

Vulnérabilité des sources d'approvisionnement en eau potable du territoire de la CMQ face aux changements climatiques

Rapport

Dernière révision : Mars 2020

Fonds vert Québec

Communauté métropolitaine de Québec

OURANOS

Vulnérabilité des sources d'approvisionnement en eau potable du territoire de la CMQ face aux changements climatiques

Rapport
Dernière révision : Mars 2020

ÉQUIPE DE RÉALISATION :
Laurent Da Silva, Ouranos
Katherine Pineault, Ouranos
Gabriel Rondeau-Genesse, Ouranos

Titre de projet Ouranos: Vulnérabilité des sources d'approvisionnement en eau potable du territoire de la CMQ face aux changements climatiques

Numéro du projet Ouranos: 510022

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs. Toute utilisation de cette publication et de son contenu n'engage pas Ouranos et ses partenaires.

REMERCIEMENTS

L'équipe de projet tient à remercier chaleureusement celles et ceux qui ont contribué au projet en fournissant des réponses, du savoir et de l'information. Souvent, vous nous avez ouvert la porte de vos organisations, de vos installations, de vos usines de production d'eau potable. Vous avez répondu patiemment et avec diligence à nos questions. Nous sommes très reconnaissants de l'ouverture de nos nombreux collaborateurs.

Merci aux différents intervenants des municipalités. De la Ville de Québec, merci à Manuel Parent, Jason-Faber Carpenter, David Duval, François Proulx, Christian Tremblay, Sébastien Desmeules et Valérie Tremblay. De la Ville de Lévis, merci à Isabelle Linteau, Jean-Claude Belles-Iles et Yves Chouinard. De la Ville de Beaupré, merci à Jean-Michel Larin et Frédéric Ruel. De la Ville de Château-Richer, merci à Pierre St-Hilaire, Steeve Harbour, Rock Cloutier. De la Ville de Boischatel, merci à Pierre-Alexandre Côté et Stéphane Dompierre. Merci également à Jean-François Guillot de la MRC de la Côte-de-Beaupré.

Merci aux intervenants des OBV qui ont généreusement contribué grâce à leurs connaissances étendues des bassins versants concernés. Merci à Jean Landry et Payse Mailhot de l'OBV Charlevoix-Montmorency, à Caroline Brodeur et son équipe de l'OBV de la Capitale, à Véronique Brochu et Françoise Auger du Comité de bassin versant de la rivière Chaudière (COBARIC) et à Claude Sauvé et Antoine Bourke de la Corporation du bassin de la Jacques-Cartier (CBJC).

Merci à nos collaborateurs de la Direction de l'expertise hydrique du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC): Simon Ricard, Charles Malenfant et Philippe Noël, ainsi qu'à l'ensemble de l'équipe de production de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional.

Finalement, un immense merci à l'équipe de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) qui nous a offert l'immense privilège de nous offrir leur territoire comme objet d'étude. Notamment, à Alexandre Bélanger qui fut un atout et facilitateur de premier plan dans la logistique du projet. Un remerciement spécial à François Morneau qui travaille d'arrache-pied depuis des années à repenser notre vision du développement dans le contexte des changements climatiques et qui est maintenant lui aussi un ardent défenseur de l'analyse économique comme un puissant outil de démonstration des bénéfices de s'adapter à l'immense défi qui s'annonce.

SOMMAIRE EXÉCUTIF

CONTEXTE

Au Québec, 70 % de la population s'approvisionnent à partir des eaux de surfaces (rivières, lacs et fleuve Saint-Laurent). Même si ces sources d'approvisionnement abondent sur le territoire québécois, cette eau n'est pas répartie également sur le territoire et au courant de l'année. Les étés particulièrement chauds et secs peuvent causer des étiages sévères qui menacent la capacité de certaines municipalités à approvisionner leur population au moment même où la demande en eau potable est la plus forte. Les étés de 2002 et 2010 dans la région de Québec sont des exemples probants de l'impact potentiel des baisses des débits en rivière et de la vulnérabilité des systèmes d'approvisionnement en eau potable. Même si la baisse marquée des débits dans les rivières de la grande région métropolitaine de Québec, et en particulier dans la rivière Saint-Charles, n'a finalement pas causé de pénurie d'eau, celle-ci a soulevé de nombreuses questions sur la planification stratégique à long terme des ressources en eau pour cette région.

Dans le cadre du Plan d'action sur la protection des sources d'eau potable, la CMQ a mandaté au printemps 2016 le consortium Ouranos afin de documenter l'impact des changements climatiques (CC) sur la disponibilité en eau potable pour les prochaines décennies au moyen d'une revue de la littérature existante. Les conclusions de cette première analyse ont démontré qu'à l'horizon 2050, l'évolution de la disponibilité de la ressource en eau lors de certaines périodes critiques pourrait complexifier les processus d'approvisionnement en eau potable à la Ville de Québec (Ouranos, 2016).

OBJECTIFS

À partir des conclusions de cette revue des connaissances, la présente étude vise à évaluer de façon concrète la vulnérabilité des systèmes d'approvisionnement en eau potable des villes du territoire de la CMQ qui s'alimentent à partir d'eaux de surface. Le projet permet d'évaluer les risques relatifs à l'approvisionnement en eau potable découlant de la modification des dynamiques hydrologiques des rivières en contexte de changements climatiques.

Une approche économique est utilisée pour l'analyse : elle permet à la fois de modéliser l'évolution de la demande en eau pour la comparer à l'évolution de la disponibilité en rivière au cours des trois prochaines décennies. Pour ce faire, cinq études de cas sont analysées, soit les villes de Québec, de Lévis, de Boischatel, de Château-Richer et de Beaupré.

Cette analyse permet de valider les conclusions tirées de la première étude, grâce à l'utilisation de scénarios hydroclimatiques produits dans le cadre de l'édition 2018 de l'Atlas hydroclimatique du Québec

méridional, qui couvre désormais les trente prochaines années. De plus, l'étude projette également l'évolution des besoins en eau potable pour les municipalités étudiées permettant de croiser la disponibilité (offre) et l'évolution dans la consommation (demande).

MÉTHODOLOGIE

La présente analyse comporte trois principales étapes. D'abord, les changements climatiques sont intégrés dans l'analyse et la projection des débits en rivière. Pour ce faire, l'analyse statistique de séries hydroclimatiques est réalisée pour les rivières pour lesquelles ces données sont disponibles. Cette étape permet de projeter les débits en rivière sur une base quotidienne sur l'horizon d'étude.

À la deuxième étape, l'évolution du climat est intégrée dans l'analyse et la projection de la quantité nécessaire d'eau potable pour répondre aux besoins de la population. Des analyses statistiques des consommations historiques permettent d'établir la sensibilité des besoins en eau potable aux conditions climatiques et d'extrapoler cette sensibilité dans le futur. La croissance de la population, combinée à d'autres facteurs qui font varier la consommation en plus des changements climatiques, permet de projeter les besoins futurs sur l'horizon d'étude, encore une fois sur une base quotidienne.

Enfin, les débits en rivières et la quantité d'eau nécessaire sont comparés pour identifier les vulnérabilités, selon plusieurs critères intégrant entre autres la capacité des infrastructures en place ainsi que les débits écologiques en rivière. L'identification des vulnérabilités permet de déterminer s'il est pertinent d'envisager des méthodes d'adaptation aux changements climatiques pour les municipalités à l'étude.

Il convient de préciser que l'étude ne considère pas les enjeux de qualité de l'eau, ni les sources d'eaux souterraines et porte seulement sur la période estivale.

FAITS SAILLANTS

Les résultats de l'étude suggèrent que la vulnérabilité n'est pas également répartie sur le territoire de la CMQ. En effet, les municipalités de la Côte-de-Beaupré, selon les données disponibles, sont peu ou pas vulnérables à des problèmes d'approvisionnement liés à des étiages sévères dans les cours d'eau, avec des probabilités très faibles de pénurie aujourd'hui ou dans le futur. Les vulnérabilités identifiées pour les villes de Québec et de Lévis sont plus importantes. En effet, malgré la mise en service d'interconnexion de grande capacité à Québec, le risque de pénurie tend à augmenter à Québec en raison de l'aggravation des conditions d'étiages estivaux et de l'accroissement des besoins en eau sur le territoire.

Pour la Ville de Lévis, les résultats indiquent un risque de pénurie relativement limité en lien avec l'évolution de l'hydrologie de la rivière Chaudière et des besoins en eau. Toutefois, l'incertitude entourant l'évolution du front salin et l'absence d'interconnexion entre les réseaux permettant de combler des déficits de

production lors des pointes de consommation estivale mérite que la Ville poursuive ses efforts pour réduire la vulnérabilité de leur système, indépendamment de l’évolution de la disponibilité de l’eau en rivière.

TABLE DES MATIÈRES

1. MISE EN CONTEXTE 1

1.1 Description de la problématique 1

1.2 Objectifs du projet 3

1.3 Municipalités à l'étude 3

1.3.1 Beaupré 4

1.3.2 Château-Richer 8

1.3.3 Boischatel / L'Ange-Gardien 8

1.3.4 Lévis 10

1.3.5 Québec 10

2. MÉTHODOLOGIE 14

2.1 Analyse de la vulnérabilité 14

2.1.1 Scénarios climatiques 15

2.1.2 Scénarios hydrologiques 18

2.1.3 Scénarios de consommation d'eau potable 24

2.1.4 Projections démographiques et d'occupation du territoire 27

2.1.5 Autres paramètres de projection 30

2.1.6 Projection des risques de pénurie 31

3. ANALYSE DE LA VULNÉRABILITÉ DES RÉSEAUX D'APPROVISIONNEMENT EN EAU POTABLE 32

3.1 Projections hydroclimatiques 33

3.1.1 portrait général de l'évolution des rivières 33

3.1.2 Indicateurs de sévérité des étiages futurs sur la rivière Saint-Charles 36

3.2 Analyse de vulnérabilité pour la Ville de Beaupré 37

3.2.1 Projection de consommation 37

3.2.2 Analyse de la vulnérabilité 38

3.3. Analyse de vulnérabilité pour la Ville de Château-Richer 41

3.3.1 Projection de consommation 42

3.3.2 Analyse de la vulnérabilité 42

3.4. Analyse de vulnérabilité pour les municipalités de boischatel et l'ange-Gardien 44

3.4.1 Projection de consommation 44

3.4.2 Analyse de la vulnérabilité 45

3.5 Analyse de vulnérabilité pour la Ville de Lévis 50

3.5.1 Projection de consommation *50*
3.5.2 Analyse de la vulnérabilité *53*
3.6 Analyse de vulnérabilité pour la Ville de Québec 59
3.6.1 Projection de consommation *60*
3.6.2 Analyse de la vulnérabilité *62*
4. L'ÉCONOMIE DES MESURES DE RÉDUCTION DU RISQUE DE PÉNURIE D'EAU POTABLE 70
4.1 SYNTHÈSE DE LA VULNÉRABILITÉ 70
4.1.1 Beaupré, Château-Richer, Boischatel et L'Ange-Gardien *72*
4.1.2 Québec *73*
4.1.3 Lévis *74*
4.2 Adaptation aux risques 75
4.2.1 Suivre les rivières dans le temps *76*
4.2.2 Gestion de la demande *76*
4.2.3 Gestion de l'offre *78*
5. CONCLUSION 80
BIBLIOGRAPHIE 82
ANNEXE 84
Annexe 1 – Post-traitement des séries de débit 84
Annexe 2 – Sources des débits écologiques 87

