pour l'indicateur Q2-7 pour la période de référence avec des tendances à la hausse vers les horizons futurs pour atteindre des valeurs moyennes entre 8% pour l'indicateur Q5-30 et 13% pour l'indicateur Q10-7. Aussi les résultats présentent une augmentation temporelle de la variabilité des impacts des milieux humides sur les indicateurs de crues et d'étiages. La figure 1 présente les impacts relatifs des milieux humides existants sur les crues et les étiages à l'exutoire de la rivière des Hurons.

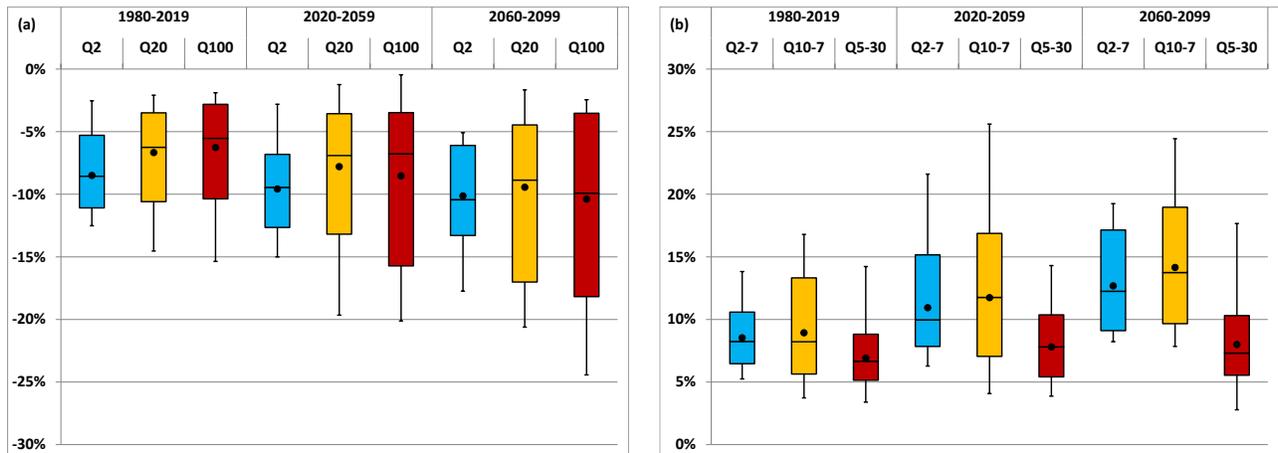


Figure 1 : Impacts modélisés des milieux humides dans un contexte de climat actuel (1980-2019) et de changements climatiques (horizons 2020-2059 et 2060-2099) sur (a) les crues et (b) les étiages à l'exutoire de la rivière Des Hurons.

Exutoire de la rivière Jaune

À l'exutoire de la rivière Jaune, les milieux humides atténuent les crues en moyenne de 13% pour l'indicateur Q2 à 16% pour l'indicateur Q100 pour la période de référence (1980-2020). Les résultats montrent que ce rôle d'atténuation restera relativement constant vers les horizons 2020-2059 et 2060-2099 pour les indicateurs Q20 et Q100 mais diminuera légèrement pour l'indicateur Q2. Les milieux humides permettent de soutenir les débits en période d'étiage en moyenne entre 12% pour l'indicateur Q5-30 et 20% pour l'indicateur Q2-7 pour la période de référence avec des tendances légèrement à la hausse vers les horizons futurs pour les indicateurs Q2-7 et Q10-7 mais

légèrement à la baisse pour l'indicateur Q5-30. Aussi les résultats présentent une augmentation temporelle de la variabilité plus spécifiquement dans les valeurs maximales des impacts des milieux humides sur les indicateurs de crues et d'étiages. La figure 2 présente les impacts relatifs des milieux humides existants sur les crues et les étiages à l'exutoire de la rivière Jaune.

