

PROJECTION ET SCÉNARISATION HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE – RIVIÈRE COATICOOK

Équipe de réalisation

Rédaction :

Mélanie Trudel, ing. jr, Ph. D.

Professeure adjointe, Département de génie civil et de génie du bâtiment

Salma Gobji, étudiante à la maîtrise

Étudiante à la maîtrise, Département de génie civil et de génie du bâtiment

Réalisation des analyses:

Salma Gobji, étudiante à la maîtrise

Mélanie Trudel, Professeure, ing, PhD

Vincent Tremblay, étudiant à la maîtrise

Octobre 2020

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



Ce projet est financé par le gouvernement du Québec et répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030.



Table des matières

1. Introduction.....	5
2. Contexte / objectifs	6
3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature	7
4. Méthodologie / données.....	9
5. Résultats	18
6. Analyse et discussion	26
7. Conclusion et recommandations.....	28
8. Références.....	29
Annexes.....	32

Listes des tableaux

Tableau 1 – Débits utilisés pour le calage.....	10
Tableau 2 –Projections CORDEX-NA utilisées.	12
Tableau 3 –Horizons des simulations.....	12
Tableau 4 –Résultats du calage.....	14
Tableau 5 – Stratégies d’adaptation proposés	15
Tableau 6 – Volumes de sol dragué	16
Tableau 7 – Résultats des probabilités de dépassement annuel (PDA) en utilisant la meilleure distribution.....	32
Tableau 8 – Résultats des probabilités de dépassement annuel (PDA) en utilisant toutes les distributions ayant un p_value > 0.7	33
Tableau 9 – Résultats des probabilités de dépassement annuel (PDA) après ajout des milieux humides en utilisant toutes les distributions ayant un p_value > 0.7	34

Liste des figures

Figure 1– Intégration et le séquençage des approches ascendante et descendente, (Bhave et al., 2014)	5
Figure 2– Historique d’inondation (mise à jour de Demers et al., 2017).....	6
Figure 3 – Bassin versant de la rivière Coaticook: limite du tronçon à l’étude	9
Figure 4– Modèle SWAT du bassin versant de la rivière Coaticook	11
Figure 5– Modèle HEC-RAS 1D/2D.....	13
Figure 6– Calage du modèle HEC-RAS 1D/2D	14
Figure 7– Enrochements proposés	15
Figure 8– Secteurs avec dragage	16
Figure 9–Bassin de rétention	17
Figure 10– Milieux humides simulés en amont du secteur à l’étude.....	18
Figure 11– PDA pour les différents horizons pour a) RCP 4.5 et b) RCP 8.5. Les barres d’erreur représentent les 10 ^e et 90 ^e percentile de l’ensemble de PDA calculées	19
Figure 12– Probabilité d’occurrence du maximum selon les mois a) RCP 4.5 et b) RCP 8.5	20
Figure 13– Exemple de a) niveaux d’eau simulés et b) écart par rapport à la période de référence pour la PDA1% - RCP 8.5.....	21
Figure 14– Superficie de la plaine inondable pour différentes PDA pour a) RCP 4.5 et b) RCP 8.5	22
Figure 15– Écart de niveau d’eau par rapport à la situation actuelle pour a) une PDA de 50%, b) une PDA de 5% et c) une PDA de 1%.	24
Figure 16– Superficie de la plaine inondable pour différentes PDA et stratégies pour) la période de référence, b) l’horizon 1, c) l’horizon 2 et d) l’horizon 3	26
Figure 17– Comparaison CMIP5 et CORDEX.....	27
Figure 18– Exemple de grilles provenant des bases de données a) CMIP5 et b) CORDEX.....	28

1. Introduction

Les inondations sont un phénomène majeur dans le monde et en particulier au Canada. Ces phénomènes causent des impacts sociaux, environnementaux et économiques importants. Les inondations récentes au Québec et au Canada (Richelieu en 2011, Calgary en 2013, printemps 2017 et 2019 au Québec) ont mis en lumière la vulnérabilité de plusieurs communautés riveraines. L'évolution des conditions hydroclimatiques attendues en réponse à la transformation du climat modifiera l'occurrence et l'intensité des événements extrêmes. Face à cette problématique, les communautés doivent réduire les risques liés aux inondations à l'aide de différentes stratégies d'adaptation.

Les risques sont la combinaison d'un aléas (superficies inondées) et d'une vulnérabilité. Afin de réduire les risques, il est ainsi possible de proposer des stratégies d'adaptation visant à réduire l'aléas ou la vulnérabilité. De plus, des approches descendantes (Top-down) et ascendantes (Bottom-up) permettent de proposer et d'évaluer différentes stratégies d'adaptation (Girard et al., 2015). Les approches ascendantes concernent la manière dont les individus et / ou les communautés sont vulnérables à la variabilité climatique et la manière dont leur résilience peut être améliorée grâce à l'adaptation. Les approches descendantes commencent généralement par des projections de changement climatique combinées à un cadre de décision pour développer des stratégies d'adaptation anticipatives. Les stratégies d'adaptation ont pour but de limiter les dégâts causés par les inondations. Selon Adjer et al. (2005), l'adaptation ne consiste pas seulement en des changements aux niveaux des structures et des ouvrages hydrauliques mais aussi une motivation de la population, une amélioration de la sécurité, des actions d'individus ou d'organisations. L'approche descendante est une évaluation quantitative des changements climatiques attendus, et à partir de cette évaluation, des mesures sont ensuite proposées et modélisées. Bien que cette approche néglige les considérations humaines, elle reste utile pour les problèmes d'incertitudes. L'approche ascendante est une évaluation qualitative de la vulnérabilité sociale. Par la suite, des options d'adaptation sont identifiées et évaluées. Bien que cette approche ne donne pas une grande importance aux facteurs physiques, elle offre l'implication des parties prenantes (Figure 1). Certains chercheurs ont combiné ces deux approches (Girard et al., 2015).

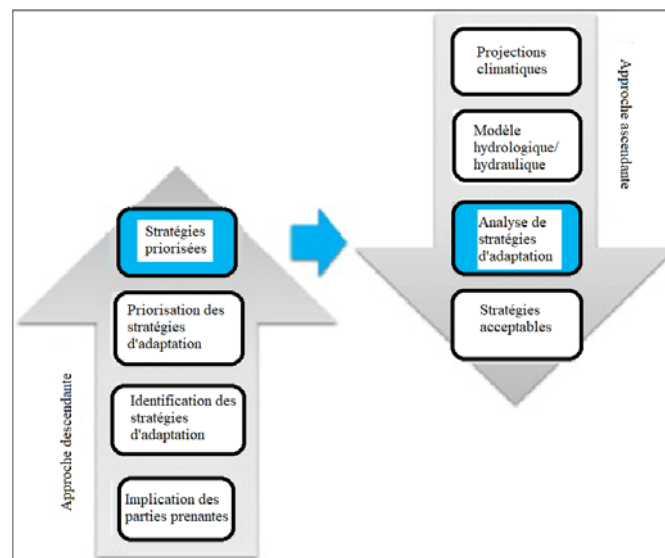


Figure 1—Approches ascendante et descendante, (inspiré de Dessai et Hume, 2004)

Afin de réduire l'aléas, différentes stratégies d'adaptation peuvent être investiguées. Par exemple, des approches modifiant le lit de la rivière ou des approches visant à réduire les apports en eau. Ces approches peuvent être modélisées soit par des modèles hydrologiques, soit par des modèles hydrauliques. Les modèles hydrologiques simulent les débits à partir des conditions météorologiques (températures et précipitation) et les caractéristiques du territoire (modèle numérique d'élévation, occupation du territoire, type de sol). Ils permettent ainsi d'estimer les débits en climat futur à l'aide de projections climatiques de températures et précipitations. La modélisation hydraulique simule les niveaux d'eau et les superficies inondées à partir d'information sur les débits et des caractéristiques de la rivière (bathymétrie, rugosité).

Ainsi, le projet vise à répondre à la question de recherche suivante : Quelle est l'impact des stratégies d'adaptation sur les niveaux d'eau et les superficies inondées en climat actuel et en climat futur ? Le projet fera appel à la modélisation hydrologique et la modélisation hydraulique pour répondre à cette question.

2. Contexte / objectifs

La région de Coaticook a fait face à plusieurs épisodes d'inondation dans les dernières années (Figure 2). Les inondations se produisent par embâcle (crue hivernale) ou en eau libre. Les inondations en eau libre peuvent se produire au printemps suite à la fonte du couvert de neige, lorsque la fonte se produit rapidement ou combinée avec des épisodes de pluie. Il arrive également que des événements de pluie subite et intense causent des inondations au printemps ou à l'automne. La crue du 10 juin 2015, responsable de dommages matériels à plusieurs propriétés ainsi que des pertes agricoles est un exemple récent de d'inondation estivale suite à des précipitations.

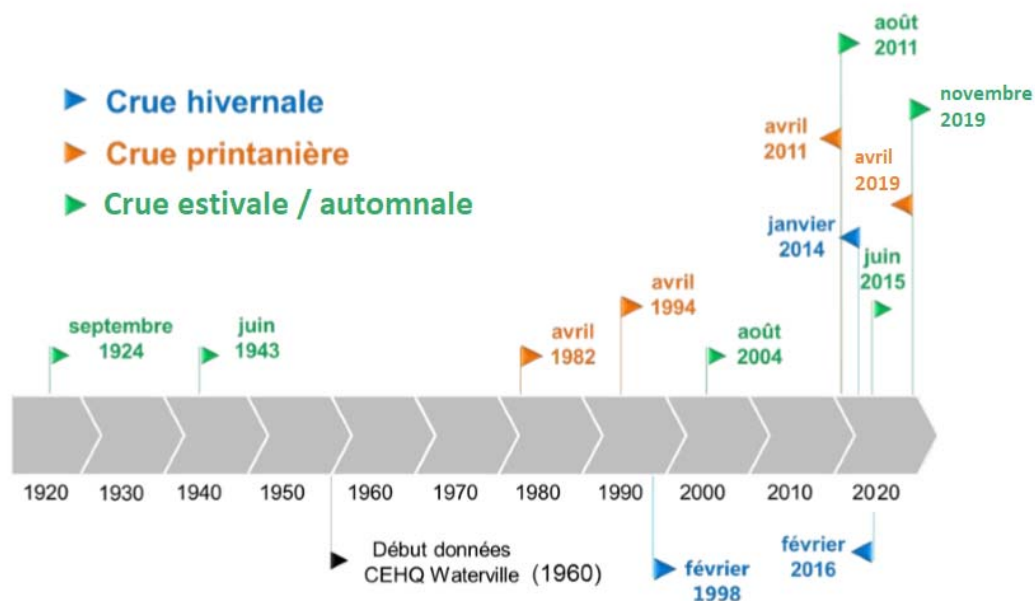


Figure 2– Historique d'inondation (mise à jour de Demers et al., 2017)

Situé dans le bassin versant de la rivière Saint-François, en Estrie, le bassin versant de la rivière Coaticook couvre une superficie de 535 km², dont 32% aux États-Unis. L'occupation du territoire est autant agricole (48%) que forestier (41%), et comprend également des milieux développés (3%), des milieux ouverts (3.5%) et des milieux humide (3%). La rivière Coaticook s'écoule sur environ 60 km dans la portion canadienne et est entrecoupée de tronçons alluviaux et de gorges encaissées. Les secteurs alluviaux ont une grande mobilité et sont propices aux phénomènes d'érosion et sédimentation. Une étude récente sur l'acquisition de connaissance sur la dynamique fluviale de la rivière Coaticook (Demers et al. 2017) a identifié le secteur de Compton sensible aux inondations. Le site d'étude du présent projet concerne donc un tronçon de 20 km dans ce secteur particulièrement agricole.

Le projet vise à simuler les zones inondables ainsi que des stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques. Les objectifs spécifiques sont :

- Estimer les probabilités de dépassement annuel (PDA) en condition actuelle et en condition future
- Délimiter les zones inondées pour les différentes PDA
- Évaluer différentes stratégies d'adaptation

Le projet s'inscrit dans le cadre du projet « Analyse Coûts-Avantages de l'adaptation aux inondations riveraines en contexte de changements climatiques » qui vise à outiller les communautés aux prises avec des problématiques d'inondations riveraines grâce à l'analyse économique de l'ensemble des coûts et avantages de diverses solutions d'adaptation. D'une part, les résultats de cette étude serviront à l'analyse économique réalisée par Ouranos. D'autre part, les stratégies d'adaptation ont été identifiées dans le cadre de consultation avec les parties prenantes organisé par le ROBVQ et Ouranos.