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Changements prévus au débit mensuel moyen des rivières de la région de Québec à l'horizon 2050 (2041-2070), par rapport à la période 1971-2000. Les lignes présentent la médiane des changements selon les éditions 2013 et 2015 de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. La dispersion des résultats (lignes noires) représente l'intervalle plausible des changements de débits futurs estimé par la DEH..... 2

Figure 2. Carte des principaux bassins versants du territoire de la CMQ et des prises d'eau de surface (Source : http://www.cmquebec.qc.ca/eau/protection-sources-eau)..... 5

Figure 3. Étendue approximative des réseaux desservis par les usines de production d'eau potable des municipalités de la CMQ. 6

Figure 4. Schéma conceptuel de la méthodologie employée pour l'analyse de la vulnérabilité 15

Figure 5. Réchauffement des températures mondiales selon les différents scénarios d'émissions de GES, par rapport à la fin du 20e siècle (1986-2005). Le nombre entre parenthèses indique le nombre de modèles utilisés. (Knutti et Sedláček, 2013). 16

Figure 6. Schéma de production des scénarios hydrologiques. 19

Figure 7. Relation entre consommation quotidienne par personne et la température maximale pour Québec, Boischatel et L'Ange-Gardien, Beaupré, Château-Richer et Lévis. 25

Figure 8. Consommation d'eau par personne observée (bleu) et modélisée (or) pour l'année 2016 à Boischatel. 27

Figure 9. Comparaison des débits de la rivière Saint-Charles et de la demande en eau potable pour le réseau de Québec (Scénario hydroclimatique 2 (sur 56), année 2046).....31

Figure 10. Projections hydrologiques pour les rivières Sainte-Charles, Montmorency, Ferrée et Chaudière. La figure présente les 25e et 75e percentiles de la distribution de débits (m^3/s) pour les périodes de référence (1971-2000) et futures (2021-2050). Les changements pour la rivière Sainte-Anne correspondent à ceux de la rivière Montmorency.....34

Figure 11. Projections hydrologiques des indicateurs d'étiage de l'Atlas hydroclimatique pour les rivières (a) Sainte-Charles, (b) Montmorency, (c) Ferrée et (d) Chaudière. La figure présente les changements (%) prévus entre les périodes de référence (1971-2000) et futures (2021-2050) pour divers indicateurs d'étiage. Les changements pour la rivière Sainte-Anne correspondent à ceux de la rivière Montmorency. Chaque section de la boîte à moustache (boxplot) représente environ 25 % des données. La ligne rouge illustre donc la médiane. Les valeurs au-dessus (en dessous) du 95e (5e) centile sont illustrées séparément, à l'aide d'un point rouge.....35

Figure 12. Distribution de la sévérité des étiages en période historique et en période future, pour le bassin versant de la rivière Saint-Charles. 36

Figure 13. Projections de la demande moyenne et maximale quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour la municipalité de Beaupré. 38

Figure 14. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour Beaupré.....39

Figure 15. Projections de la demande moyenne et maximale quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour la municipalité de Château-Richer.....42

Figure 16. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour Château-Richer. 43
Figure 17. Projections de la demande moyenne et maximale quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour la municipalité de Boischatel. 45
Figure 18. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour Boischatel et Ange-Gardien. 46
Figure 19. Évolution du nombre de jours par année où le débit résiduel est inférieur au débit écologique (marine) et du nombre de jours où le soutirage est responsable du non-respect du débit écologique en rivière (or) pour la rivière Ferrée entre 2021 et 2050. 49
Figure 20. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau de Saint-Romuald. 51
Figure 21. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau de Charny. 52
Figure 22. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau Desjardins. 52
Figure 23. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE de Saint-Romuald. 54
Figure 24. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE Desjardins. 54
Figure 25. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE Charny. 55
Figure 26. Évolution du nombre de jours par année où le débit résiduel est inférieur au débit esthétique pour la rivière Chaudière entre 2021 et 2050. 56
Figure 27. Schéma simplifié des interconnexions entre les quatre réseaux de l'agglomération de Québec (construit à partir de Ville de Québec (2016)) 59
Figure 28. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau de Québec. 60
Figure 29. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau de Sainte-Foy. 61
Figure 30. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau de Charlesbourg. 61
Figure 31. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau de Beauport. 62
Figure 32. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE de Québec. 63
Figure 33. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE de Sainte-Foy. 63

Figure 34. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE de Charlesbourg. 64

Figure 35. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE de Beauport. 64

Figure 36. Évolution du pourcentage de scénarios climatiques présentant minimalement une journée de pénurie d'eau potable dans l'année pour le réseau de Québec entre 2021 et 2050 pour les 56 scénarios climatiques en considérant l'interconnexion entre le réseau de Québec et de Sainte-Foy 66

Figure 37. Projections hydrologiques pour les rivières Sainte-Charles, Montmorency, Ferrée et Chaudière. La figure présente les 25^{e} et 75^{e} percentiles de la distribution de débits (m^3/s) pour les périodes de référence (1971-2000) et futures (2021-2050). Les changements pour la rivière Sainte-Anne correspondent à ceux de la rivière Montmorency....71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Sommaire de l'approvisionnement en eau dans la municipalité de Beaupré 7
Tableau 2. Sommaire de l'approvisionnement en eau dans la municipalité de Château-Richer 8
Tableau 3. Sommaire de l'approvisionnement en eau dans la municipalité de Boischatel et L'Ange-Gardien..... 9
Tableau 4. Sommaire de l'approvisionnement en eau dans la Ville de Lévis 10
Tableau 5. Caractéristiques des réseaux de distribution de la Ville de Québec (Service de l'ingénierie, Ville de Québec, 2016).....12
Tableau 6. Sommaire de l'approvisionnement en eau de la Ville de Québec (Service de l'ingénierie, Ville de Québec, 2016).....13
Tableau 7. Calcul de la sévérité des étiages en fonction de la capacité de gestion du barrage Cyrille-Delage 23
Tableau 8. Scénarios de référence d'évolution des populations 28
Tableau 9. Scénarios faibles d'évolution des populations.....29
Tableau 10. Scénarios forts d'évolution des populations.....29
Tableau 11. Critères d'analyse de la vulnérabilité des sources d'eau potable 32
Tableau 12. Analyse des critères écologiques pour les rivières Ferrée et Montmorency.....48
Tableau 13. Fréquence, durée et intensité des épisodes de pénurie futurs pour le réseau de Québec en considérant l'interconnexion entre le réseau de Québec et de Sainte-Foy. 67
Tableau 14. Fréquence du non-respect des débits écologiques pour la rivière Saint-Charles. 68
Tableau A.1. Nombre de simulations utilisées pour chaque territoire 85

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CC	:	Changements climatiques
CEHQ	:	Centre d'expertise hydrique du Québec (ancien nom de la DEH)
CMIP	:	*Coupled Model Intercomparison Project*
CMQ	:	Communauté métropolitaine de Québec
DEH	:	Direction de l'expertise hydrique
GES	:	Gaz à effet de serre
GIEC	:	Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat
ICI	:	Industries, commerces et institutions
ISQ	:	Institut de la statistique du Québec
MAMH	:	Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation
MCG	:	Modèle de circulation générale
MELCC	:	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MRC	:	Municipalité régionale de comté
OBV	:	Organisme de bassin versant
RCP	:	*Representation concentration pathways*
RMRQ	:	Région métropolitaine de recensement de Québec
UPE	:	Usine de production d'eau potable

LEXIQUE

Capacité nominale de production : La capacité nominale est le volume maximal d'eau potable qu'une usine de production d'eau potable est capable de produire par jour lorsqu'elle fonctionne dans des conditions normales.

Débit 7Q2 : Débit minimal pour une période de 7 jours consécutifs, dont la période de retour est de 2 ans.

Débit 7Q10 : Débit minimal pour une période de 7 jours consécutifs, dont la période de retour est de 10 ans.

Demande en eau potable : Dans ce rapport le terme « demande en eau potable » correspond à la somme de l'eau consommée et de l'eau perdue dans les fuites des réseaux. Autrement dit, la demande correspond à la quantité d'eau totale distribuée, qu'elle soit consommée ou non.

Débit esthétique : Débit minimum requis pour maintenir un débit visuellement intéressant. Dans le cas de ce rapport, cela concerne uniquement le débit de la rivière Chaudière et représente le volume d'eau nécessaire pour que l'écoulement de l'eau soit visuellement le même qu'avant l'exploitation de la centrale à la hauteur du Parc des Chutes-de-la-Chaudière.

Débit écologique : Débit minimum requis pour maintenir une quantité et une qualité suffisantes d'habitats pouvant assurer le déroulement normal des activités biologiques des espèces de poisson qui accomplissent, en tout ou en partie, leur cycle vital dans le ou les tronçons perturbés.

Débit résiduel : Le débit résiduel est le débit d'un cours d'eau qui subsiste après un ou plusieurs prélèvements

Horizon 2030 : La période 2021-2050. Certains auteurs utilisent plutôt « Horizon 2020 ».

Horizon 2050 : La période 2041-2070.

Horizon 2080 : La période 2071-2100 (ou 2099, selon la disponibilité des données).

Période de référence : Période d'au moins 20 ans pendant laquelle les paramètres climatiques (température, précipitations) sont jugés stables pendant laquelle l'influence des changements climatiques est idéalement minimale. Typiquement avant l'an 2000. Dans l'étude, cette période est définie comme étant 1971-2000.

Régression linéaire : Analyse statistique visant à établir la relation entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables indépendantes au moyen d'une fonction ou équation linéaire.

Réseau gravitaire : Réseau d'approvisionnement en eau potable dans lequel l'eau s'écoule sous l'effet de la gravité.

Réseau surpressé : Réseau d'approvisionnement en eau potable dans lequel l'eau est pressurisée afin d'être distribuée.

Simulation climatique : Données provenant directement d'un modèle climatique.

Scénario climatique : Simulations climatiques analysées et, si nécessaire, corrigées pour les besoins d'un projet précis.

Transformation log-linéaire : Transformation d'une variable visant à normaliser sa distribution et améliorer la performance des analyses par régression linéaire.