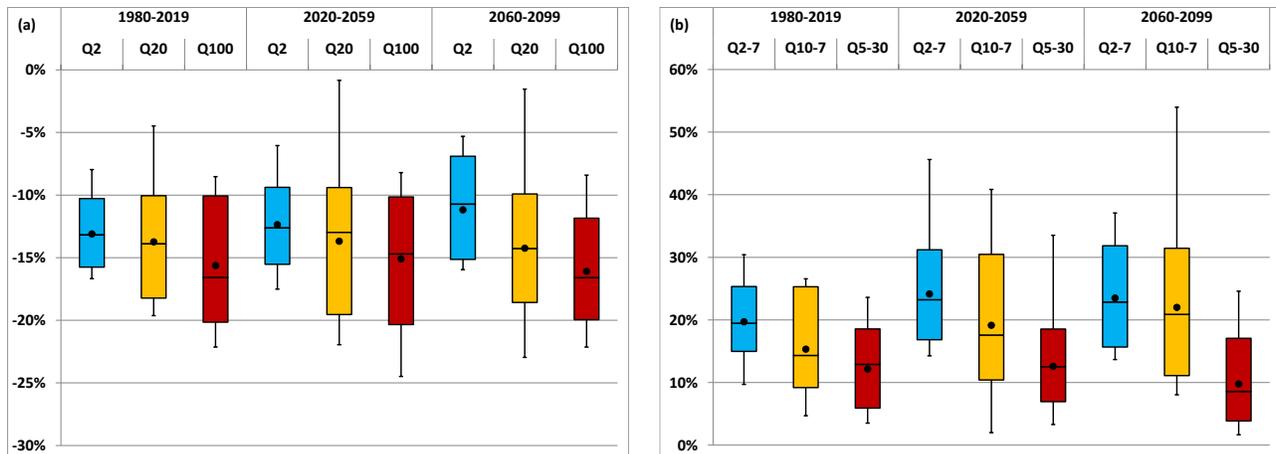


Figure 2 : Impacts modélisés des milieux humides dans un contexte de climat actuel (1980-2019) et de changements climatiques (horizons 2020-2059 et 2060-2099) sur (a) les crues et (b) les étiages à l'exutoire de la rivière Jaune.

Exutoire de la rivière Nelson

À l'exutoire de la rivière Nelson, les milieux humides atténuent les crues en moyenne de 24% pour l'indicateur Q2 à 33% pour l'indicateur Q100 pour la période de référence (1980-2020). Les résultats montrent que ce rôle d'atténuation restera relativement constant vers les horizons 2020-2059 et 2060-2099 et ce pour tous les indicateurs. Les milieux humides permettent de soutenir les débits en période d'étiage en moyenne entre 7% pour l'indicateur Q5-30 et 9% pour l'indicateur Q2-7 pour la période de référence avec des tendances à la hausse vers les horizons futurs, pour atteindre des valeurs moyennes entre 14% pour l'indicateur Q2-7 et 18% pour l'indicateur Q10-7 mais une tendance constante pour l'indicateur Q5-30. Aussi les résultats présentent une augmentation temporelle de la variabilité des impacts des milieux humides sur les indicateurs de crues Q20 et Q100 et plus marquée pour les indicateurs d'étiages Q2-7 et Q10-7. La figure 3 présente les impacts relatifs des milieux humides existants sur les crues et les étiages à l'exutoire de la rivière Nelson.