3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature

Les changements futurs de températures et précipitations (quantité et timing) auront des impacts importants sur le cycle hydrologique au Québec (Direction de l'expertise hydrique, 2018). Ces changements dépendent fortement de la région étudiée tel que la latitude ainsi que des caractéristiques du territoire. Les modèles de circulation générale (MCG) sont couramment utilisés pour fournir des projections futures du changement climatique. Les MCG sont utilisés pour simuler le climat selon des scénarios d'émissions tel que les Representative Concentration Pathways (RCP) fournis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (Hayhoe et al., 2017). Toutefois, la résolution de MCG (100 à 450 km dans la phase 5 de l'ensemble Coupled Model Intercomparison Project, CMIP5) est généralement trop grossière pour être utilisée comme intrants directs dans les modèles hydrologiques. Les modèles climatiques régionaux (MCR) constituent une méthode de mise à l'échelle permettant de générer des projections climatiques à une résolution allant de 12 à 50 km (Giorgi et Gutowski, 2015). Il s'agit de modèles similaires au MCG, mais limités sur une région offrant ainsi une meilleure représentation de l'hétérogénéité de la surface. Ils sont pilotés à leurs frontières par un MCG. Le projet CORDEX (<https://cordex.org/>) est un ensemble de projections climatiques regroupant plusieurs MRC pilotés par différents MCG. Plusieurs études ont montré l'importance de tenir compte des différentes sources d'incertitude dans les analyses hydrologiques. Cette incertitude est liée à la sélection des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, les modèles

climatiques (MCG, MCR), les approches de réduction d'échelle et les modèles hydrologiques (Chen et al., 2011).

Afin d'étudier l'impact des changements climatiques sur les zones inondables, les séries chronologiques de débits générées par les modèles hydrologiques sont utilisées pour calculer les probabilités de dépassement annuel (PDA) à l'aide de l'analyse fréquentielle. Cette méthode statistique se base sur une série chronologique de débits extrêmes. On retrouve deux approches dans la littérature pour définir la série chronologique des débits extrêmes, la méthode par bloc et la méthode par maximum au-dessus d'un seuil (Peak over threshold, POT) (Coles, 2001). La méthode par bloc identifie le maximum dans un bloc donné, par exemple une année ou une saison. La méthode POT identifie plusieurs maximums au-dessus d'un seuil défini selon le site d'étude. Il est alors possible d'identifier deux maximums de crue qui se seraient produits la même année par exemple. Lors de l'analyse fréquentielle, il est d'abord recommandé de vérifier les hypothèses de stationnarité (tendance dans le temps), d'homogénéité (provient de la même distribution par exemple lorsqu'une station de mesure a été déplacée) et d'indépendance (aucune auto-corrélation entre les données). Les tests de Mann-Kandall pour la stationnarité, de Wilcoxon pour l'homogénéité et Wald-Wolfowitz pour l'indépendance sont appropriés pour vérifier ces hypothèses (Coles et al. 2001). Une période de 30 ans de simulation est souvent utilisée afin de réduire les effets de non-stationnarité. Suite à la validation des hypothèses, différentes distributions statistiques peuvent être utilisées pour représenter la série chronologique. Parmi ces distributions, on retrouve, en outre, la distribution log-normale à deux paramètres, la distribution General extreme value (GEV), la distribution Gamma, la distribution Gumbel, la distribution log-normal à trois paramètres et la distribution log-perason III (Coles, 2001; Zhang et al., 2020). Les distributions sont ajustées sur les données extrêmes soit par la méthode de moments, la méthode de maximum de vraisemblance ou la méthode des L-moments (Coles, 2001). Le choix de la « meilleure » distribution représentant les données extrêmes a fait l'objet de plusieurs études, mais reste un enjeu (Laio et al., 2009; Rahman et al, 2013). Plusieurs procédures existent pour comparer les ajustements des distributions de probabilité. Le critère d'information bayésien (BIC) et le critère d'information d'Akaike (AIC), le test de Kolmogorov-Smirnov et le test d'Anderson-Darling sont plus couramment utilisés pour évaluer la qualité de l'ajustement (Di Baldassare et al., 2009).

Un enjeu dans l'analyse fréquentielle dans un contexte de changements climatiques est le choix de la distribution afin que celle-ci reflète correctement les données autant en climat actuel qu'en climat futur. Toutefois, le changement de distribution entre deux horizons de temps peut amener des incertitudes liées aux choix de la distribution. Par exemple, l'étude de Lawrence et al., (2020) utilise 10 projections climatiques provenant de EUROCORDEX, deux méthodes de corrections de biais, 25 ensemble de paramètre du modèle hydrologique pour 115 bassins versants en Norvège. Ensuite, trois distributions (Gumbel, GEV et Generalised Pareto) ont été utilisés pour représenter les séries chronologiques. Pour chaque distribution, un ensemble a été créé par bootstrap. Une décomposition de la variance montre que l'analyse fréquentielle contribue à 30 à 52% de la variance totale. L'étude compare les trois distributions, mais l'analyse de variance est effectuée pour chaque distribution.

La modélisation hydraulique permet ensuite de simuler les niveaux d'eau ainsi que les zones inondées en fonction des caractéristiques physiques de la rivière pour des débits donnés. Il est ainsi possible d'estimer les zones inondables en climat futur (Laforce et al., 2011, Batchabani et al., 2016).

Actuellement, de nombreux modèles hydrodynamiques sont disponibles pour la modélisation

hydraulique, 1D, 2D et combiné 1D/2D. Les modèles combinés 1D/2D (1D dans la rivière et 2D dans la plain) permettent une meilleure représentation de la plaine inondable tout en permettant de bien simuler les structures hydrauliques.

Les stratégies d'adaptation sont habituellement classées en deux catégories : structurelles et non structurelles (Schanze et al. 2007). Les mesures d'adaptation structurelles modifient le territoire telles que les remblais, les digues, les bassins de rétention. Les mesures non structurelles rassemblent toutes les autres mesures telles que des modifications au zonage, la relocalisation ou la mise en œuvre de système de prévision des inondations. Alferi et al., (2016) ont analysé quatre stratégies d'adaptation et conclu qu'il est préférable de réduire la vulnérabilité plutôt que l'aléas. Cette conclusion est partagée par Hoojier et al. (2004).

4. Méthodologie / données

4.1 Description et localisation du secteur à l'étude

Le tronçon à l'étude est borné à l'amont à environ 100 mètres en aval du pont P-10523 sur la rue Saint-Marc dans la ville de Coaticook et il se termine en aval à environ 100 mètres en aval du pont P-01916 sur la route 208 (Chemin Hatley) dans la municipalité de Compton. La Figure 3 illustre la portée du tronçon à l'étude.

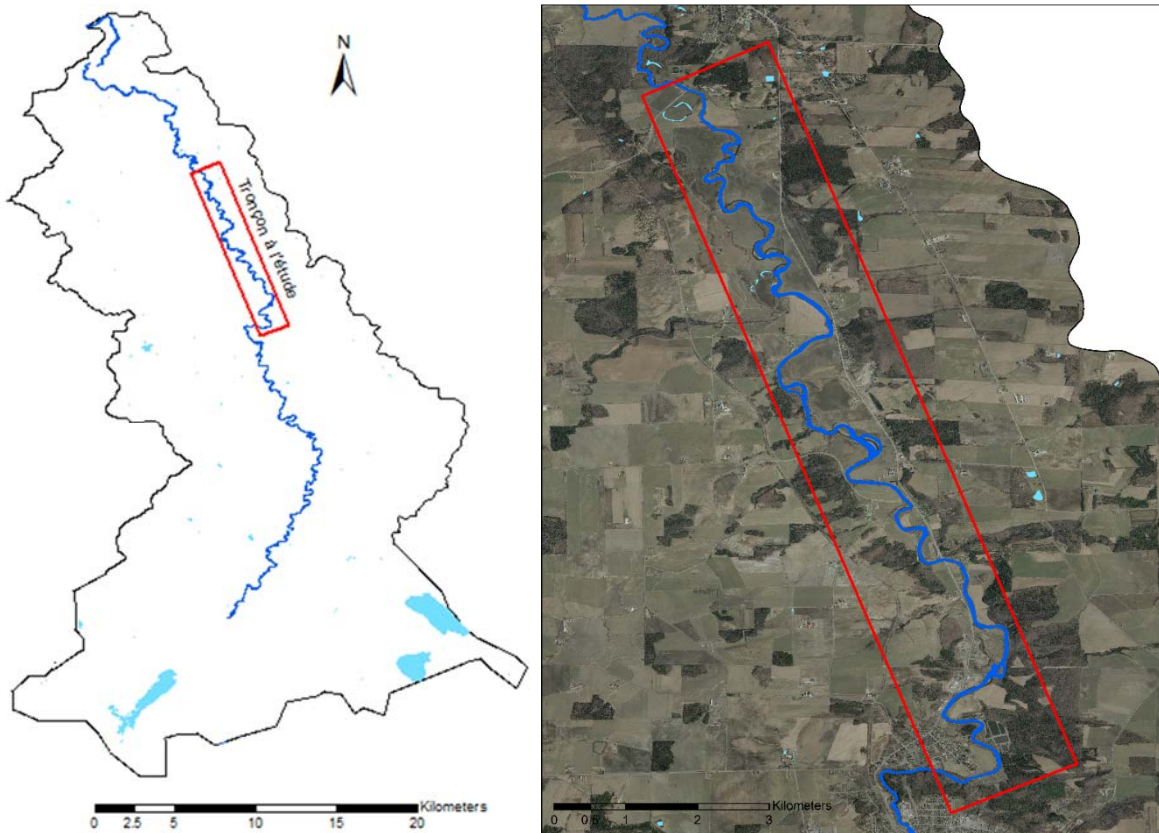


Figure 3 – Bassin versant de la rivière Coaticook: limite du tronçon à l'étude

4.2 Acquisition des données

La mise en œuvre d'un modèle hydraulique nécessite des données bathymétriques afin de caractériser la rivière. Au total, 60 sections bathymétriques ont été arpentés. Il est également nécessaire de prendre des mesures de débits et de niveaux afin d'ajuster le paramètre de rugosité de la rivière (coefficient de Manning), en comparant les simulations et les observations. Des mesures combinées de débit et niveau d'eau ont été acquises les 14 avril 2019, 29 avril 2019 et 1^{er} novembre 2019 (Tableau 1). De plus, les caractéristiques des cinq ponts doivent être intégrées au modèle. Les observations de bathymétrie, de niveaux d'eau et les caractéristiques des ponts ont été prises à l'aide d'un GPS-différentiel en 2018 et 2019. Les observations de débits sont prises à l'aide d'un courantomètre acoustique à effet doppler (ADCP).

Tableau 1 – Débits utilisés pour le calage

Date	Débit en amont - Pont St-Marc (m ³ /s)	Débit en aval - Pont Hatley (m ³ /s)
14 avril 2019	56	58
29 avril 2019	21	22
1 ^{er} novembre 2019	115	119

4.3 Modélisation hydrologique SWAT

Le modèle hydrologique SWAT (Arnold et al., 1998) a été mis en œuvre pour le bassin versant de la rivière Coaticook. Le territoire est divisé en sous-bassins versants avec une discrétisation plus fine pour le secteur à l'étude (Figure 4). Le calage de modèle est réalisé à l'aide de l'algorithme d'optimisation Shuffle Complex Evolution (SCE-UA) à l'exutoire du bassin versant (station 03215 du MELCC). Le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) est utilisé pour évaluer la qualité du calage. Une valeur de 0,67 a été obtenue pour la période de calage de 2008 à 2017, et une valeur de 0,53 pour la période de validation allant de 1994 à 2004. Le calage est donc satisfaisant et le modèle sera utilisé pour simuler les débits en conditions de référence et future.