1. MISE EN CONTEXTE

1.1 DESCRIPTION DE LA PROBLÉMATIQUE

Sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ), plusieurs municipalités s'approvisionnent à partir d'eaux de surface. Ces municipalités prélèvent leur eau notamment des rivières Montmorency, Saint-Charles, Ferrée, Sault-à-Puce, Sainte-Anne, Chaudière, et du fleuve Saint-Laurent. La capacité de ces municipalités à fournir de l'eau potable aux citoyens et aux différents usagers sur le territoire est tributaire de la disponibilité dans les cours d'eau. Or, même s'il y a une abondance de ressources en eau douce sur le territoire de la CMQ et au Québec en général, certaines périodes critiques lors d'étiages sévères, combinées à des pointes de consommation, peuvent mettre en péril la capacité des systèmes d'approvisionnement en eau des municipalités. Les étiages sévères dans la rivière Saint-Charles survenus lors des étés 2002 et 2010 ont d'ailleurs forcé la Ville de Québec à revoir sa planification stratégique à long terme afin de prendre des mesures réduisant la vulnérabilité du système d'approvisionnement en eau potable, dont la mise en place d'interconnexions de grande capacité entre ses réseaux d'aqueducs.

Malgré ces mesures, l'effet anticipé des changements climatiques pourrait amplifier la fréquence et l'intensité des étiages estivaux critiques en plus d'augmenter la demande en eau potable lors des périodes de canicule. Ces effets du climat, combinés à la croissance de la population sur le territoire de la CMQ, ont soulevé des questionnements sur la vulnérabilité des systèmes d'approvisionnement des municipalités de la CMQ à moyen et à long terme.

La première étape réalisée pour évaluer la vulnérabilité des systèmes d'approvisionnement a consisté à colliger l'information scientifique déjà produite concernant les deux rivières principales approvisionnant la Ville de Québec : la Saint-Charles et la Montmorency. Un premier rapport d'Ouranos publié en 2016 a ainsi porté sur l'état des connaissances sur ces deux rivières et sur l'impact anticipé des changements climatiques sur leur régime hydrique. L'objectif du Bilan hydrologique des rivières Saint-Charles et Montmorency dans un contexte de changements climatiques (Ouranos, 2016) était de faire un inventaire des données d'observation, des études scientifiques et des modèles hydrologiques pour ces deux cours d'eau.

Pour les projections futures, les résultats se sont basés principalement sur deux études qui ont exploré l'effet des changements climatiques sur les rivières Saint-Charles et Montmorency. Ces études annoncent des débits d'étiage jusqu'à 50 % plus sévères en été, accompagnés d'une diminution similaire des débits

moyens entre juin et août aux horizons 2050 et 2080. Le niveau des nappes phréatiques pourrait également baisser. En contrepartie, ces études rapportent qu'à l'horizon 2050, les débits moyens des rivières représentées à la Figure 1 connaîtront une variation entre -5 et +130 % en février, période présentement problématique en raison de faibles débits.

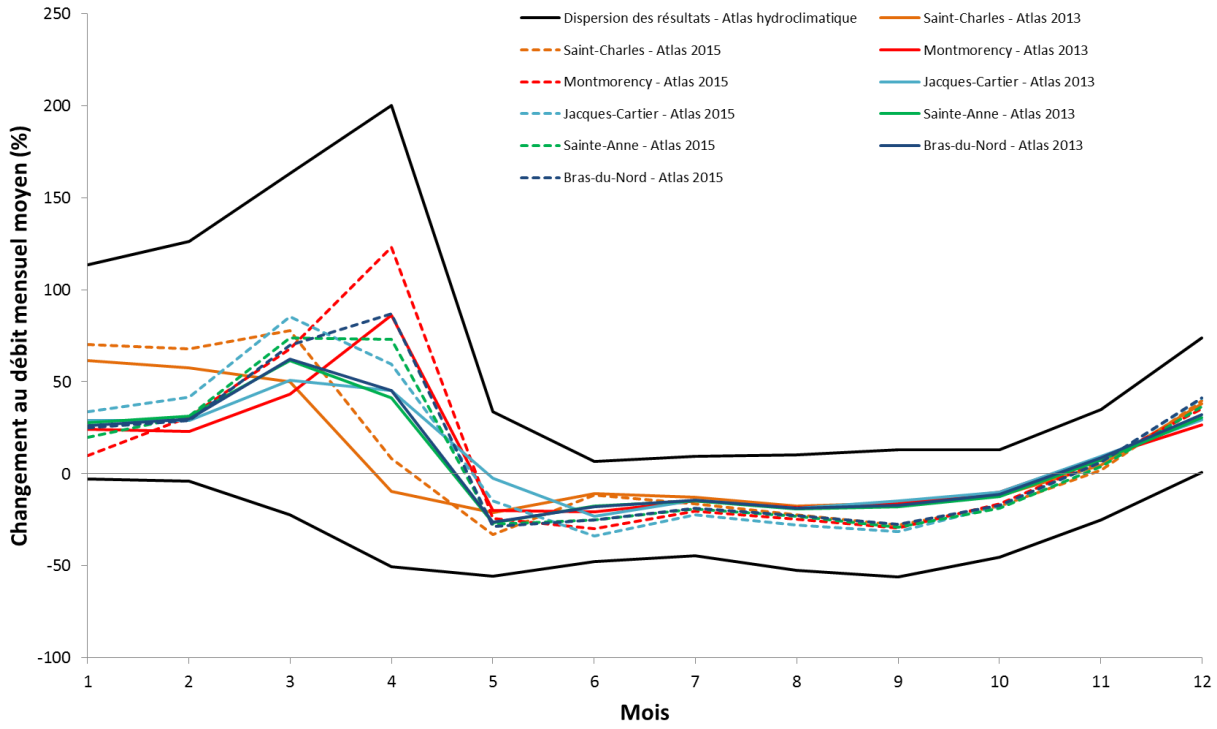


Figure 1. Changements prévus au débit mensuel moyen des rivières de la région de Québec à l'horizon 2050 (2041-2070), par rapport à la période 1971-2000. Les lignes présentent la médiane des changements selon les éditions 2013 et 2015 de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. La dispersion des résultats (lignes noires) représente l'intervalle plausible des changements de débits futurs estimé par la DEH.

Le rapport a clairement identifié que les données aux horizons 2020 ou 2030 étaient manquantes dans la littérature scientifique en 2016. Or, ce sont ces horizons d'analyse qui sont pertinents pour la planification stratégique des infrastructures d'approvisionnement en eau potable. C'est notamment cette lacune que l'étude en cours tente de pallier.

Au Québec, la base de données principale fournissant des informations sur l'impact potentiel des CC sur le régime hydrique des rivières provient d'une collaboration entre la Direction de l'expertise hydrique (DEH) du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), l'Institut de recherche d'Hydro-Québec, Rio Tinto et Ouranos. L'une des publications principales qui découlent de cette collaboration est l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional produit par la DEH (Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), 2013, 2015). Une nouvelle édition, prévue pour 2018, permet d'analyser

l'évolution des régimes hydrologiques pour les prochaines décennies. Ces nouvelles données ont été fournies à l'équipe de projet en primeur avant leur lancement public, et ont été centrales à la présente analyse qui vise à évaluer le risque de pénuries futures (probabilité, durée et fréquence) des villes en regard de leurs installations existantes et des débits en rivière pour l'horizon 2021-2050.

1.2 OBJECTIFS DU PROJET

Le projet vise à évaluer les risques relatifs à l'approvisionnement en eau potable découlant de la modification des dynamiques hydrologiques des rivières en contexte de changements climatiques. Une approche économique est utilisée pour l'analyse : elle permet dans un premier temps de modéliser l'évolution de la demande en eau pour la comparer à l'évolution de la disponibilité en rivière au cours des trois prochaines décennies.

Les objectifs spécifiques du projet sont :

- Intégrer les changements climatiques dans l'analyse de la capacité d'approvisionnement et dans l'analyse de l'évolution de la demande.
- Projeter la disponibilité en eau sur une base quotidienne future pour cinq études de cas (Québec, Lévis, Boischatel, Beaupré et Château-Richer).
- Identifier et analyser la vulnérabilité des systèmes d'approvisionnement en eau potable et les risques de pénuries d'eau.

1.3 MUNICIPALITÉS À L'ÉTUDE

Le territoire d'intérêt concerne les municipalités faisant partie de la CMQ qui s'approvisionnent en eau de surface. La Figure 2 cartographie les principaux bassins versants du territoire de la CMQ qui alimentent les municipalités en eau potable. Les sources d'eau de surface approvisionnant des municipalités sur le territoire de la CMQ sont :

- Rivière Saint-Charles approvisionnant la Ville de Québec, L'Ancienne-Lorette, Saint-Gabriel-de-Valcartier et Wendake
- Rivière Montmorency approvisionnant la Ville de Québec (arrondissements de Beauport et de Charlesbourg) et Boischatel
- Lac Bégon et lac des Roches approvisionnant la Ville de Québec (arrondissement de Charlesbourg)
- Rivière Ferrée approvisionnant Boischatel et L'Ange-Gardien
- Rivière Sault-à-la-Puce approvisionnant Château-Richer
- Rivière Sainte-Anne approvisionnant Beaupré

- Rivière Chaudière approvisionnant Lévis
- Fleuve Saint-Laurent approvisionnant la Ville de Québec (arrondissement de Sainte-Foy, Sillery et Cap-Rouge), Saint-Augustin-de-Desmaures et Lévis
- Lac Saint-Joseph approvisionnant Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier

L'étude se concentre sur cinq municipalités soit Beaupré, Château-Richer, Boischatel, Lévis et Québec (voir Figure 3).

1.3.1 BEAUPRÉ

La municipalité de Beaupré compte 3 752 habitants (Statistique Canada, 2017). Sa croissance démographique des 15 dernières années a été importante. Entre les recensements de 2001 et de 2016, la municipalité a vu sa population croître de 36,7 % (Institut de la statistique du Québec, 2016). Le mont Saint-Anne est situé sur le territoire de la municipalité. Il attire une quantité importante de touristes venant profiter des attraits de la montagne, particulièrement en hiver.