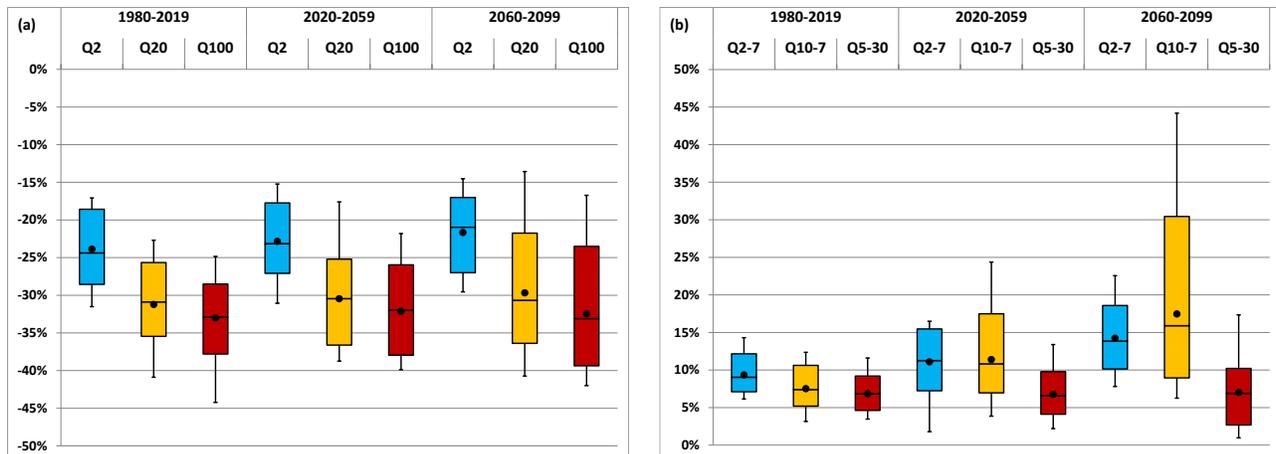


Figure 3 : Impacts modélisés des milieux humides dans un contexte de climat actuel (1980-2019) et de changements climatiques (horizons 2020-2059 et 2060-2099) sur (a) les crues et (b) les étiages à l'exutoire de la rivière Nelson.

Exutoire de la rivière Lorette

À l'exutoire de la rivière Lorette, les milieux humides atténuent les crues en moyenne d'environ 17 % sous la période de référence (1980-2020), et ce tout indicateur confondu avec une variabilité sur la moyenne de $\pm 1\%$. Nos analyses montrent que ce rôle d'atténuation restera relativement constant vers les horizons 2020-2059 et 2060-2099. Les milieux humides permettent de soutenir les débits en période d'étiage en moyenne entre 8% pour l'indicateur Q10-7 et 28% pour l'indicateur Q2-7 pour la période de référence avec des tendances à la hausse vers les horizons futurs, pour atteindre des valeurs moyennes entre 23% pour l'indicateur Q5-30 et 41% pour l'indicateur Q2-7. Aussi les résultats présentent une augmentation temporelle de la variabilité des impacts des milieux humides sur les indicateurs d'étiages. La figure 4 présente les impacts relatifs moyens des milieux humides existants sur les crues et les étiages à l'exutoire de la rivière Lorette.