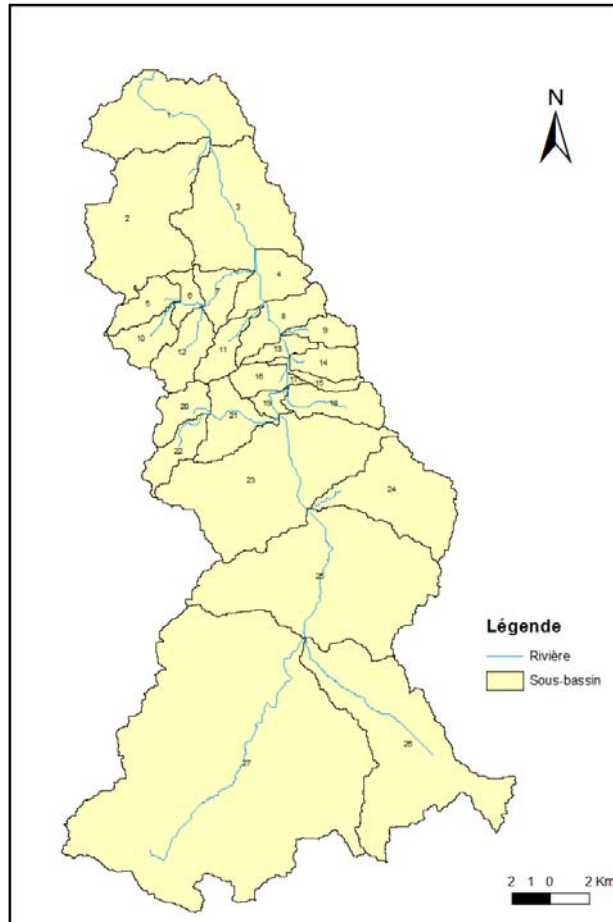


Figure 4– Modèle SWAT du bassin versant de la rivière Coaticook

4.4 Scénarios climatiques

Les projections CORDEX-NA (19 projections) ont été utilisés comme intrant dans le modèle hydrologique SWAT afin de simuler les débits (Tableau 2). Ces projets ont été fournis par Ouranos et sont débiaisés. Les débits sont simulés pour la période de 1955 à 2100.

Tableau 2 –Projections CORDEX-NA utilisées.

Projection	Modèle de circulation générale	Modèle régional de climat	Résolution (km)	Scenario RCP
1	CanESM2	CanRCM4	25	4.5
2	CanESM2	CanRCM4	25	8.5
3	CanESM2	CanRCM4	50	4.5
4	CanESM2	CanRCM4	50	8.5
5	CanESM2	CRCM5-UQAM	50	4.5
6	CanESM2	CRCM5-UQAM	50	8.5
7	CanESM2	RCA4	50	4.5
8	CanESM2	RCA4	50	8.5
9	EC-EARTH	HIRHAM5	50	4.5
10	EC-EARTH	HIRHAM5	50	8.5
11	EC-EARTH	RCA4	50	4.5
12	EC-EARTH	RCA4	50	8.5
13	GFDL-ESM2M	RegCM4	25	8.5
14	GFDL-ESM2M	RegCM4	50	8.5
15	MPI-ESM-LR	CRCM5-UQAM	50	8.5
16	MPI-ESM-LR	RegCM4	25	8.5
17	MPI-ESM-LR	RegCM4	50	8.5
18	MPI-ESM-MR	CRCM5-UQAM	50	4.5
19	MPI-ESM-MR	CRCM5-UQAM	50	8.5

Trois horizons, en plus de la période de référence, ont été identifié par Ouranos pour les calculs de probabilités de dépassement annuel (Tableau 3). Ces horizons concordent avec ceux de l’atlas hydroclimatique.

Tableau 3 –Horizons des simulations

Référence	1971-2000
H1	2021-2050
H2	2041-2070
H3	2071-2100

4.5 Probabilités de dépassement annuel

Le calcul des probabilités de dépassement annuel (PDA) est fait pour chaque projection de changements climatiques et chaque horizon. D’abord, des tests de stationnarité sont fait, et il a été constaté que les séries sont stationnaires par période de 30 ans. Neuf distributions sont testées : 1) Lognormal à 2 paramètre (LN2), 2) Generalized Extreme Value (GEV), 3) Gamma, 4) Gumbel, 5) Weibull, 6), Logistic, 7) Loglogistic, 8) Lognormal à 3 paramètres (LN3) et 9) Log-Pearson 3 (LP3). Un test d’Anderson-Darling est réalisé pour déterminer la distribution qui correspondait le mieux aux simulations. Ainsi, pour le RCP 4.5, il y a 7 projection climatiques * 9 distributions, donc 63 valeurs potentielles; et 12 projections * 9 distributions, donc 108 valeurs potentielles. Pour la suite, toutes les distributions ayant une valeur-P supérieure à 0.7 seront conservées afin de représenter l’incertitude

liée au choix de la distribution. Pour des valeurs inférieures à 0,7, la distribution est considérée ne pas bien représenter les données.

Enfin, un facteur de pointe est appliqué pour les PDA inférieures à 50%. Le facteur de pointe calculé par le MELCC (CEHQ, 2008) d'une valeur de 1,23 est utilisé.

4.6 Modélisation hydraulique et cartographie des zones inondées

Le modèle HEC-RAS version 5.0.7 (Brunner, 2016) a été mise en œuvre à l'aide de HEC-GEORAS. Il s'agit d'une modèle combiné 1D/2D. La rivière est modélisée à l'aide de sections transversales 1D, alors que la plaine inondable est modélisée à l'aide d'un maillage structuré de 10 m (Figure 5). Les caractéristiques des ponts sont intégrées dans le modèle. L'enrochement actuel a été intégré dans le modèle d'après la couche d'information fournie par Ouranos. Afin de caractériser l'enrochement, un coefficient de Manning de 0,12 est utilisé.

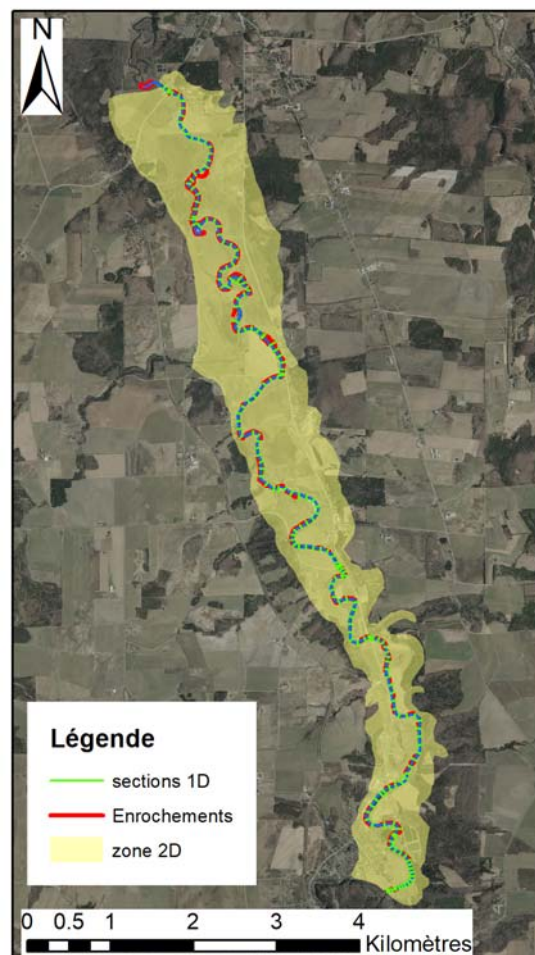


Figure 5– Modèle HEC-RAS 1D/2D

Le calage du modèle a été réalisé à l'aide des observations du 14 avril, 29 avril et 1^{er} novembre 2019.

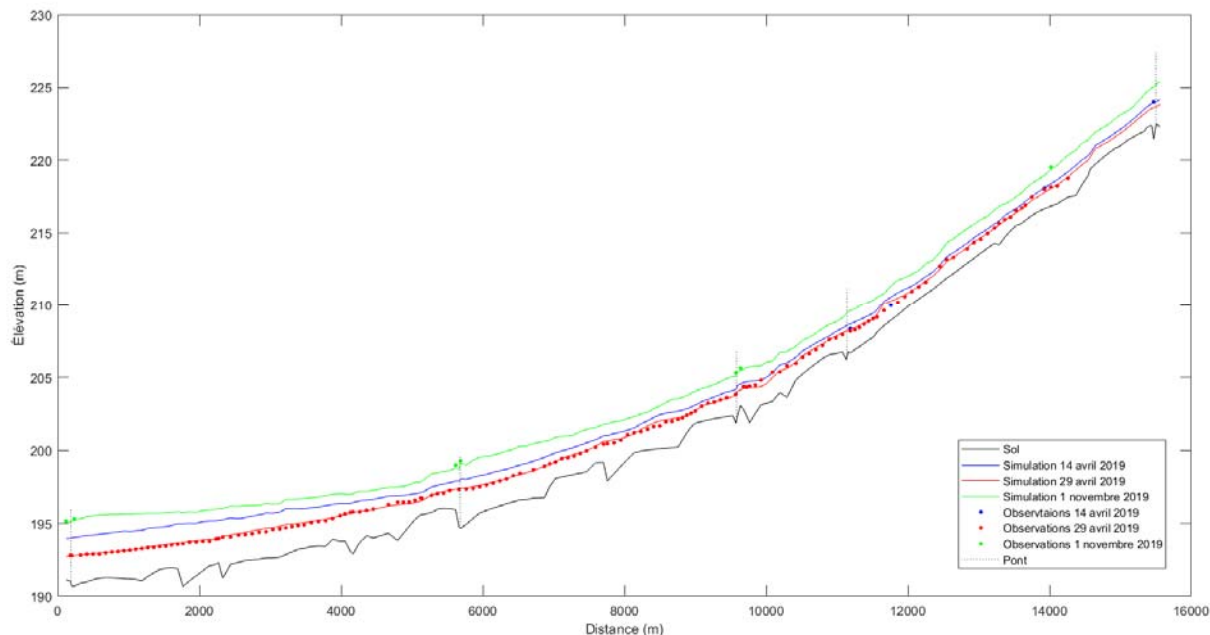


Figure 6– Calage du modèle HEC-RAS 1D/2D

Le Tableau 4 présente les résultats du calage. Deux critères sont utilisés soit la racine de l'écart quadratique moyen (RMSE), et le nombre d'observation où l'écart est de plus de 20 cm. Il faut qu'un maximum d'une observation sur 10 présente un écart de plus de 20 cm. La majorité des écarts sont localisés à proximité des ponts qui causent des perturbations locales aux niveaux d'eau. Les observations du 14 avril 2019 et du 1^{er} novembre 2019 sont localisées à proximité des ponts (Figure 6), alors que les observations du 29 avril 2019 ont été acquises à partir d'un kayak tout au long de la rivière. Les résultats sont satisfaisants, et le modèle peut donc être utilisé pour simuler les profondeurs d'eau pour différents scénarios.

Tableau 4 –Résultats du calage

Date	Nombre d'observation	RMSE (m)	Nombre d'observation avec un écart > 20 cm
14 avril 2019	4	0.33	2
29 avril 2019	152	0.13	13
1 ^{er} novembre 2019	7	0.16	0

4.7 Stratégies d'adaptation

Lors d'une assemblée de consultation participative qui a eu lieu en février 2020 avec la MRC de Coaticook, l'UPA, le COGESAF, OURANOS, le ROBVO et des agriculteurs de la région, différentes stratégies d'adaptation ont été évoquées. Ces stratégies ont été analysées afin d'évaluer s'il est possible de les modéliser. Les stratégies sélectionnées sont présentées dans le Tableau 5 et décrites dans les sections suivantes.

Tableau 5 – Stratégies d’adaptation proposés

		Description
Actuel		Enrochement existant
Scénario 1	SQ	Enrochement léger (SQ) : Inondations avec enrochements légers selon la réglementation actuelle (politique d’interventions minimales en rivières)
Scénario 2	STA-DG	Enrochement léger et dragage de 3 zones
Scénario 3	STA-LAT	Contrôle des apports latéraux
Scénario 4	STA-BASSIN	Bassin de rétention dans le secteur d’étude
Scénario 5	STA-MH	Contrôle en amont par des milieux humides riverains

4.7.1 Stratégie d’adaptation – SQ

La stratégie Statu Quo (SQ) consiste à ajouter de l’enrochement selon la réglementation actuelle (Figure 7). L’enrochement supplémentaire correspond à 1,2 km d’enrochement et affecte ainsi 12 sections transversales du modèle où le coefficient de Manning de la berge enrochée est changé pour 0,12.



Figure 7– Enrochements proposés

4.7.2 Stratégie d'adaptation – STA-DG

Suite à la rencontre avec les agriculteurs, trois secteurs pouvant nécessiter du dragage ont été identifiés (Figure 8). Le secteur b) est situé à proximité du pont du chemin Jacques et est le plus important en terme de volume. Les secteurs c) et d) sont situés plus en amont non loin du pont du chemin Vaillancourt. Le Tableau 6 présente le volume de sol dragué pour chacun des trois secteurs.