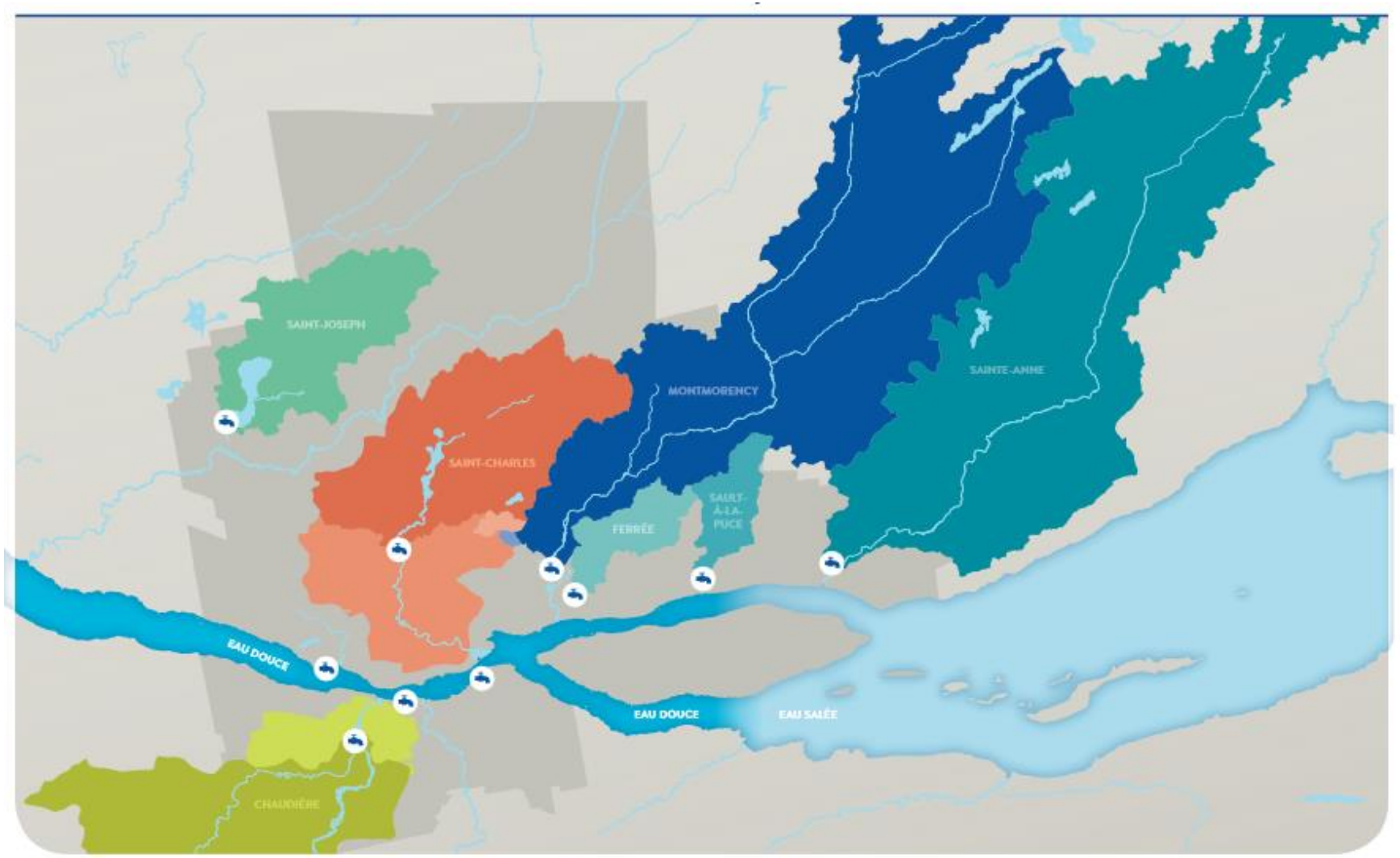


Figure 2. Carte des principaux bassins versants du territoire de la CMQ et des prises d'eau de surface (Source : http://www.cmquebec.qc.ca/eau/protection-sources-eau)

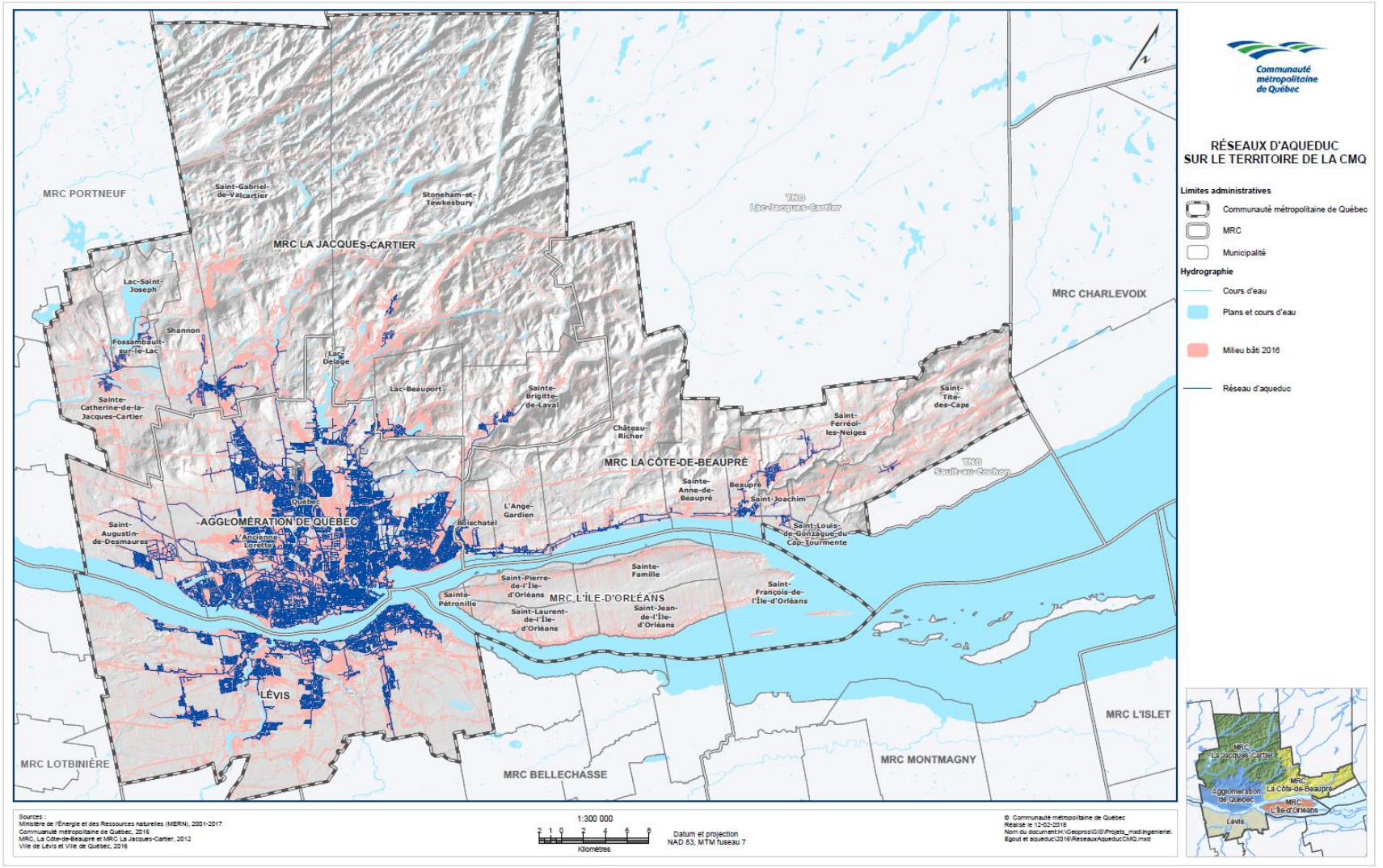


Figure 3. Étendue approximative des réseaux desservis par les usines de production d'eau potable des municipalités de la CMQ.

Les Beaupréens sont approvisionnés en eau potable par la rivière Sainte-Anne. L'usine de production d'eau potable[1] (UPE) approvisionne la majorité des résidents via le réseau de distribution d'eau potable (OBV Charlevoix-Montmorency, 2014). L'UPE de Beaupré a une capacité de production maximale de 8 640 m³/jour. L'usine comporte 2 réserves de 350 m³ chacune, en plus d'un réservoir de 75 m³. La consommation quotidienne moyenne par habitant à Beaupré se situe à 534 litres par personne pour une production moyenne en 2016 de 1 996 m³/jour.

En 2010, pendant la période de sécheresse estivale, Sainte-Anne-de-Beaupré a été approvisionné partiellement par la municipalité de Beaupré (OBV Charlevoix-Montmorency, 2014). Il est à noter que l'interconnexion est unidirectionnelle : l'eau ne peut circuler que de Beaupré vers Sainte-Anne-de-Beaupré et non inversement.

En amont de la prise d'eau se trouvent deux centrales hydroélectriques au fil de l'eau, soit les centrales Hydro-Canyon et les Sept-Chutes (OBV Charlevoix-Montmorency, 2014). En hiver, le mont Saint-Anne puise de l'eau brute dans la rivière Sainte-Anne pour alimenter son système de fabrication de neige. Les quantités d'eau puisée ne sont pas publiquement disponibles, mais la fabrication de neige s'étend typiquement de novembre à février dans les centres de ski du Québec.

La municipalité ne compte pas de grands consommateurs d'eau industriels. Les proportions exactes attribuables aux consommations industrielles, commerciales et institutionnelles (ICI) ne sont pas connues par la municipalité, car des débitmètres ne sont pas installés pour tous les ICI sur le territoire. Toutefois, une estimation approximative des responsables de l'UPE attribue 80 % de la consommation au secteur résidentiel et 20 % aux ICI.

Tableau 1. Sommaire de l'approvisionnement en eau dans la municipalité de Beaupré

Source d'approvisionnement	Sainte-Anne du Nord
Population desservie	3 735
Capacité de traitement de l'UPE	8 640 m³/j
Consommation moyenne par personne	534 L/jour
Qte quotidienne moyenne distribuée (2016)	1 996 m³/j
Qte quotidienne maximale distribuée (2016)	3 182 m³/j
Facteur de pointe (Qmax/Qmoy)	1,59

[1] Le terme « usine de production d'eau potable » (UPE) est employé dans ce rapport bien que le terme « usine de traitement d'eau potable » soit également employé dans le domaine.

1.3.2 CHÂTEAU-RICHER

Château-Richer est une municipalité faisant partie de la MRC de La Côte-de-Beaupré. L'UPE de la ville approvisionne 4 035 Château-Richerois (Statistique Canada, 2017). Entre 2001 et 2016, la population de la municipalité a crû de 14,0 % (Institut de la statistique du Québec, 2016). La municipalité de Château-Richer s'approvisionne dans la rivière Sault-à-la-Puce. L'UPE a une capacité nominale de production de 3 283 m³/jour.

L'UPE est la seule source d'approvisionnement pour la municipalité. Toutefois, une certaine portion des habitants sont approvisionnés par des puits individuels. Aucune interconnexion n'est présente entre le réseau de Château-Richer et ceux des municipalités voisines, bien que les réseaux de Sainte-Anne-de-Beaupré et de l'Ange-Gardien soient situés à proximité.

La consommation résidentielle et des ICI sur le territoire de la municipalité ne sont pas comptabilisées par des compteurs d'eau. Il est donc difficile de connaître exactement les proportions de la consommation attribuables respectivement aux secteurs résidentiel, commercial et industriel. Toutefois, le faible nombre de commerces et la connaissance du réseau poussent le responsable de l'UPE à estimer qu'environ 95 % de la consommation est normalement attribuée aux usages résidentiels. Des compteurs seront installés en 2018, afin de mesurer l'usage des commerces sur le territoire.