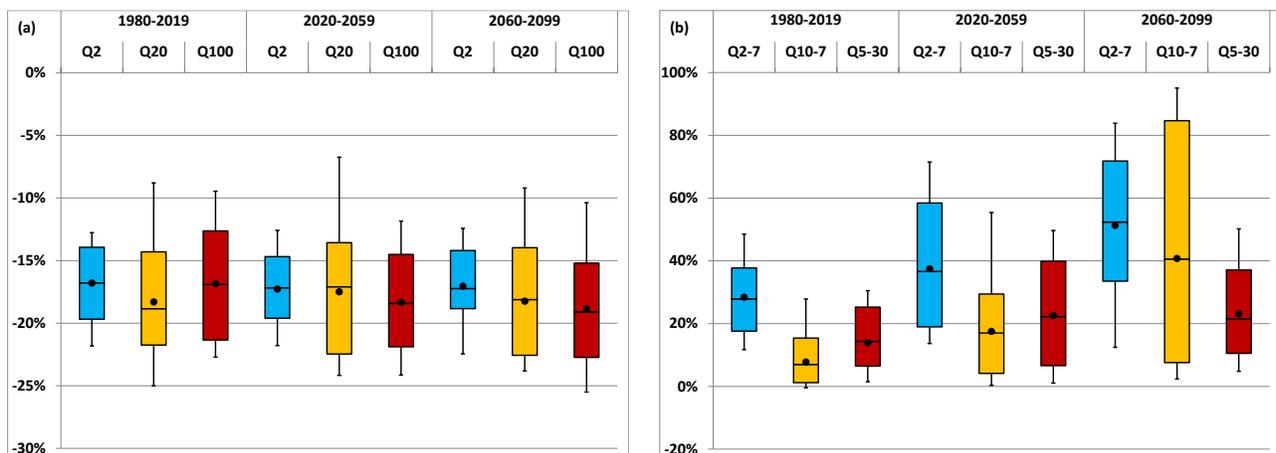


Figure 4 : Impacts modélisés des milieux humides dans un contexte de climat actuel (1980-2019) et de changements climatiques (horizons 2020-2059 et 2060-2099) sur (a) les crues et (b) les étiages à l'exutoire de la rivière Lorette.

Exutoire de la rivière Du Berger

À l'exutoire de la rivière Du Berger, les milieux humides atténuent les crues en moyenne d'environ 24 % sous la période de référence (1980-2020), et ce tout indicateur confondu avec une variabilité sur la moyenne de $\pm 1\%$. Les résultats montrent que ce rôle d'atténuation augmentera légèrement vers les horizons 2020-2059 et 2060-2099 et de façon plus marquée pour les indicateurs Q20 et Q100. Les milieux humides permettent de soutenir les débits en période d'étiage en moyenne entre 6% pour l'indicateur Q5-30 et 18% pour l'indicateur Q2-7 pour la période de référence avec des tendances à la hausse vers les horizons futurs pour les indicateurs Q2-7 et Q10-7 pour atteindre des valeurs moyennes de 22% pour l'indicateur Q2-7 et 20% pour l'indicateur Q10-7. Aussi les résultats présentent une augmentation temporelle de la variabilité des impacts des milieux humides sur les indicateurs d'étiages Q2-7 et Q10-7. La figure 5 présente les impacts relatifs moyens des milieux humides existants sur les crues et les étiages à l'exutoire de la rivière Du Berger.

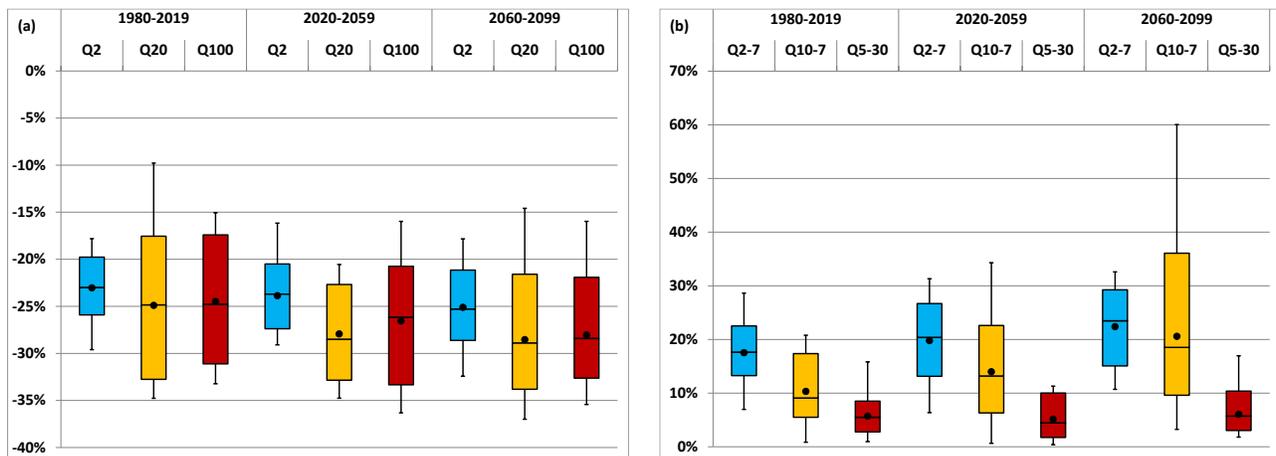


Figure 5 : Impacts modélisés des milieux humides dans un contexte de climat actuel (1980-2019) et de changements climatiques (horizons 2020-2059 et 2060-2099) sur (a) les crues et (b) les étiages à l'exutoire de la rivière Du Berger