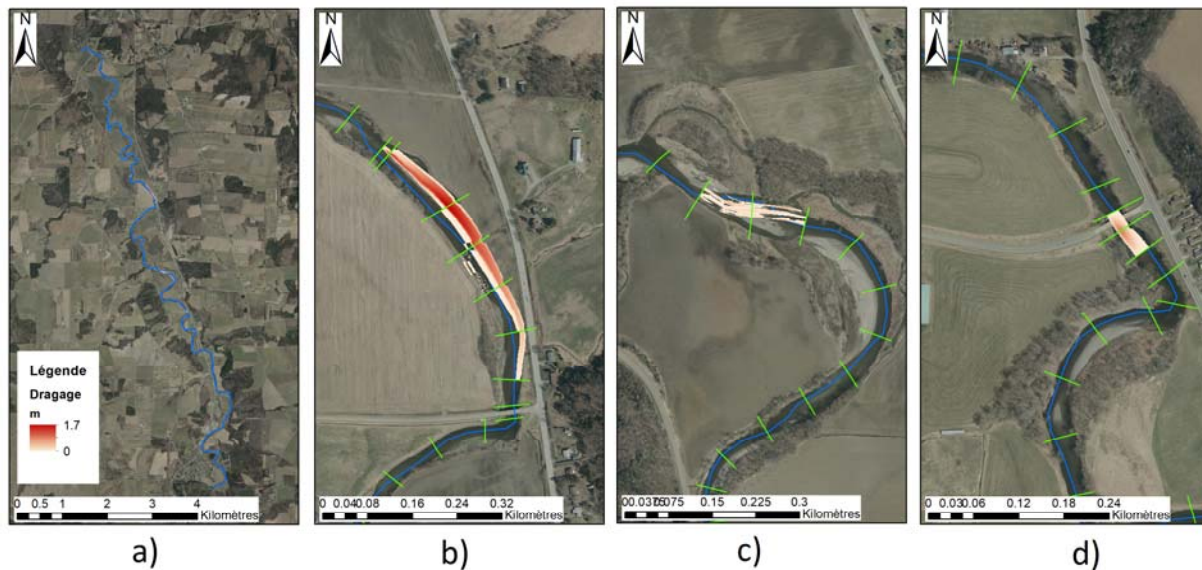


Figure 8– Secteurs avec dragage

Tableau 6 – Volumes de sol dragué

Secteurs	Section HEC-RAS	Volume (m ³)
b)	5123.96; 5140.11; 5275.09; 5360.61; 5446.13; 5531.65; 5617.17	6108
c)	7947.84; 8042.37; 8136.90	301
d)	9571.60; 9598.29; 9637.60	308

4.7.3 Stratégie d'adaptation – STA-LAT

Cette stratégie consiste à simuler la rétention de la totalité des apports latéraux du secteur. La superficie du bassin versant en amont du secteur d'étude est de 370 km², alors que la superficie en aval est de 438 km². Les apports latéraux simulés avec SWAT constituent 14 % des apports à la condition frontière aval. Il s'agit d'un scénario extrême qui peut servir de comparaison avec d'autres scénarios. Il représente le maximum de rétention possible dans une approche locale, où seulement les parties prenantes du secteur à l'étude mettent en place des mesures de rétention.

4.7.4 Stratégie d'adaptation – STA-BASSIN

Un bassin de rétention dans la partie amont du tronçon à l'étude (sections 13528.9 à 13221.66) a été simulé (Figure 9). La profondeur moyenne du bassin est de 2,13 m avec un maximum de 3,9 m. D'une superficie de 29 392 m², son volume est de 69 551 m³.

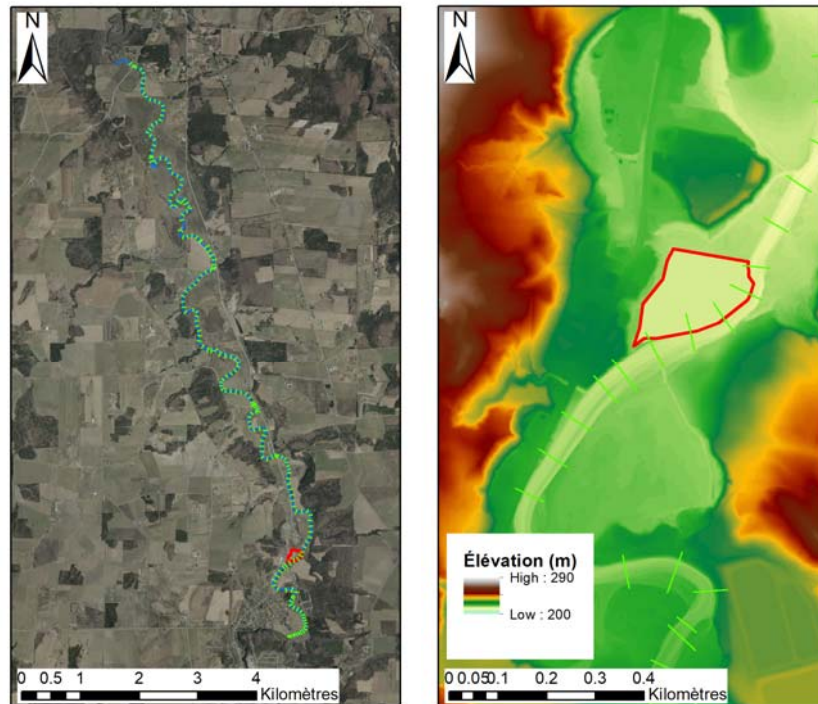


Figure 9–Bassin de rétention

4.7.5 Stratégie d'adaptation – STA-MH

Cette stratégie d'adaptation vise à estimer l'impact de la présence de milieux humides riverains dans le bassin versant en amont du secteur à l'étude (Figure 10). Pour ce faire, des milieux humides riverains sont ajoutés dans le modèle hydrologique SWAT. En tout, une superficie de 92.6 ha de milieux humides riverains a été simulé avec une profondeur de 20 cm. Ainsi, le volume des milieux humides est de 18.5×10^4 m³.

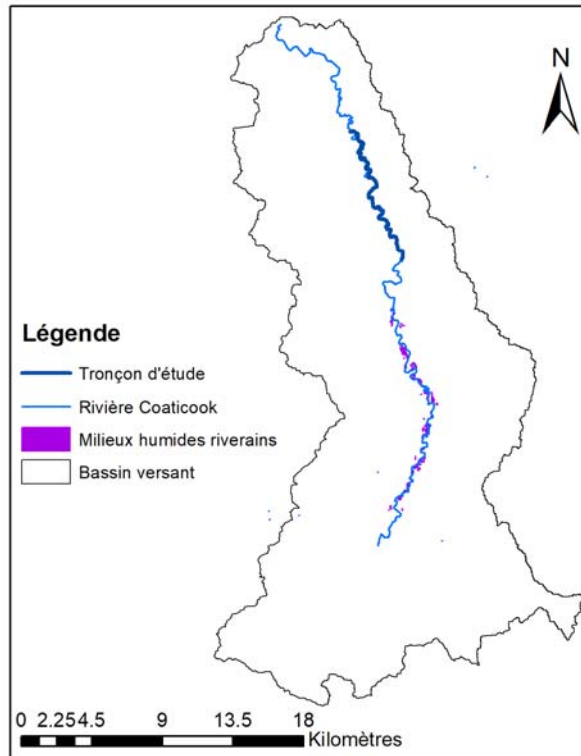
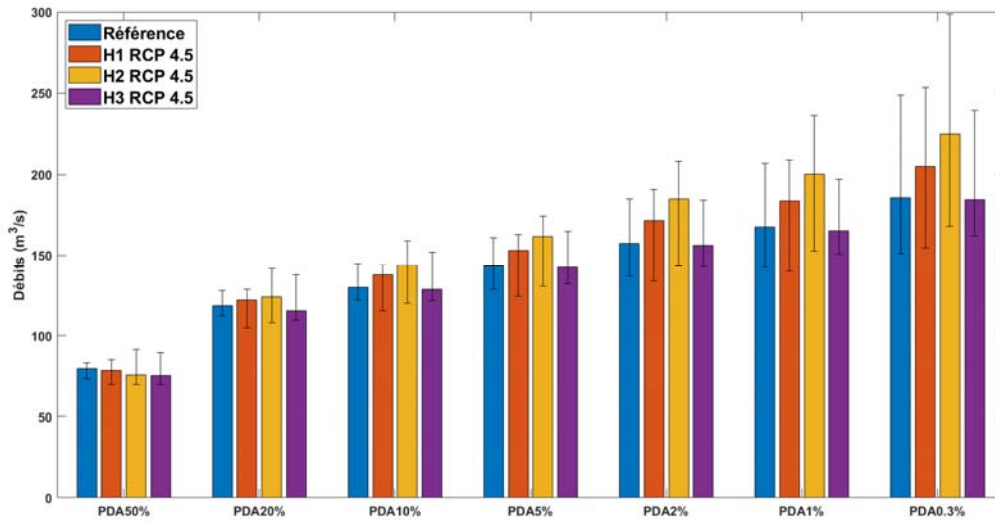


Figure 10– Milieux humides simulés en amont du secteur à l'étude

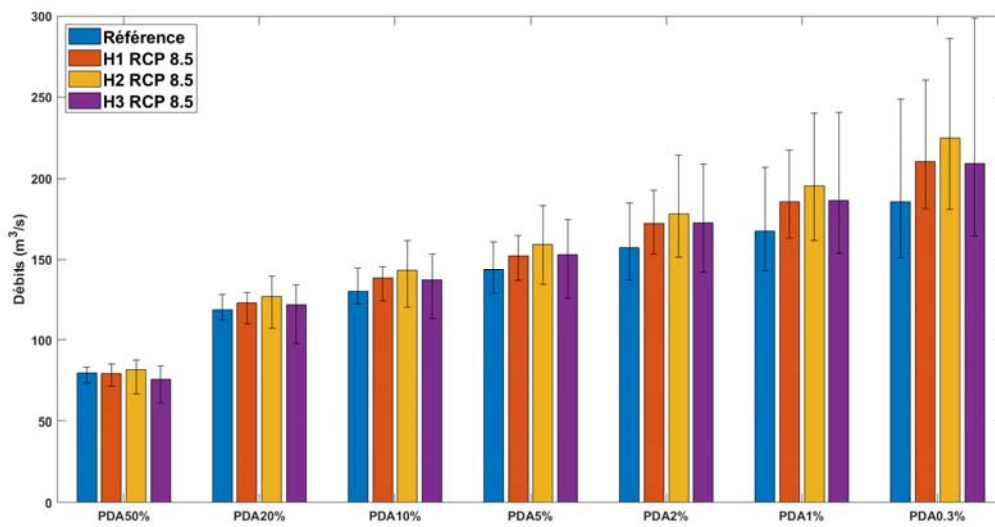
5. Résultats

5.1 Impact des changements climatiques sur les zones inondées

Les PDA pour les 19 CORDEX sont calculées en incluant l'ensemble des distributions ayant une valeur-P de test supérieure à 0,7. Ensuite, la médiane, le 10^e percentile et le 90^e percentile sont calculés sur le 19 scénarios pour les 3 horizons (Figure 11). La PDA 50% présente des tendances différentes des autres PDA. Peu de variation sont observées entre les différents horizons futurs. Pour toutes les autres PDA, le modèle prédit une augmentation des débits pour les horizons 1 et 2, puis une diminution par rapport à ces deux horizons pour l'horizon 3, revenant à des débits similaires à la période de référence. Plus la PDA est faible, plus l'écart entre la période de référence et les horizons 1 et 2 est grand. Toutefois, l'écart 10^e-90^e percentile est aussi plus grand. Les écarts 10^e-90^e percentile sont similaires pour les 3 horizons et la période de référence pour une PDA donnée. Ils augmentent lorsque les PDA diminuent. Finalement, ils sont similaires entre les RCP 4.5 et RCP 8.5.



a)