Tableau 2. Sommaire de l'approvisionnement en eau dans la municipalité de Château-Richer

Source d'approvisionnement	Sault-à-la-Puce
Population desservie (2016)	4 035
Capacité de traitement de l'UPE	3 283 m³/j
Consommation moyenne par personne (2016)	410 L/jour
Qte quotidienne moyenne distribuée (2016)	1 646 m³/j
Qte quotidienne maximale distribuée (2016)	2 210 m³/j
Facteur de pointe (Qmax/Qmoy)	1,34

1.3.3 BOISCHATEL / L'ANGE-GARDIEN

Le réseau d'approvisionnement géré par la municipalité de Boischatel alimente à la fois son propre territoire et celui de l'Ange-Gardien, la municipalité voisine. Ces deux municipalités font partie de la MRC de la Côte-de-Beaupré. Boischatel est une municipalité qui abrite 7 393 habitants et qui connaît une forte croissance démographique en raison notamment de sa proximité du centre urbain de la Ville de Québec (Statistique Canada, 2017). Entre les recensements de 2001 et 2016, la croissance de la population pour Boischatel a été de 70,1% (Institut de la statistique du Québec, 2016). La population de L'Ange-Gardien s'élève quant à elle à 3 800 habitants.

Le réseau d'approvisionnement en eau potable de la municipalité dessert la majorité des résidents de Boischatel et de l'Ange-Gardien. Environ 250 logements sur le territoire de Boischatel dépendent de puits individuels. Le nombre de logements s'approvisionnant par puits pour L'Ange-Gardien est d'approximativement 650. Les résidents de Boischatel sont approvisionnés en majorité par un réseau surpressé. Ceux de L'Ange-Gardien sont approvisionnés par un réseau gravitaire.

Au moment d'écrire ce rapport, la seule prise d'eau de surface municipale en service puise son eau brute dans la rivière Ferrée. Par contre, en aval de la prise d'eau municipale dans la rivière Ferrée se trouve un terrain de golf, qui détient sa propre prise d'eau. Considérant la croissance de la population attendue dans les années à venir, une nouvelle prise d'eau a été installée dans la rivière Montmorency. Sa mise en service est prévue en 2018. Les deux prises d'eau alimenteront l'UPE de Boischatel, qui verra alors sa capacité de traitement grimper de 6 500 m³/jour à 10 388 m³/jour. Le réseau a une capacité de stockage de 2 200 m³, dans un réservoir souterrain.

Boischatel et L'Ange-Gardien sont deux municipalités qui sont majoritairement résidentielles. Comme pour les autres municipalités, les proportions exactes de consommation sont inconnues puisque les utilisateurs n'ont pas de compteurs d'eau. Toutefois, les responsables du système d'approvisionnement en eau potable estiment que la consommation institutionnelle représenterait environ 2 %, l'industriel 1 %, le commercial 10 % et l'agricole 3 %. Environ 85 % de la consommation d'eau potable proviendrait de la consommation résidentielle.

Depuis environ 6 ans, la Ville de Boischatel a instauré de nouvelles pratiques d'économie d'eau potable. Par exemple, le nettoyage des rues et le nettoyage des égouts sont maintenant effectués avec de l'eau brute. Plusieurs travaux de réparation de fuites ont également été entrepris par une équipe interne de localisation de fuites. Des patrouilles ont lieu pendant l'été afin de faire respecter l'horaire des périodes d'arrosage permises. Des permis doivent également être donnés par la Ville pour des projets spéciaux qui pourraient utiliser de grandes quantités d'eau.

Tableau 3. Sommaire de l'approvisionnement en eau dans la municipalité de Boischatel et L'Ange-Gardien

Source d'approvisionnement	Ferrée et Montmorency
Population desservie (2015)	10 511
Capacité de traitement de l'UPE (2018)	10 388 m³/j
Consommation moyenne par personne	275 L/jour
Qte quotidienne moyenne distribuée (2016)	2 917 m³/j
Qte quotidienne maximale distribuée (2016)	5 511 m³/j
Facteur de pointe (Qmax/Qmoy)	1,89

1.3.4 LÉVIS

La Ville de Lévis compte 143 414 habitants selon le recensement de 2016 (Statistique Canada, 2017). Entre 2001 et 2016, la population a crû de 16,1% (Institut de la statistique du Québec, 2016).

La Ville de Lévis possède deux sources d'eau potable, soit la rivière Chaudière (±30 %) qui alimente l'UPE de Charny et le fleuve Saint-Laurent (±70 %) qui alimente les UPE Desjardins et Saint-Romuald. Ces trois UPE ont une capacité de production combinée 132 256 m³/jour. Les trois UPE alimentent à leur tour trois réseaux d'approvisionnement qui ne sont pas interconnectés. Des travaux sont planifiés en vue d'augmenter la capacité de transfert entre les trois réseaux de la ville.

La problématique de la remontée du front salin dans le fleuve Saint-Laurent pourrait être critique pour Lévis, puisque la ville s'approvisionne à environ 70 % dans le fleuve. Cet impact sera évalué par des analyses de sensibilité (impact de la perte d'une ou des deux prises d'eau du fleuve).

Tableau 4. Sommaire de l'approvisionnement en eau dans la Ville de Lévis

Sources d'approvisionnement	Fleuve Saint-Laurent		Chaudière
Usine de production d'eau potable	Desjardins	Saint-Romuald	Charny
Capacité de traitement (m³/j)	65 600	20 000	46 656
Qte quotidienne moyenne distribuée (2016) (m³/j)	26 789	8 820	14 818
Qte quotidienne maximale distribuée (2016) (m³/j)	35 868	12 228	26 755
Facteur de pointe (Qmax/Qmoy)	1,34	1,39	1,81
Population desservie	53 681	30 003	52 514
Consommation moyenne par personne	499 L/j	293 L/j	282 L/j

Les usages de l'eau sur la rivière Chaudière sont multiples et de nombreux acteurs municipaux, agricoles et industriels s'alimentent en amont de la prise d'eau de Lévis. Par ailleurs, en aval de la prise d'eau de Lévis, Innergex opère une centrale hydroélectrique au fil de l'eau. La centrale est située à la sortie du pont Pierre-Laporte dans le Parc des Chutes-de-la-Chaudière.

1.3.5 QUÉBEC

L'agglomération de Québec abrite 567 265 habitants selon le recensement de 2016, en incluant L'Ancienne-Lorette et Saint-Augustin-de-Desmaures (Statistique Canada, 2017). La croissance de la population de la Ville de Québec, qui a été de 2,9 % entre 2010 et 2016, est considérablement plus faible que celle de plusieurs municipalités périphériques. En effet, la croissance de la population est beaucoup plus notable dans certaines des municipalités périphériques à la ville-centre, suggérant une tendance à l'étalement urbain dans la région.

La Ville de Québec possède cinq sources d'eau de surface, soit la rivière Saint-Charles, la rivière Montmorency (directement et via le lac des Roches), le lac des Roches, la rivière des Sept Ponts et le fleuve Saint-Laurent. Le reste de l'approvisionnement (~1 %) provient de sources d'eau souterraine exploitées par des puits (Service de l'ingénierie de la Ville de Québec, 2016). À la suite des fusions municipales de 2002, un rapport de l'INRS-ETE avait été produit afin d'établir un état des lieux sur l'approvisionnement et l'utilisation de l'eau potable dans la nouvelle Ville de Québec (Villeneuve et al., 2002). Ce rapport abordait à la fois les questions de quantité et de qualité et s'intéressait aux eaux de surface et aux eaux souterraines. Relativement à la disponibilité de l'eau de surface, le rapport mentionnait que la rivière Saint-Charles était à la limite de sa capacité d'approvisionnement et que la rivière Montmorency affichait une capacité potentielle pouvant être exploitée pour subvenir aux besoins grandissants de la population de l'agglomération de Québec (Villeneuve et al., 2002). En 2018, la municipalité de Boischatel mettra justement en opération une nouvelle prise d'eau dans la rivière Montmorency.

La capacité d'emmagasinement en eau des deux rivières en prévision des périodes plus critiques est faible. La rivière Montmorency ne comporte pas de capacité de rétention, alors que la rivière Saint-Charles est alimentée par le lac Saint-Charles, qui peut servir de réservoir. La présence d'un barrage sur la rivière Saint-Charles permet de faire une gestion active des débits et de ménager ainsi à court terme les débits disponibles pour la prise d'eau de la rivière Saint-Charles. Toutefois, le lac Saint-Charles ne représente qu'une capacité de rétention relativement limitée : le volume du lac est renouvelé en moyenne 16 fois par année (APEL, 2009). La situation peut devenir critique lors d'étiages particulièrement longs ou sévères. Deux exemples critiques ont été les étiages de 2002 et de 2010, qui ont nécessité l'ouverture d'une station de pompage dans la rivière Jacques-Cartier, pour acheminer une partie de ses eaux vers la rivière Saint-Charles. Dans les deux cas, l'opération n'a eu qu'un succès mitigé. À la suite de l'étiage en 2002, des travaux ont donc été entrepris afin de raccorder le réseau de Sainte-Foy, qui s'alimente dans le fleuve Saint-Laurent, au reste du réseau de Québec par une conduite de 50 000 m^3/jour de capacité. Ces travaux ont réduit la vulnérabilité de la Ville, ce qui a notamment permis de gérer plus efficacement la période d'étiage de 2010. Un faible débit a tout de même dû être soutiré de la rivière Jacques-Cartier pendant cet étiage.

Quant à la rivière Montmorency, il existe actuellement un problème d'approvisionnement lors de certaines périodes d'étiage. Il se pourrait toutefois que cette problématique soit due à la présence de bras secondaires et à une instabilité morphologique de la rivière provoquée par l'élargissement de chenaux périphériques (anabranches), qui seraient dus à une accumulation d'alluvions dans le lit de la rivière. Dans cette section du cours d'eau, une grande quantité d'alluvions s'est accumulée en raison du bris de pente du cours d'eau. Ceux-ci créent d'importants embâcles qui seraient en train de détourner progressivement une quantité importante d'eau dans des chenaux parallèles au lit de la rivière vis-à-vis du site de la prise

d'eau de Beauport (communication personnelle P. Mailhot, OBV Charlevoix-Montmorency). Comme ces phénomènes ne sont pas liés à l'évolution du climat, mais plutôt au parcours emprunté par l'eau de la rivière, cette problématique n'est pas prise en compte dans le cadre de cette analyse. Bien entendu, la vérification de cette hypothèse et les mesures à prendre doivent faire l'objet d'analyses attentives de la part des gestionnaires d'infrastructures puisque cela pourrait poser des risques relativement à l'approvisionnement en eau potable.

Finalement, la problématique de la remontée du front salin dans le fleuve Saint-Laurent est actuellement à l'étude et les résultats sont attendus pour 2019. Il sera donc difficile d'anticiper les conséquences de la remontée du front salin sur la pérennité de la prise d'eau qui s'y trouve avant les conclusions de cette étude. Puisque la prise d'eau de Sainte-Foy est relativement éloignée du front salin actuellement, aucune analyse pour la Ville de Québec ne prend en compte l'évolution du front salin[2].

Tableau 5. Caractéristiques des réseaux de distribution de la Ville de Québec (Service de l'ingénierie, Ville de Québec, 2016)

Réseau de distribution	Sources d'eau de surface	Secteurs desservis	Population (2016)
Québec	Rivière Saint-Charles (99 %)	• Arrondissements de la Cité-Limoilou, des Rivières, de la Haute-Saint-Charles • Secteur Sillery • Ville de L'Ancienne-Lorette • Ville de Saint-Gabriel-de-Valcartier • Nation huronne-wendat • Université Laval	306 707
Sainte-Foy	Fleuve Saint-Laurent (100 %)	• Arrondissement de Sainte-Foy–Sillery-Cap-Rouge (sauf secteur Sillery) • Saint-Augustin-de-Desmaures	110 674
Charlesbourg	Rivière Montmorency (via lac des Roches) Lac des Roches Rivière des Sept Ponts (99 %)	Arrondissement de Charlesbourg	81 873
Beauport	Rivière Montmorency (100 %)	Arrondissement de Beauport	81 122

[2] Pour Lévis, puisque les prises d'eau qui s'approvisionnent dans le Fleuve (Saint-Romuald et Desjardins) se situent plus un aval, nous traitons du risque d'approvisionnement de la remontée du front salin grâce à une analyse de sensibilité.

Il est également important de noter que le système de distribution d'eau de la Ville de Québec alimente l'ensemble de l'agglomération de Québec. En 2014, le volume d'eau exporté en provenance de la Ville de Québec était de plus de 4,4 millions de mètres cubes (MAMH, 2017), dirigés principalement vers L'Ancienne-Lorette, St-Augustin-de-Desmaures et la nation huronne-wendat.

La Ville de Québec a mis sur pied une équipe de recherche de fuites dans les conduites municipales de distribution d'eau potable en 2006. À partir de 2010, l'équipe de recherche de fuites a été active continuellement entre mai et septembre. Depuis, une équipe permanente a été mise sur pied. Ces démarches permettent à la Ville de réduire considérablement les fuites sur son réseau, qui peut connaître jusqu'à 1 000 bris et fuites chaque année. Cette équipe permet maintenant de contenir et de réparer les fuites dès qu'elles sont détectées, incluant pendant l'hiver, où les conduites sont plus vulnérables à cause du gel.

Il est à noter que la recherche de fuites est un des moyens préconisés par la Stratégie québécoise d'économie d'eau potable. La Ville de Québec a mis sur pied une équipe interne habilitée à faire la recherche des fuites. Toutefois, d'autres municipalités font aussi appel à des firmes externes. Un modèle de devis pour appel d'offres relativement à la recherche des fuites sur le réseau de distribution d'eau potable est disponible sur le site web de la Stratégie québécoise d'économie d'eau potable.

Tableau 6. Sommaire de l'approvisionnement en eau de la Ville de Québec (Service de l'ingénierie, Ville de Québec, 2016)

Sources d'approvisionnement	Rivière Montmorency et Fleuve Saint-Laurent
Population desservie (2016)	580 376
Consommation moyenne par personne	424 L/jour

	Sainte-Foy	Québec	Charlesbourg	Beauport
Capacité de traitement (m^3/j)	160 000	227 000	56 000	56 000
Qte quotidienne moyenne distribuée (2016) (m^3/j)	54 567	124 013	30 118	28 791
Qte quotidienne maximale distribuée (2016) (m^3/j)	67 065	154 691	43 664	41 166
Facteur de pointe (Qmax/Qmoy)	1,23	1,25	1,45	1,43

2. MÉTHODOLOGIE

Ce projet vise à analyser la vulnérabilité des systèmes d'approvisionnement en eau de surface des cinq municipalités à l'étude sur l'horizon 2021-2050. Pour ce faire, une analyse de risque de pénurie est employée afin d'intégrer l'incertitude inhérente aux tendances climatiques futures. L'analyse se fonde sur le croisement entre la disponibilité future des ressources en eau dans les rivières et la demande[3] sur l'horizon 2021-2050 pour chacun des scénarios climatiques retenus. L'étude ne traite pas des enjeux de qualité de l'eau et ne prend pas en compte les sources d'eaux souterraines. Par ailleurs, seule la période estivale est considérée pour les fins de cette analyse.

2.1 ANALYSE DE LA VULNÉRABILITÉ

La Figure 4 présente la méthodologie du projet. L'analyse est motivée par des préoccupations quant à l'impact des changements climatiques sur la disponibilité en eau et sur l'évolution des besoins de consommation futurs. Le cadre d'analyse retenu s'inspire librement et prudemment des concepts économiques d'offre et de demande.

Du côté de l'offre, plusieurs paramètres vont dicter la capacité de fournir adéquatement la quantité d'eau qui est demandée pour les différents usages. La première contrainte est liée à l'évolution de l'hydrologie des rivières en réponse aux CC. Évidemment, les infrastructures municipales doivent aussi être en mesure de prélever, traiter et distribuer cette eau vers les usagers. À cette contrainte opérationnelle, des contraintes en lien avec les autres usages de l'eau doivent être intégrées à l'analyse. En particulier, le respect des débits minimums écologiques ou des débits minimums esthétiques et des autres usages sur la rivière doit être considéré.

La demande d'eau potable est influencée par plusieurs paramètres socioéconomiques. Le plus évident est l'évolution de la population. Toutefois, des modifications dans les habitudes de consommation en réponse à l'évolution dans la sensibilisation relativement à la conservation, aux équipements utilisés, aux programmes municipaux d'économie d'eau potable et à l'évolution dans les conditions climatiques vont également affecter la demande en eau potable. Les fuites sur les réseaux vont également jouer un rôle majeur dans la demande future. Rappelons à cet effet que la proportion des pertes d'eau potentielles par rapport à la quantité d'eau distribuée se situe à 26 % au Québec (MAMH, 2017).

[3] Le terme « demande » est utilisé dans ce rapport pour signifier la quantité totale d'eau potable distribuée qui comprend à la fois la quantité consommée par les résidents, les institutions, les commerces et les industries et l'eau perdue par les fuites dans les réseaux d'aqueduc.

Les risques de pénurie peuvent être entendus comme les risques que la quantité d'eau disponible soit moins grande que la quantité d'eau demandée. Les pénuries d'eau se produisent typiquement lors de la période estivale, au moment où la demande est la plus forte et les débits en rivière sont les plus faibles. Ces épisodes durent généralement quelques jours à quelques semaines. La modélisation doit être en mesure d'évaluer sur une base quotidienne à la fois la quantité d'eau demandée et la quantité d'eau disponible, de façon à évaluer adéquatement le risque. Les prochaines sections décrivent en détail comment ce travail a été réalisé, en s'appuyant sur la structure proposée à la Figure 4.

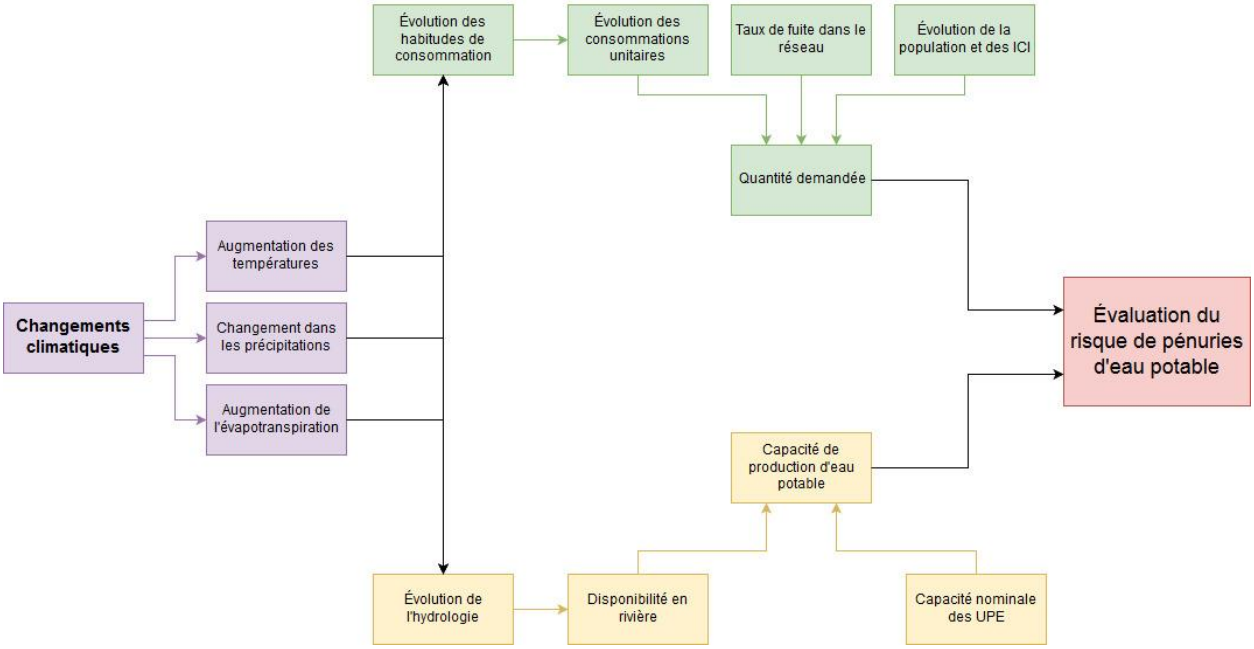


Figure 4. Schéma conceptuel de la méthodologie employée pour l'analyse de la vulnérabilité

2.1.1 SCÉNARIOS CLIMATIQUES

Un modèle climatique se veut une simulation des interactions entre l'atmosphère, l'eau (océans et eau douce), la cryosphère (neige et glace), les sols et la biosphère. Les modèles de circulation générale (MCG), utilisés dans l'étude actuelle, possèdent une résolution de l'ordre de plusieurs dizaines à quelques centaines de kilomètres, ce qui leur permet de modéliser l'ensemble de la planète.

Trois types d'incertitudes doivent être pris en compte dans l'analyse des projections climatiques, soit l'évolution dans le temps des émissions de gaz à effet de serre (GES), la nature chaotique des phénomènes atmosphériques (El Niño en est un exemple) et les erreurs structurales des modèles eux-mêmes, dues à des algorithmes simplifiés pour représenter certains processus physiques ou à une résolution spatiale et

temporelle insuffisante pour représenter adéquatement certains phénomènes. Ces erreurs structurales se traduisent par une sensibilité différente des modèles climatiques face à une même quantité d'émissions de GES (Solomon et al., 2007).

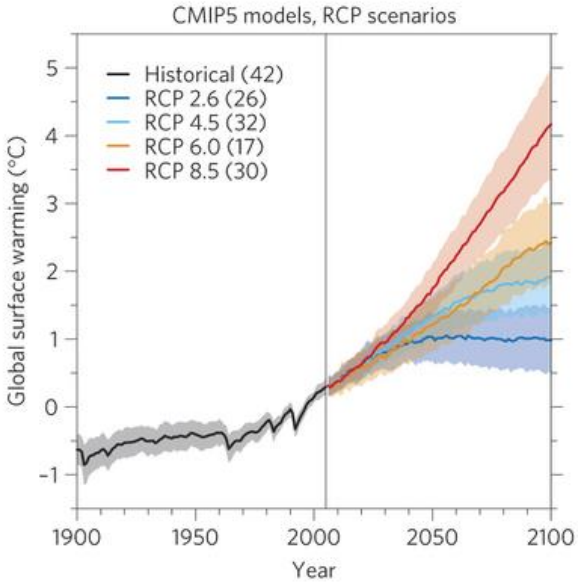


Figure 5. Réchauffement des températures mondiales selon les différents scénarios d'émissions de GES, par rapport à la fin du 20e siècle (1986-2005). Le nombre entre parenthèses indique le nombre de modèles utilisés. (Knutti et Sedláček, 2013).