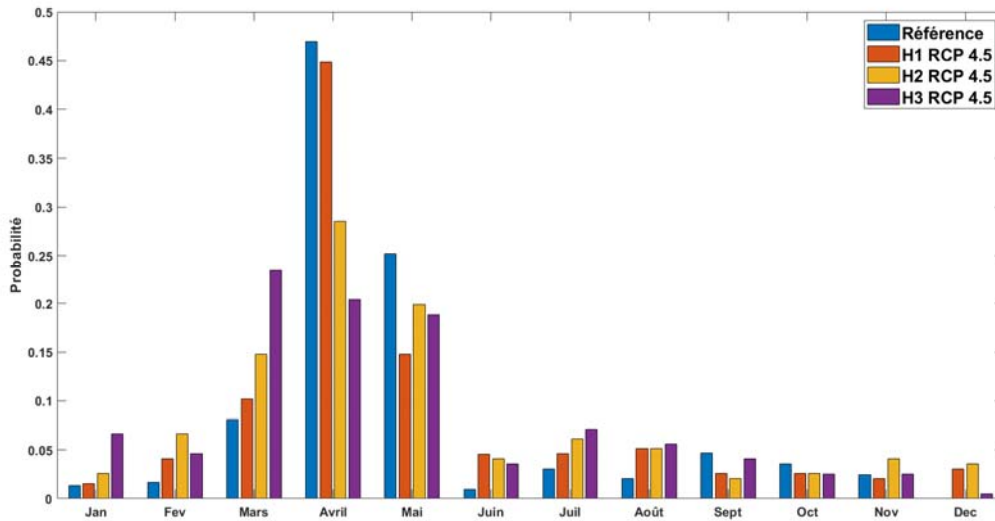


b)

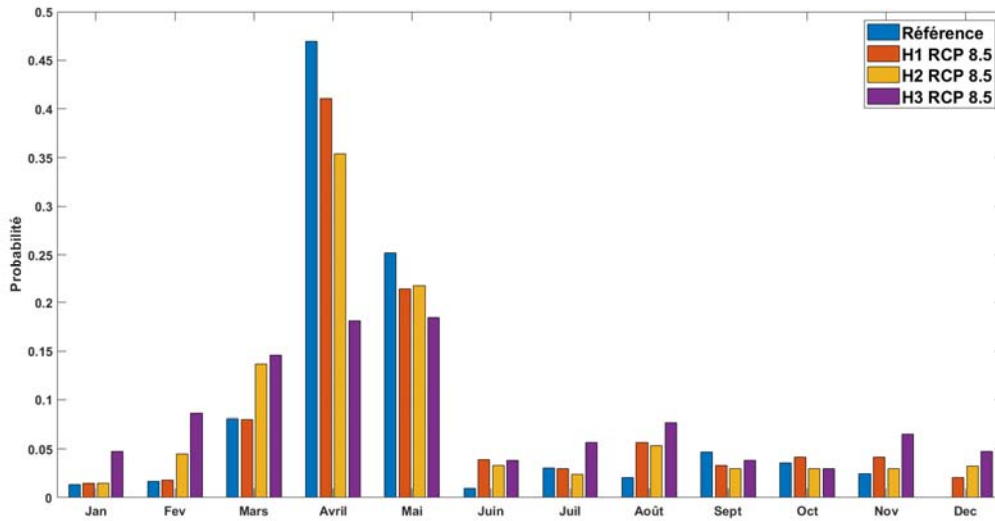
Figure 11– PDA pour les différents horizons pour a) RCP 4.5 et b) RCP 8.5. Les barres d’erreur représentent les 10^e et 90^e percentile de l’ensemble de PDA calculées

Pour les besoins de l’étude économique, les probabilités de dépassement sont calculées sur une base annuelle. En plus de cette information, l’analyse économique demande de connaître la probabilité que cet événement annuel se produise pour chacun des mois (Figure 12). Par exemple, une diminution des débits des PDA, mais son décalage dans le temps du printemps à l’été peut occasionner des pertes économiques plus importante.

Alors que plus de 80% des maximums se produisent en mars, avril et mai durant la période de référence, la probabilité diminue dans l'horizon 3 (60% pour RCP 4.5 et 51% pour RCP 8.5). Inversement, 6 % des maximums se produisent en juin, juillet, août durant la période de référence. Cette probabilité fait plus que doubler dans l'horizon 3 (16% pour RCP 4.5 et 17% pour RCP 8.5).



a)

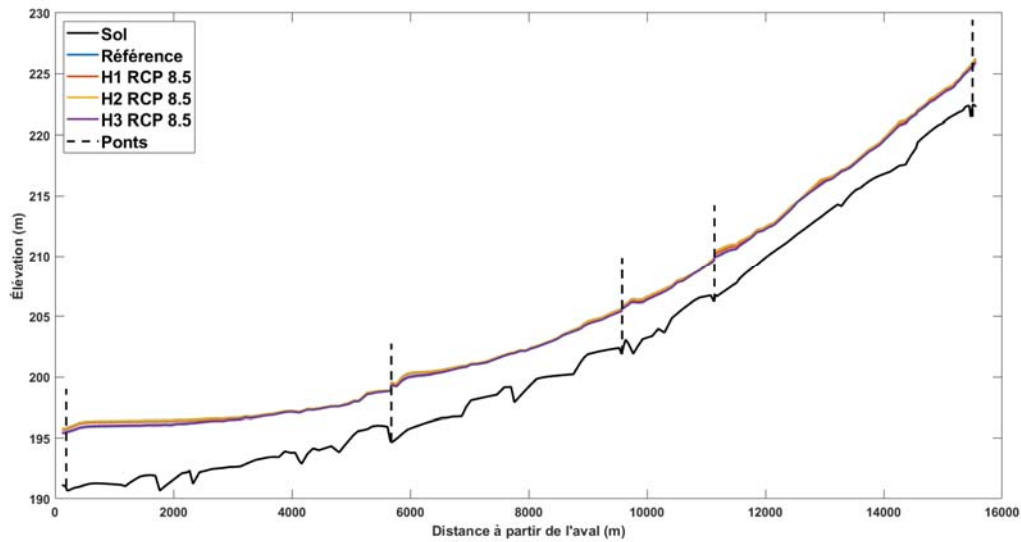


b)

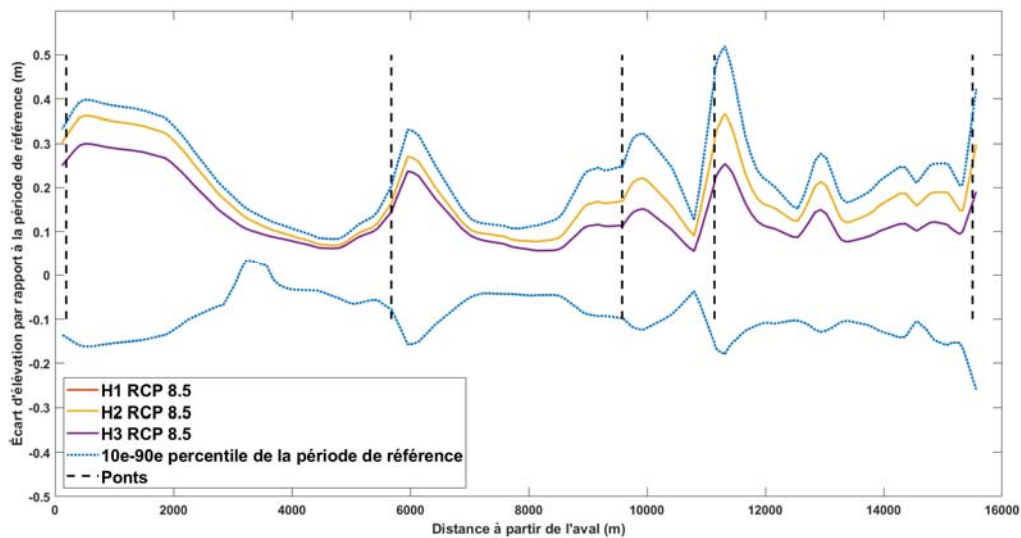
Figure 12– Probabilité d’occurrence du maximum selon les mois a) RCP 4.5 et b) RCP 8.5

À partir des PDA calculées et du modèles HEC-RAS, il est d’abord possible d’étudier les niveaux d’eau et les superficies inondées sans stratégies d’adaptation en climat de référence et en climat futur selon les trois horizons.

Les niveaux d'eau simulés (Figure 13) suivent les mêmes tendances que les PDA, soit une augmentation pour le horizons 1 et 2, puis une diminution à l'horizon 3 pour un retour similaire aux niveaux de références. Comme dans le cas des PDA l'écart 10^e percentile-90^e percentile en période de référence englobe les médianes de niveaux d'eau simulés pour les trois horizons.



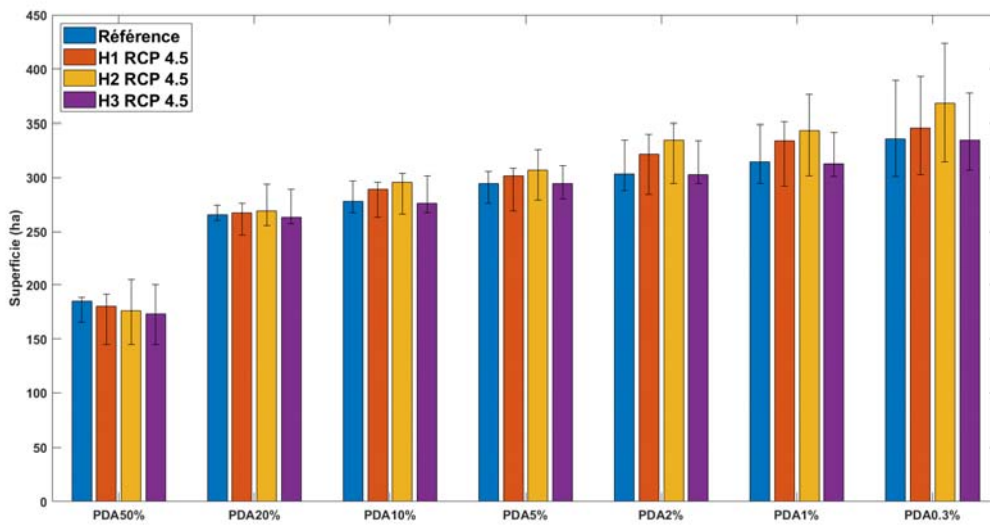
a)



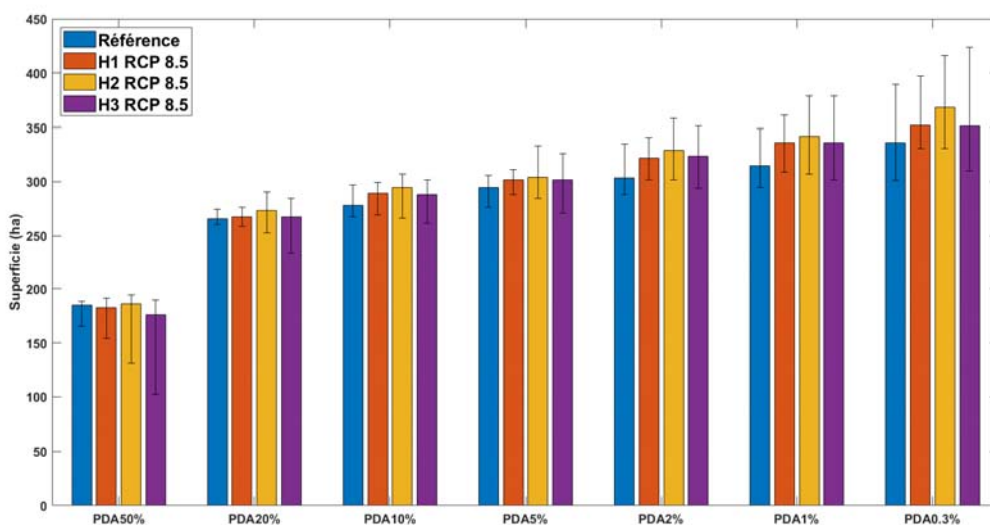
b)

Figure 13– Exemple de a) niveaux d'eau simulés et b) écart par rapport à la période de référence pour la PDA1% - RCP 8.5

La superficie de la plaine inondée est calculée en hectare (Figure 14). Elle est calculée à partir de la superficie totale inondée calculée par HEC-RAS moins la superficie de la rivière (jusqu'aux berges). Les tendances pour les médianes sont similaires aux tendances des PDA, c'est-à-dire une augmentation de superficie de la plaine inondée pour les horizons 2 et 3 pour les PDA inférieures à 50%. Toutefois, les écarts 10^e-90^e percentile ne suivent pas les mêmes tendances. Les écart 10^e-90^e percentile n'augmentent pas non plus pour le RCP 8.5 par rapport au RCP 4.5.



a)