Afin d'explorer l'impact du premier type d'incertitude, des scénarios standards d'émissions futures de GES ont été développés. Ces scénarios, présentés à la Figure 5 par les lignes de différentes couleurs, illustrent plusieurs situations possibles, selon les décisions politiques, l'évolution des comportements et la rapidité de l'évolution des technologies. Les scénarios vont d'une réduction drastique et rapide des émissions de GES à une progression constante des émissions tout au long du siècle. Dans le plus récent rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), ces scénarios sont appelés « *Representative Concentration Pathways* » (RCP). La Figure 5 représente l'évolution probable du climat selon ces différents RCP. Les plus communément utilisés sont les RCP4.5 et 8.5, qui correspondent respectivement à une baisse des émissions mondiales de GES à partir de 2040 (scénario « optimiste ») et à une progression constante des émissions tout au long du siècle (scénario « maintien du statu quo »). L'atteinte des objectifs de l'Accord de Paris sur le climat correspondrait à un réchauffement plus faible que le RCP 4.5, représenté par la ligne bleu pâle sur la Figure 5. Cette première source d'incertitude est traitée en utilisant plusieurs RCP, afin de prendre en compte un éventail de futurs possibles.

Le second type d'incertitude, soit la variabilité naturelle du climat, peut être traité de plusieurs manières. La première consiste à calculer les statistiques et les probabilités sur d'assez longues périodes, souvent 20 à 30 ans, afin de limiter l'influence des cycles chauds et froids qui peuvent affecter le climat pendant quelques

années, voire une décennie. Cette technique est toutefois difficile à appliquer dans le contexte d'une analyse économique. Pour cette raison, la variabilité naturelle du climat sera plutôt traitée en utilisant un ensemble de plusieurs MCG, ce qui pondère l'influence des cycles présents dans chaque modèle individuel. De toute manière, l'utilisation d'un ensemble de MCG est toujours recommandée afin de produire des résultats fiables. Cela aide également à traiter le troisième type d'incertitude, où les différences dans les algorithmes et dans la structure des modèles eux-mêmes signifient que pour une même quantité de GES, le réchauffement mondial résultant varie d'un MCG à un autre.

Dans l'étude actuelle, les résultats seront exprimés comme des probabilités d'occurrence d'événements d'étiages pour lesquels la quantité d'eau dans les rivières ne pourrait pas suffire face à la quantité d'eau demandée. Le calcul des probabilités se fonde sur l'approche « une simulation, un vote » qui signifie que chaque simulation est considérée comme ayant une probabilité équivalente de se produire dans le futur. Autrement dit, les probabilités d'occurrence des événements de pénurie sont calculées en donnant le même poids à toutes les simulations climatiques utilisées pour l'analyse. Puisque l'horizon d'étude s'arrête en 2050, il est justifiable de combiner les scénarios d'émissions de GES dans les probabilités calculées. Comme il est possible de l'observer à la Figure 5, l'écart entre les RCP pour cette période demeure faible. Plus spécifiquement :

$$(1)\quad P(E < D, t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} S_i$$

E: Seuil critique en rivière
D: Demande en eau potable
t: temps
N: Nombre de simulation
S: Simulations
i : identifiant des simulations (1 à N)

Les scénarios climatiques utilisés dans le cadre de l'étude proviennent de 98 simulations du *Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5* (CMIP5, Taylor et al., 2012), analysées et post-traitées par le groupe Scénarios et services climatiques d'Ouranos. Ces simulations ont été choisies en raison de l'utilisation dans ce projet de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (Section 2.1.2.1.), qui utilise CMIP5 comme données d'entrée. Les sorties brutes des simulations sélectionnées ont été traitées pour corriger leurs biais par rapport aux observations. Deux méthodes distinctes de correction des biais sont employées pour chaque simulation, *daily translation* et *daily scaling*, pour un total de 196 scénarios climatiques. Ces méthodes cherchent à corriger les différences entre la simulation et les observations pendant une période dite de « référence ». La première méthode ajuste les données des modèles pour retirer leur biais, tandis que la deuxième modifie les données observées pour le projeter vers le futur. La méthodologie employée

pour la production des scénarios climatiques est décrite dans Gennaretti et al. (2015) et dans Mpelosaka et Chiew (2009). L'horizon d'étude est 2030, soit 2021-2050. La période de référence utilisée pour le post-traitement et la correction des biais est définie comme étant 1971-2000.

2.1.2 SCÉNARIOS HYDROLOGIQUES

2.1.2.1 Atlas hydroclimatique du Québec méridional

Depuis plusieurs années, la Direction de l'expertise hydrique (DEH) du MELCC travaille en collaboration avec Ouranos et d'autres partenaires afin d'étudier l'impact des changements climatiques sur le régime hydrique de nombreuses rivières du Québec. Les résultats qui découlent de ce projet de recherche sont publiés régulièrement sous la forme d'un *Atlas hydroclimatique du Québec méridional* (CEHQ, 2013; 2015 – ci-après nommé « Atlas » ou « Atlas hydroclimatique » pour simplification). Pour les fins de l'étude actuelle, Ouranos a obtenu l'accès aux données de la troisième édition de l'Atlas hydroclimatique 2018. Un ajout notable de l'édition 2018 par rapport aux éditions précédentes est l'inclusion de projections hydroclimatiques pour l'horizon 2030, défini comme la période 2021-2050.

Les projections hydroclimatiques de l'Atlas sont créées à partir de scénarios climatiques produits par Ouranos. Ils sont utilisés dans les deux plateformes de modélisation hydrologique de la DEH (Fortin et al., 2001; CEHQ, 2013; 2014; 2015). Suite aux recommandations de nos partenaires à la DEH, nous n'avons gardé que les résultats d'une seule plateforme, nommée SHANGGUAN-LINACRE, puisqu'elle offre une bonne représentation des faibles débits. La seconde plateforme utilisée par la DEH, nommée SETZO-HQ, représente moins bien les faibles débits, mais est plus performante pour la représentation des débits de crue (Malenfant, C. (DEH) et Ricard, S. (DEH), conversation téléphonique en juillet 2017).

Six rivières de l'Atlas hydroclimatique ont été considérées, soit les rivières Saint-Charles, Montmorency, Sainte-Anne (à Beaupré)[4], Jacques-Cartier, Chaudière et Etchemin. Les rivières Jacques-Cartier et Etchemin ne font pas partie des rivières auxquelles s'approvisionnent présentement les municipalités à l'étude, mais les séries ont tout de même été préparées dans l'éventualité où ces rivières pourraient être considérées par des mesures d'adaptation. Les autres rivières de la Côte-de-Beaupré, soit les rivières Ferrée, aux Chiens et Sault-à-la-Puce, sont de trop petite taille et ne sont pas considérées dans l'Atlas. Pour les fins de l'analyse de la vulnérabilité, les données de l'Atlas hydroclimatique 2018 ont été acquises sous la forme de séries de débits journaliers entre 2021 et 2050. Cela permet, d'une part, d'analyser l'évolution continue du risque et, d'autre part, d'optimiser le moment de mise en œuvre des mesures correctives, s'il y a lieu.

[4] Deux rivières de la région de Québec portent le nom de Sainte-Anne. La rivière dans cette étude est celle dont l'exutoire se trouve dans la ville de Beaupré.

2.1.2.2 Post-traitement des séries de débit

Il existe de nombreuses limitations à utiliser directement des séries de débits journaliers, lorsque le modèle hydrologique est alimenté par des MCG plutôt que par des observations. Les limitations les plus significatives sont décrites à la Section 2.1.2.3. De plus, notre étude s'intéresse aux faibles débits, dont la modélisation peut s'avérer complexe même avec des jeux de données optimaux.

Pour cette raison, un post-traitement supplémentaire a été appliqué aux débits eux-mêmes, afin de réduire le biais[5] et de mieux représenter les étiages futurs et les seuils critiques associés à l'approvisionnement en eau potable. Il n'existe toutefois pas de méthode documentée de correction de biais des débits spécifique aux études hydroclimatiques. Pour les fins de l'étude, nous avons donc répliqué les techniques de correction de biais des débits employées actuellement dans le domaine de la prévision hydrologique d'ensemble (Snover et al., 2003; Yuan et Wood, 2012; Ye et al., 2014; 2015). Des vérifications effectuées sur les débits post-traités semblent confirmer que les données corrigées représentent correctement la réalité de terrain.

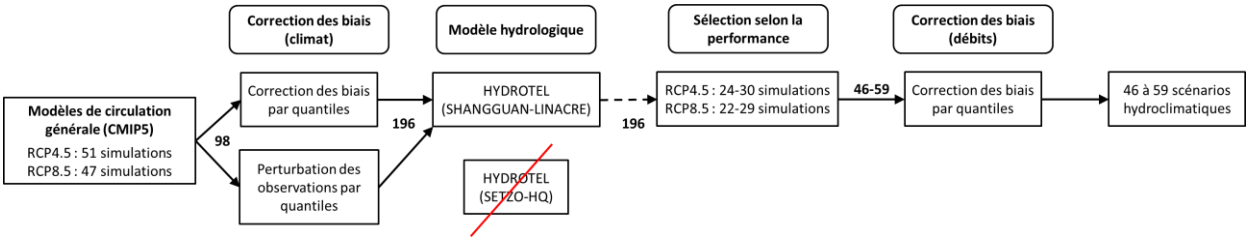


Figure 6. Schéma de production des scénarios hydrologiques.

Les détails méthodologiques pour l'ensemble des étapes requises pour la production des scénarios hydroclimatiques sont décrits à l'Annexe 1 et schématisés à la Figure 6. Les deux modèles hydrologiques dans la figure représentent les deux plateformes de calcul développées par la DEH. Tel qu'indiqué à la Section 2.1.2.1, seule la plateforme SHANGGUAN-LINACRE a été utilisée pour l'étude. La plateforme Hydrotel SETZO-HQ a été retiré pour des raisons de performance.

[5] En science du climat, le biais représente les différences entre les statistiques (moyenne et écart-type) des données simulées par rapport aux données observées. Les statistiques sont habituellement calculées à partir de 30 années de données.

Cette méthodologie a impliqué de ne garder que les modèles climatiques les plus performants lors de la modélisation hydrologique. En raison des buts de l'étude, les critères de performance ont été établis en fonction de la capacité des scénarios hydroclimatiques à reproduire la fréquence, la durée et la sévérité des étiages historiques. Plus de détails sont fournis à l'Annexe 1. La « perturbation des observations par quantiles » crée de nombreux doublons (scénarios climatiques pratiquement identiques). Pour les fins de l'analyse probabiliste, seule la perturbation la plus performante a été retenue, ce qui explique la baisse significative du nombre de simulations entre la 2e et la 3e étape. Au total, entre 46 et 59 simulations ont été retenues pour chaque région. Elles sont listées à l'Annexe 1.