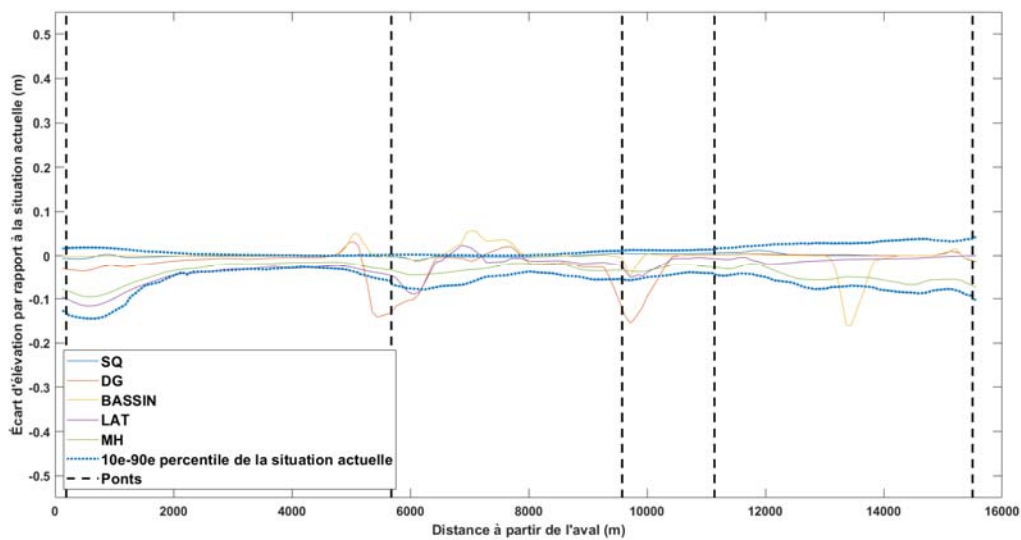


b)

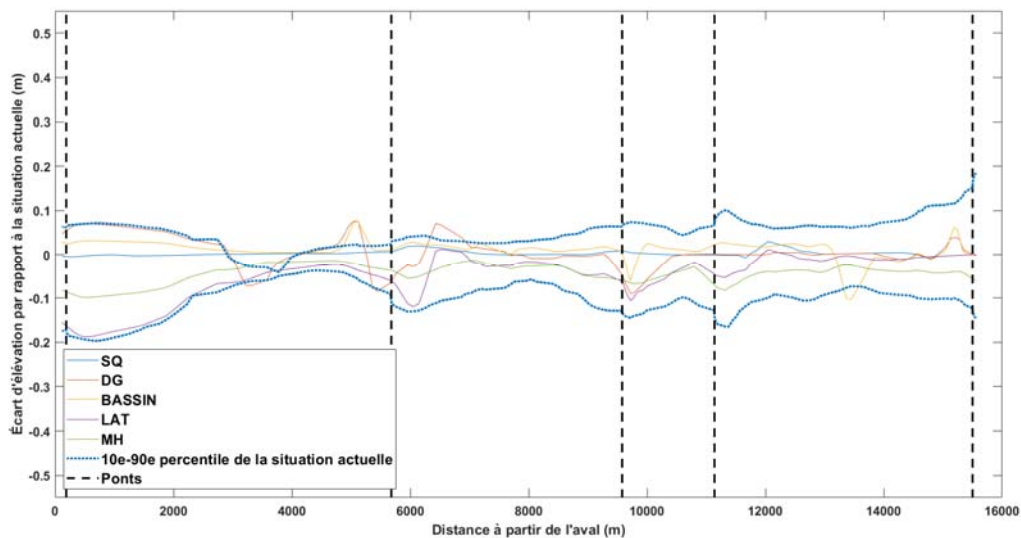
Figure 14– Superficie de la plaine inondable pour différentes PDA pour a) RCP 4.5 et b) RCP 8.5

5.2 Impact des stratégies d'adaptation sur les zones inondées

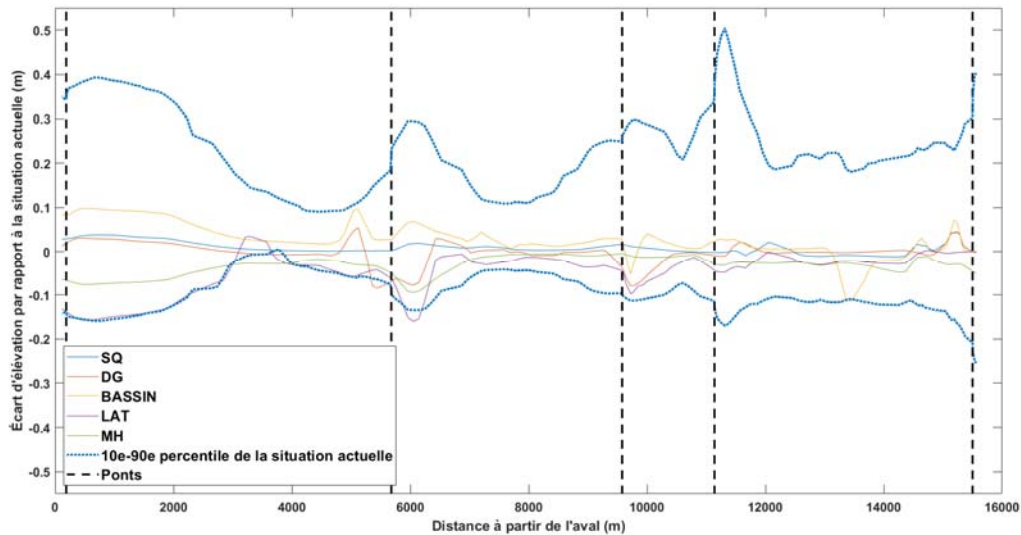
L'impact des stratégies d'adaptation est d'abord analysé en période de référence. L'impact des stratégies d'adaptation proposées sur les niveaux d'eau est inférieur à l'écart 10^e-90^e percentile lié à l'analyse fréquentielle pour toutes les PDA (Figure 15 présente les PDA 50%, 5% et 1%). Les stratégies STA-DG et STA-BASSIN ont un impact localisé à l'endroit des modifications dans le lit de la rivière. De plus, l'impact de ces deux scénarios est plus important pour une PDA de 50% que pour des PDA de 5% ou 1%. Les impacts et l'écart 10^e-90^e percentile sont plus importants dans la section aval du secteur où la pente est plus faible. Pour ce secteur, les stratégies impliquant une réduction des débits (STA-LAT et STA-MH) donnent une plus grande réduction des niveaux d'eau que ceux impliquant une modification au lit de la rivière qui peuvent même causer une augmentation des niveaux d'eau.



a)



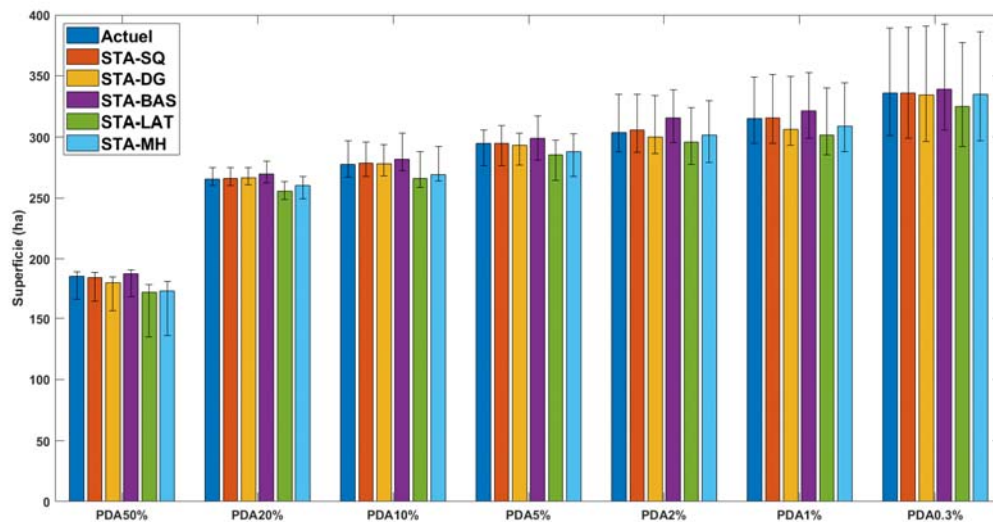
b)



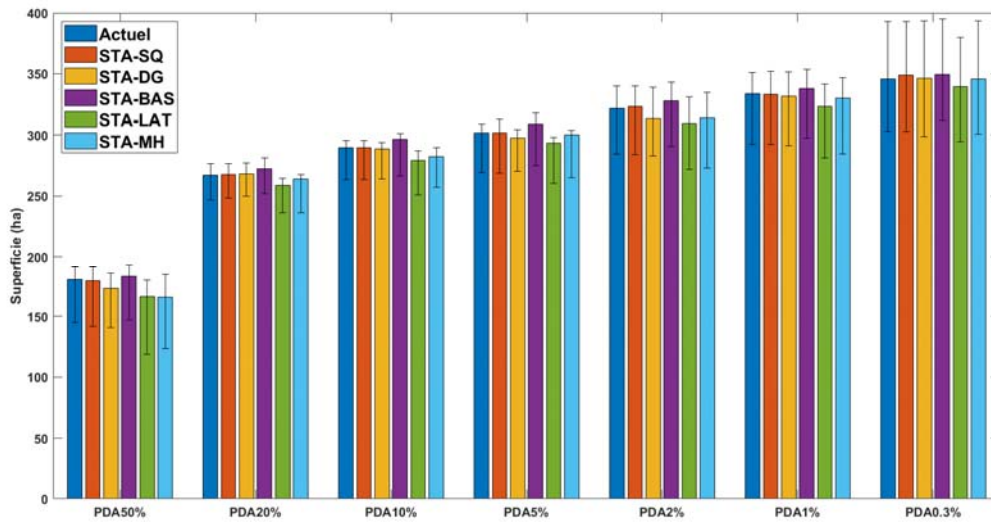
c)

Figure 15– Écart de niveau d’eau par rapport à la situation actuelle pour a) une PDA de 50%, b) une PDA de 5% et c) une PDA de 1%.

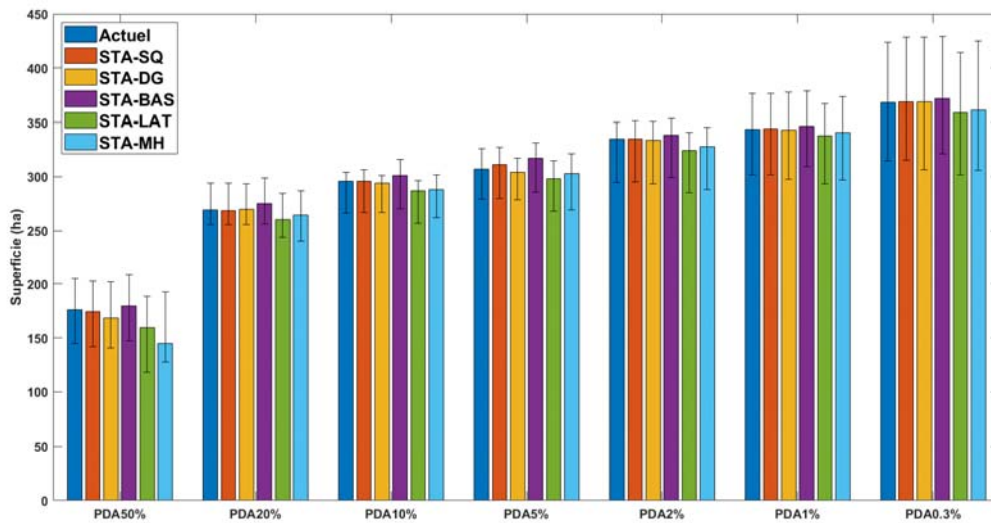
Les superficies inondées permettent de comparer les différentes stratégies pour les différents horizons (Figure 16). On remarque par exemple que la stratégie STA-DG diminue les superficies inondées en période de référence et à l’horizon 3 pour une PDA 1%, mais que ce n’est pas le cas pour les horizons 1 et 2. Les autres stratégies d’adaptation ont un impact similaire sur les superficies inondées peu importe l’horizon.



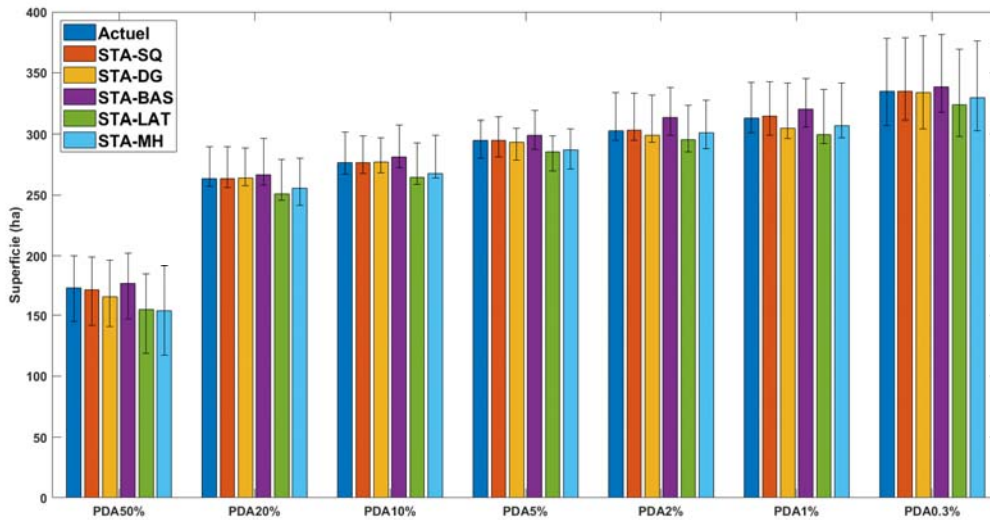
a)



b)



c)



d)

Figure 16– Superficie de la plaine inondable pour différentes PDA et stratégies pour) la période de référence, b) l’horizon 1, c) l’horizon 2 et d) l’horizon 3

6. Analyse et discussion

6.1 Scénarios climatiques

La base de données CORDEX sont constitués de 19 projections. Cinq modèles de circulation générale sont utilisés et 5 modèles régionaux du climat (il n’y a pas toutes les combinaisons possibles). En comparaison, la base de données CMIP5 comprends 29 modèles de circulation générale différents. Il est donc possible que la base CODEX ne représente pas toute la variabilité possible due aux modèles de climat. Ainsi, une comparaison entre les deltas de températures et de précipitations (Horizon-Référence) a été faite entre ces deux bases de données. Le calcul a été fait en utilisant la moyenne calculée sur les points de grille CORDEX le secteur d’étude et le point de grille CMIP5 couvrant le secteur d’étude. Ainsi, la résolution spatiale n’est pas la même. La Figure 17 montre cette comparaison pour les différents horizons et pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. La boîte représente les 10^e et le 90^e percentiles.

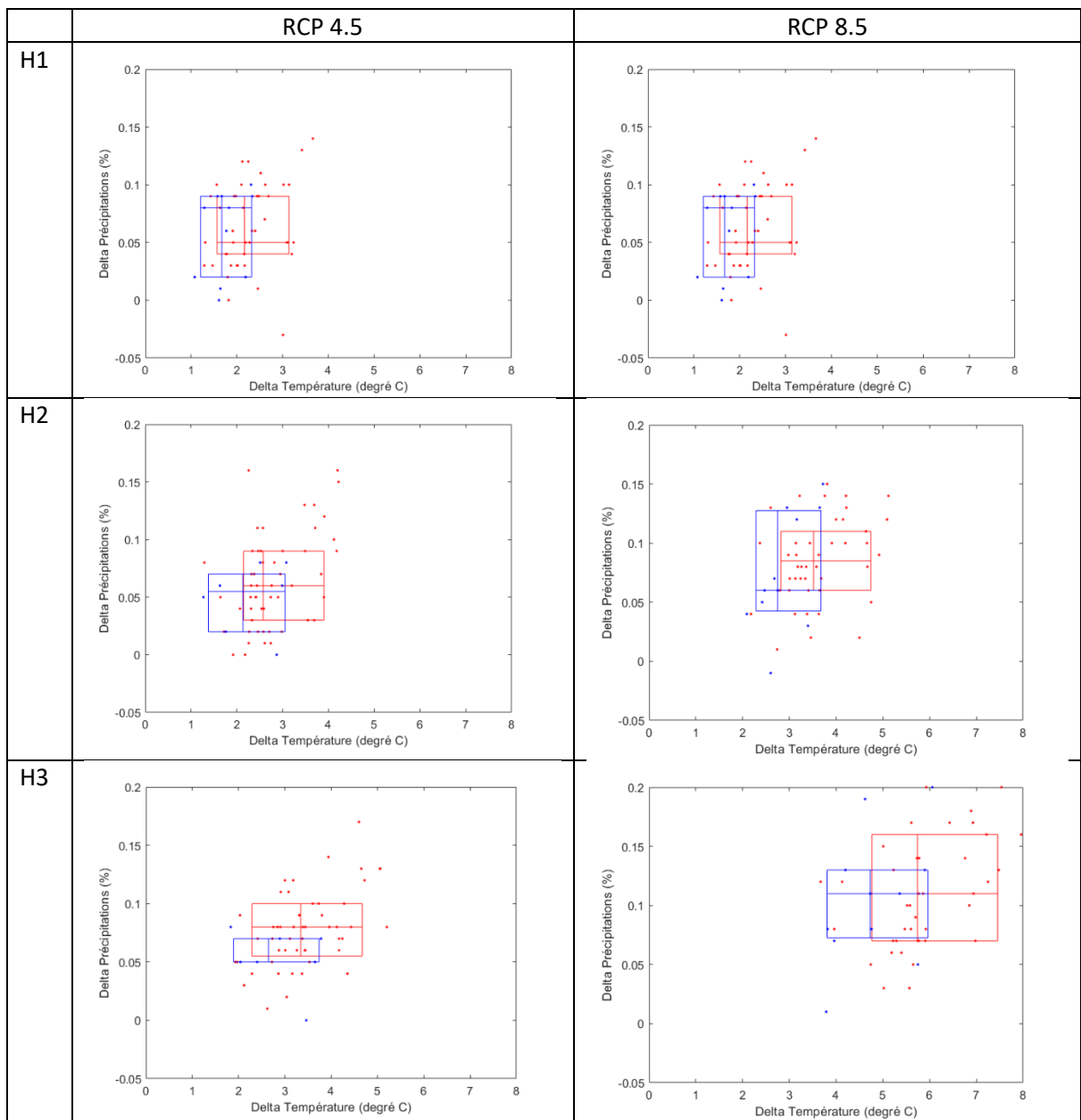


Figure 17– Comparaison CMIP5 et CORDEX

Pour l’horizon 1, 70 % des données CMIP5 se retrouvent dans les limites maximales et minimales de précipitations et températures pour le RCP 4.5 et 54 % pour le RCP 8.5. Les pourcentages sont de 69 %, 56 %, 65 % et 58 % respectivement pour l’horizon 2 – RCP4.5, l’horizon 2 – RCP 8.5, l’horizon 3 – RCP 4.5 et l’horizon 3 – RCP 8.5. Ainsi, on peut constater une sous-représentation de la variabilité liée aux modèles climatiques. Plus particulièrement, on remarque des deltas de températures plus élevés simulés avec la base de données CMIP5. Il faut toutefois tenir compte de la grille plus grossière de CMIP5 comparativement à CORDEX (Figure 18).

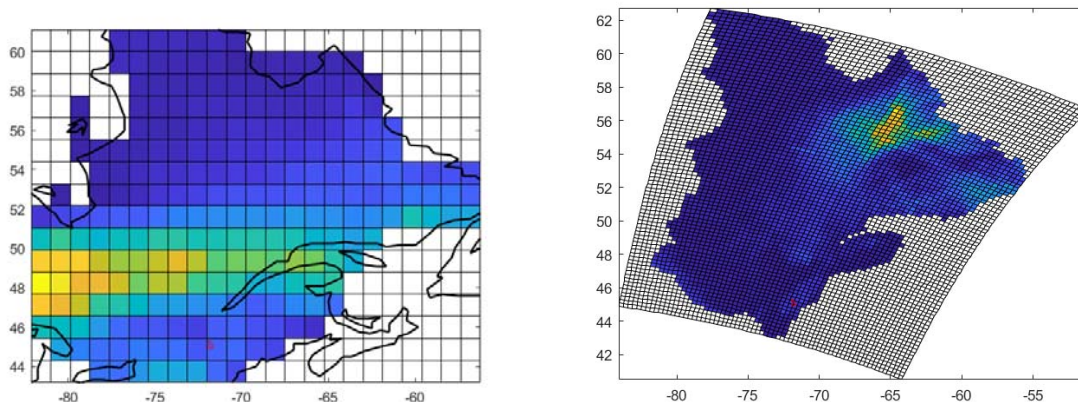


Figure 18– Exemple de grilles provenant des bases de données a) CMIP5 et b) CORDEX

7. Conclusion et recommandations

L'objectif de cette étude est d'évaluer les impacts de différentes stratégies d'adaptation en contexte de changements climatiques sur les zones inondables d'un secteur agricole de la rivière Coaticook, près de Compton au Québec. Ainsi, une combinaison d'approches ascendante et descendante a été appliquée. Une modélisation hydrologique et hydraulique a été réalisée à partir de scénarios climatiques pour l'approche descendante. Les différentes stratégies d'adaptation ont été élaborées avec les parties prenantes (agriculteurs, MRC, ROBVO, Ouranos) pour l'approche ascendante. Les stratégies identifiées ont ensuite été modélisées afin d'évaluer leur impact en condition actuelle et en conditions futures.

L'ensemble de données CORDEX a été utilisé pour représenter 19 projections climatiques (7 en RCP 4.5 et 12 en RCP 8.5) pour trois horizons (H1 : 2021-2050, H2 : 2041-2070, H3 : 2071-2100). Une modélisation SWAT a permis de simuler les débits chronologiques et de calculer les maximums annuels. Une analyse fréquentielle par horizon a ensuite été faite afin de déterminer les probabilités de dépassement annuel (PDA) 50%, 20%, 10%, 5%, 2%, 1% et 0,3%. Lors de l'analyse fréquentielle (AF), neuf distributions statistiques ont été testées. Le choix de la distribution peut avoir un effet important sur le calcul des PDA et il n'est pas souhaitable de changer de distribution entre les horizons. Ainsi, l'ensemble des distributions présentant une valeur $p > 0,7$ avec un test d'Anderson-Darling ont été conservées afin de tenir compte de l'incertitude sur le choix de la distribution dans l'AF. Par la suite, l'écart 10^e et 90^e percentile calculé sur l'ensemble des projections CORDEX et de ces distributions est analysé. Ainsi, les résultats prennent en considération l'incertitude provenant des modèles climatiques, de même que l'incertitude provenant du choix de la distribution statistique de l'AF. Toutefois, ils ne prennent pas en considération l'incertitude provenant de la modélisation hydrologique (paramètres du modèle) et des autres incertitudes liées à l'AF (longueur de la série de données par exemple). Ces éléments pourraient être inclus dans une étude future.

Les résultats des PDA montrent une augmentation du débit pour une PDA donnée aux horizons 1 et 2, mais une diminution à l'horizon 3. La diminution du couvert de neige à l'horizon 3 laisse présager une

diminution des débits au printemps et donc des inondations printanières. En plus du maximum de débits, le moment où se produit ce maximum peut avoir un impact important sur les pertes économiques, particulièrement en milieux agricole. L'analyse du mois où se produit le maximum a révélé un décalage du maximum. Alors que 80 % des maximums se produisent en mars-avril-mai dans la période de référence, la probabilité diminue dans l'horizon 3 (60% pour RCP 4.5 et 51% pour RCP 8.5). Inversement, 6 % des maximums se produisent en juin-juillet-août durant la période de référence. Cette probabilité fait plus que doubler dans l'horizon 3 (16% pour RCP 4.5 et 17% pour RCP 8.5). Cette observation appuie l'hypothèse d'une diminution du couvert de neige et ainsi un changement de régime dans les inondations. Afin d'étudier plus en profondeur le changement de régime hydrologique, il est recommandé de poursuivre les recherches avec l'ensemble de données CLIMEX qui permettra de mieux représenter les extrêmes en dehors de la période printanière.

Les résultats de l'AF sont ensuite utilisés comme intrant au modèle hydraulique. Un modèle hydraulique combiné 1D/2D a été mis en œuvre (1D dans la rivière et 2D sur la plaine). Le paramètre de rugosité du modèle a été ajusté à l'aide d'observations (débits/niveaux) présent à trois débits différents lors de trois événements différents. Les niveaux d'eau simulés montrent les mêmes tendances que les PDA, c'est-à-dire une augmentation pour les horizons 1 et 2, puis un retour vers les niveaux de référence à l'horizon 3. L'augmentation de niveau d'eau est plus importante à proximité des ponts de même qu'en aval du secteur où la pente est plus faible. L'écart 10^e-90^e percentile de la période de référence englobe les variations observées.

Deux stratégies d'adaptation modifiant le lit de la rivière (Dragage et bassin de rétention) ont été simulées, de même que deux stratégies d'adaptation modifiant les apports (apports latéraux et milieux humides en amont). Les stratégies de dragage et de bassin de rétention ont un impact localisé à l'endroit des modifications dans le lit de la rivière. De plus, l'impact de ces deux scénarios est plus important pour une PDA de 50% que pour des PDA de 5% ou 1%. La stratégie de dragage diminue les superficies inondées en période de référence et à l'horizon 3 pour une PDA 1%, alors que ce n'est pas le cas pour les horizons 1 et 2 où peu de changement sont observés. Les autres stratégies d'adaptation ont un impact similaire sur les superficies inondées peu importe l'horizon. Ainsi, l'impact des stratégies d'adaptation semble similaire pour la période de référence qu'en climat futur. Toutefois, les variations observées sont faibles par rapport à l'écart 10^e-90^e. Il est ainsi difficile de conclure à un impact significatif des stratégies d'adaptation. Ainsi, il est recommandé de cibler une réduction de la vulnérabilité plutôt qu'une réduction de l'aléas afin de réduire le risque.

8. Références

Adger, W. N., Arnell, N. W., et Tompkins, E. L. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. *Global environmental change*, 15(2), 77-86.

Alfieri, L., Feyen, L., et Di Baldassarre, G. (2016). Increasing flood risk under climate change: a pan-European assessment of the benefits of four adaptation strategies. *Climatic Change*, 136(3-4), 507-521.

- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., et Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Batchabani, E., Sormain, E., et Fuamba, M. (2016). Potential impacts of projected climate change on flooding in the Riviere des Prairies basin, Quebec, Canada: One-dimensional and two-dimensional simulation-based approach. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(12), 05016032.
- Brunner, G.W. (2016) HEC-RAS River Analysis System User's Manual; Version 5.0. Davis, CA : U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.
- Centre d'expertise Hydrique du Québec (CEHQ), 2008, Programme de détermination des cotes de crues de récurrence de 20 ans et de 100 ans (PDCC), Rivière Coaticook, 40 p
- Chen, J., Brissette, F. P., Poulin, A., et Leconte, R. (2011). Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed. *Water Resources Research*, 47(12).
- Demers S., Massé S., et Buffin-Bélanger T. (2017) Cartographie des aléas fluviaux de la rivière Coaticook : diagnostic, méthodologie et recommandations. Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis à la MRC de Coaticook et au Ministère de la Sécurité publique du Québec.
- Dessai, S., et Hulme, M. (2004). Does climate adaptation policy need probabilities?. *Climate policy*, 4(2), 107-128.
- Di Baldassarre, G., Laio, F., et Montanari, A. (2009). Design flood estimation using model selection criteria. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(10-12), 606-611.
- Direction de l'expertise hydrique (2018) Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 34 p
- Coles, S. (2001). An introduction to statistical modeling of extreme values. London, England: Springer.
- Giorgi, F., et W. J. Gutowski, (2015) Regional dynamical downscaling and the CORDEX Initiative. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 40, 467–490, <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217>.
- Girard, C., Pulido-Velazquez, M., Rinaudo, J. D., Pagé, C., et Caballero, Y. (2015). Integrating top-down and bottom-up approaches to design global change adaptation at the river basin scale. *Global Environmental Change*, 34, 132-146.
- Hayhoe, K, Edmonds, J, Kopp, RE, et al. (2017) Climate models, scenarios, and projections. In: Wuebbles, DJ, Fahey, DW, Hibbard, KA, et al. (eds) *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment*. Washington, DC, USA: U.S. Global Change Research Program, 133–160. DOI: 10.7930/J0WH2N54.
- Hooijer, A., Klijn, F., Pedroli, G. B. M., et Van Os, A. G. (2004). Towards sustainable flood risk management in the Rhine and Meuse river basins: synopsis of the findings of IRMA-SPONGE. *River research and applications*, 20(3), 343-357.
- Laforce, S., Simard, M. C., Leconte, R., et Brissette, F. (2011). Climate Change and Floodplain Delineation in Two Southern Quebec River Basins 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 47(4), 785-799.

Laio, F., Di Baldassarre, G., et Montanari, A. (2009). Model selection techniques for the frequency analysis of hydrological extremes. *Water Resources Research*, 45(7).

Lawrence, D. (2020). Uncertainty introduced by flood frequency analysis in projections for changes in flood magnitudes under a future climate in Norway. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, 100675.

Rahman, A. S., Rahman, A., Zaman, M. A., Haddad, K., Ahsan, A., et Imteaz, M. (2013). A study on selection of probability distributions for at-site flood frequency analysis in Australia. *Natural hazards*, 69(3), 1803-1813.

Schanze, J., Zeman, E., et Marsalek, J. (Eds.). (2007). *Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures* (Vol. 67). Springer Science & Business Media.

Zhang, Z., Stadnyk, T. A., et Burn, D. H. (2020). Identification of a preferred statistical distribution for at-site flood frequency analysis in Canada. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, 45(1), 43-58.

Annexes

Probabilités de dépassement annuel

Tableau 7 – Résultats des probabilités de dépassement annuel (PDA) en utilisant la meilleure distribution

Référence	PDA 50% (m ³ /s)	PDA 20% (m ³ /s)	PDA 10% (m ³ /s)	PDA 5% (m ³ /s)	PDA 2% (m ³ /s)	PDA 1% (m ³ /s)	PDA 0.3% (m ³ /s)
Référence							
Médiane	79.38	96.62	105.77	115.85	132.61	143.20	161.73
10 percentile	72.64	89.93	100.28	108.61	116.37	120.24	125.99
90 percentile	83.22	103.17	117.71	130.51	150.44	176.27	214.66
H1 – RCP 4.5							
Médiane	78.06	99.11	112.27	124.46	139.76	150.99	172.36
10 percentile	71.02	86.21	96.14	106.07	119.89	131.15	148.53
90 percentile	84.08	103.68	116.47	129.10	147.56	164.90	201.66
H1 – RCP 8.5							
Médiane	79.48	100.39	113.32	124.70	143.38	157.22	180.83
10 percentile	71.86	89.55	103.80	114.94	129.31	141.05	153.62
90 percentile	84.43	107.19	127.32	149.07	182.64	213.31	281.65
H2 – RCP 4.5							
Médiane	73.04	97.79	116.70	131.83	150.37	162.13	194.04
10 percentile	69.42	88.31	100.32	112.62	130.18	143.60	160.38
90 percentile	86.27	107.93	122.41	139.85	168.24	195.20	253.23
H2 – RCP 8.5							
Médiane	80.85	100.95	114.15	130.32	151.55	165.93	197.86
10 percentile	66.71	86.07	102.41	112.90	126.28	135.94	153.31
90 percentile	85.43	111.00	131.17	151.45	177.53	199.77	251.25
H3 – RCP 4.5							
Médiane	74.88	91.83	104.07	114.05	124.71	133.87	155.16
10 percentile	69.26	88.82	98.42	107.17	118.58	126.93	137.43
90 percentile	82.29	105.08	117.74	128.50	143.21	155.48	177.32
H3 – RCP 8.5							
Médiane	74.11	98.46	112.68	126.30	141.84	154.40	172.68
10 percentile	61.93	81.80	94.73	107.19	123.56	136.05	158.74
90 percentile	84.08	108.38	122.85	137.63	170.11	202.23	269.05

Tableau 8 – Résultats des probabilités de dépassement annuel (PDA) en utilisant toutes les distributions ayant un p_value > 0.7

Référence	PDA 50% (m ³ /s)	PDA 20% (m ³ /s)	PDA 10% (m ³ /s)	PDA 5% (m ³ /s)	PDA 2% (m ³ /s)	PDA 1% (m ³ /s)	PDA 0.3% (m ³ /s)
Référence							
Médiane	79.50	96.40	105.64	116.52	128.06	136.37	151.20
10 percentile	73.15	91.13	99.34	104.61	111.30	115.91	122.85
90 percentile	83.26	104.03	117.90	130.91	150.29	168.41	202.16
H1 – RCP 4.5							
Médiane	78.46	99.16	112.14	124.46	139.55	149.60	166.64
10 percentile	69.81	85.29	93.86	101.06	108.78	113.98	125.93
90 percentile	85.25	104.62	117.03	132.53	155.27	169.84	206.08
H1 – RCP 8.5							
Médiane	79.41	99.83	112.51	123.93	140.10	151.20	171.30
10 percentile	71.43	89.43	100.87	111.03	124.91	132.79	147.47
90 percentile	85.10	105.02	118.57	134.13	156.86	177.02	211.62
H2 – RCP 4.5							
Médiane	75.73	100.71	116.83	131.63	150.37	162.78	182.89
10 percentile	69.91	87.68	97.66	106.16	116.65	124.08	136.74
90 percentile	91.34	115.19	129.29	141.87	169.24	191.84	242.70
H2 – RCP 8.5							
Médiane	81.42	103.12	116.04	129.56	144.95	159.04	182.88
10 percentile	66.56	87.26	97.65	109.01	123.18	131.60	147.34
90 percentile	87.42	113.18	131.61	149.00	174.53	195.01	232.55
H3 – RCP 4.5							
Médiane	75.38	93.90	104.72	115.88	127.19	134.57	150.10
10 percentile	69.76	88.89	99.02	107.45	116.32	122.63	131.86
90 percentile	89.26	111.97	123.50	134.07	149.86	160.47	194.66
H3 – RCP 8.5							
Médiane	75.87	99.02	111.46	124.61	140.61	151.54	170.17
10 percentile	61.17	79.42	91.95	102.23	115.29	125.02	133.65
90 percentile	83.94	108.78	124.96	141.97	169.88	195.49	242.76

Tableau 9 – Résultats des probabilités de dépassement annuel (PDA) après ajout des milieux humides en utilisant toutes les distributions ayant un p_value > 0.7

Référence	PDA 50% (m ³ /s)	PDA 20% (m ³ /s)	PDA 10% (m ³ /s)	PDA 5% (m ³ /s)	PDA 2% (m ³ /s)	PDA 1% (m ³ /s)	PDA 0.3% (m ³ /s)
Référence							
Médiane	74.63	90.85	100.63	111.59	123.72	132.64	150.11
10 percentile	68.21	86.38	94.30	99.87	106.54	110.98	117.61
90 percentile	78.45	99.81	113.69	126.37	145.46	163.55	199.66
H1 – RCP 4.5							
Médiane	73.49	94.35	107.85	120.22	135.52	146.16	165.48
10 percentile	64.83	80.13	88.68	95.75	103.60	109.19	120.69
90 percentile	80.36	100.14	113.02	128.03	150.92	167.49	204.55
H1 – RCP 8.5							
Médiane	74.21	94.62	107.27	118.42	132.29	145.06	166.16
10 percentile	66.88	84.68	96.20	106.37	119.01	127.28	138.21
90 percentile	79.12	98.32	111.86	125.26	146.70	166.81	204.25
H2 – RCP 4.5							
Médiane	70.31	95.97	111.66	126.01	144.24	156.26	176.87
10 percentile	65.71	82.62	92.45	100.92	111.15	118.25	130.65
90 percentile	86.45	110.78	125.21	139.09	165.81	188.97	239.23
H2 – RCP 8.5							
Médiane	76.66	98.87	111.97	124.94	140.64	154.68	175.91
10 percentile	61.96	82.36	92.43	103.47	116.06	125.29	141.67
90 percentile	82.56	108.60	127.93	144.00	169.09	192.73	231.32
H3 – RCP 4.5							
Médiane	70.53	88.14	99.86	110.44	122.52	131.39	145.16
10 percentile	64.40	84.13	94.08	102.80	111.74	117.73	126.32
90 percentile	85.20	107.58	118.50	128.93	144.21	159.27	192.08
H3 – RCP 8.5							
Médiane	71.10	94.25	107.57	119.98	136.84	150.56	168.80
10 percentile	56.57	74.91	87.59	97.77	110.26	120.61	128.96
90 percentile	79.19	103.60	119.86	137.48	165.95	193.76	238.04