2.1.2.3 Limites et avertissements

En raison de la portée de l'étude, il n'était pas possible d'implanter un modèle hydrologique sur le territoire de la CMQ afin d'étudier directement l'impact des changements climatiques sur les étiages futurs. Une méthodologie alternative, qui utilise les résultats de l'Atlas hydroclimatique du MELCC, a donc dû être développée (voir les sections précédentes). Même s'il peut être noté que les débits produits par l'Atlas sont généralement adéquats, les besoins précis de notre étude ont justifié un travail supplémentaire de post-traitement des séries de débits simulés. La présente section détaille les diverses limitations qui expliquent le raisonnement derrière ce travail supplémentaire, ainsi que les implications de ne pas avoir pu explicitement modéliser certaines petites rivières. Il est toutefois important de souligner que plusieurs vérifications ont été effectuées sur les jeux de données finaux et que, à notre connaissance, notre méthodologie peut être adéquatement utilisée pour l'évaluation du risque futur de pénuries d'eau dans les rivières de la région de Québec.

L'Atlas hydroclimatique est basé sur un ensemble de modèles de circulation générale, et présente donc une vision plus « globale » de l'impact des changements climatiques sur le régime hydrique des rivières du Québec. Par conséquent, la performance hydrologique est meilleure pour les rivières qui respectent les critères suivants :

- Bassin versant de 500 km² et plus
- Rivière naturelle ou influencée journellement[6]
- Rivière bien représentée par la plateforme de modélisation hydrologique
- Données d'observation disponibles entre 1970 et 2000

[6] Nomenclature de la DEH : Mouvement de l'eau dans une rivière ou un cours d'eau qui subit des modifications en raison de la présence de structures de retenue ou de régularisation de l'écoulement comme des digues ou des barrages. Un régime d'écoulement influencé journellement implique des interventions quotidiennes sur la structure de retenue modifiant l'écoulement. L'alternative serait un régime d'écoulement influencé mensuellement ou annuellement, ce qui suppose une capacité de stockage importante et un décalage significatif entre les conditions météorologiques et le débit dans la rivière.

Parmi les rivières choisies pour notre étude, seule la rivière Chaudière respecte tous ces critères.

Dans la région de Québec, la représentation des rivières dans la plateforme de modélisation hydrologique est souvent déficiente, en raison de tronçons manquants. Il s'agit de la raison pour laquelle la rivière Montmorency ne faisait pas partie de l'édition 2015 de l'Atlas, où il avait été choisi d'exclure les rivières ne répondant pas aux quatre critères. La rivière Sainte-Anne (à Beaupré), quant à elle, ne possède pas de station hydrométrique. Finalement, la rivière Saint-Charles est influencée par le barrage Cyrille-Delage, au lac Saint-Charles, et son bassin versant possède une superficie légèrement trop faible.

Ces limitations impliquent que le débit des rivières dans l'Atlas peut avoir des différences significatives par rapport à la réalité. Ceci explique pourquoi les débits produits dans le cadre de l'Atlas hydroclimatique sont généralement fournis sous la forme d'indicateurs de changements et de changements relatifs entre la période de référence et une période future, puisque les biais ont peu d'incidence sur les valeurs de changement (Seiller et al., 2017). Les séries quotidiennes de débits, quant à elles, peuvent avoir des biais relativement importants. C'est notamment le cas pour les petits bassins versants ou les bassins très hétérogènes, puisque l'Atlas est alimenté par des modèles climatiques à faible résolution. Toutefois, dans le cadre de l'étude actuelle, des débits journaliers étaient nécessaires à la réalisation de l'analyse de vulnérabilité. Ces séries ont été obtenues auprès de la DEH, mais ont demandé un travail supplémentaire pour corriger les biais.

En particulier, il a été noté que la rivière Saint-Charles, dans l'Atlas hydroclimatique, est beaucoup trop réactive et « bruitée », probablement dû à sa taille réduite et au pourcentage élevé d'urbanisation, en plus d'avoir un débit moyen plus élevé que celui observé. La correction des biais permet de réduire l'erreur, mais il convient de rester prudent dans l'interprétation des résultats. Toutefois, une étude récente dans laquelle le bassin versant de l'UPE de Québec a été modélisé arrive à des conclusions similaires aux nôtres quant à l'impact des changements climatiques sur les étiages futurs de la rivière Saint-Charles et sur l'approvisionnement en eau de la Ville de Québec (Foulon *et al.*, 2018). Le post-traitement des débits de l'Atlas hydroclimatique semble donc produire des résultats adéquats.

Les petites rivières, telles que les rivières Ferrée, Sault-à-la-Puce et aux Chiens, n'apparaissent pas du tout dans la plateforme de la DEH, puisque les bassins versants sont de très petite taille (moins de 100 km²). Dans le cas de la rivière Ferrée, il existe toutefois une relation empirique, développée par un ancien employé de la CMQ, qui relie le débit de la Ferrée à celui de la rivière Montmorency (conversation avec Stéphane Dompierre (Municipalité de Boischatel), 2017). Cette relation a pu être reconstruite dans le cadre de notre étude, mais souffre de plusieurs limitations. Elle suppose notamment que la relation entre les rivières Montmorency et Ferrée demeurera constante malgré un climat changeant et un changement dans l'urbanisation du territoire. Or, l'impact des changements de température, de précipitations et

d'évapotranspiration est beaucoup plus variable pour les petits bassins versants et demanderait une modélisation hydrologique poussée qui va au-delà de notre mandat actuel. Par conséquent, les débits de la rivière Ferrée doivent être utilisés avec prudence et servent principalement à obtenir un portait général de la vulnérabilité de la rivière.

D'une manière similaire, il est important de souligner que le comportement hydrologique d'un bassin versant est fortement dépendant de la composition de l'environnement bâti et des infrastructures présentes sur le territoire. Bien que l'occupation du territoire soit vouée à changer au cours des trente prochaines années, les simulations de l'Atlas hydroclimatique supposent le *statu quo*. Par exemple, à Boischatel, la croissance importante de la population prévue sur l'horizon d'étude affectera nécessairement l'environnement bâti, qui à son tour pourrait affecter le régime hydrologique. La méthodologie actuelle demeure toutefois adéquate pour identifier les municipalités de la CMQ les plus à risque de pénuries futures. Au besoin, la pertinence d'utiliser des hypothèses plus élaborées pourra être réévaluée.

Finalement, il convient de noter qu'il n'existe pas, pour toutes les rivières de la Côte-de-Beaupré (rivière Ferrée pour Boischatel, Sault-à-la-Puce pour Château-Richer et Sainte-Anne pour Beaupré), des données d'observation ou un système de suivi permettant d'avoir une donnée fiable quant aux débits réels qui permettrait de calibrer une éventuelle modélisation hydrologique. Il importe d'en tenir compte dans l'interprétation des résultats des analyses.

2.1.2.4 Prise en compte du barrage Cyrille-Delage

La correction de biais, détaillée à la Section 2.1.2.2, a l'avantage d'intégrer les observations dans les débits simulés. Par conséquent, la gestion historique des barrages, tel que le barrage Cyrille-Delage situé à l'exutoire du lac Saint-Charles, est indirectement prise en compte (Ye et al., 2015). Il est toutefois à noter qu'en raison des années de simulation utilisées par la DEH, la période de référence est de 1971 à 2000. Un changement marqué avait été observé dans la gestion des étiages par le barrage Cyrille-Delage vers les années 2000, suite à une nouvelle réglementation (Ouranos, 2016). Cette nouvelle gestion n'est donc pas prise en compte. De plus, depuis quelques années, les gestionnaires du barrage Cyrille-Delage reçoivent quotidiennement une prévision des apports au lac Saint-Charles pour les prochains 7 jours. Lors des étiages, les opérations au barrage sont principalement guidées par cette prévision, produite par le MELCC (conversation avec Louis Collin (Ville de Québec), 2017). Pour l'instant, il n'a pas été jugé nécessaire d'intégrer cette prévision des apports dans notre analyse de vulnérabilité, puisque des rencontres avec les gestionnaires du barrage Cyrille-Delage ont permis de mieux comprendre les actions qui sont prises lors d'étiages, dont ceux de 2002 et 2010 et, plus récemment, de septembre 2017. Conséquemment, l'analyse actuelle juge de la « difficulté à gérer l'étiage » en fonction des conditions météorologiques (températures maximales, précipitations, estimation de l'humidité du sol), plutôt que de tenter de prédire les opérations au barrage.

À titre d'exemple, l'été 2002 comptait 42 jours consécutifs sans précipitations. Cet été a été critique au lac Saint-Charles et pour l'approvisionnement de la Ville de Québec, notamment parce que les interconnexions entre les réseaux de distribution de la Ville avaient des capacités de transfert limitées. D'une manière similaire, le mois de septembre 2017 a vu 17 jours sans précipitations (4 mm sur 19 jours) et des températures maximales au-dessus de 20°C. Cela a été moins critique qu'en 2002, mais l'interconnexion avec le réseau de Sainte-Foy a été ouverte après une dizaine de jours de températures élevées sans précipitations. Selon les gestionnaires du barrage Cyrille-Delage, une précipitation d'environ 20 mm sur l'ensemble du territoire permet de remplir le lac Saint-Charles après une période d'étiage.

Par conséquent, les étiages présents dans les séries simulées pourront être rétroactivement qualifiés et classés en fonction de :

- Précipitation moyenne depuis la dernière pluie de 10 mm ou plus
- Nombre de jours depuis la dernière précipitation de 10 mm ou plus
- Nombre de jours depuis la dernière précipitation de 20 mm ou plus
- Température maximale moyenne de la période sans pluie de 10 mm ou plus

Ces quatre paramètres ont été sélectionnés suite à des discussions avec les gestionnaires du barrage Cyrille-Delage. Ils permettent également de juger de la sévérité d'un épisode de sécheresse et d'estimer les conditions d'humidité du sol.

Tableau 7. Calcul de la sévérité des étiages en fonction de la capacité de gestion du barrage Cyrille-Delage

Pointage	**Précipitations moyennes**	**Température maximale moyenne**
0	> 1,25 mm/jour	< 15°C
1	Entre 1 et 1,25 mm/jour	Entre 15 et 20°C
2	Entre 0,75 et 1 mm/jour	Entre 20 et 25°C
3	Entre 0,50 et 0,75 mm/jour	Entre 25 et 30°C
4	< 0,5 mm/jour	> 30°C
	Nombre de jours (n) depuis la dernière pluie de 10 mm	**Nombre de jours (n) depuis la dernière pluie de 20 mm**
Formule	$(n/7)$	$(n/21)$

Le système de pointage, ainsi que les deux formules utilisées pour le nombre de jours depuis une précipitation importante, ont été empiriquement calibrés à l'aide des étiages historiquement critiques. Ce système de pointage est utilisé plus loin dans ce rapport afin de quantifier les moments lors desquels les séries futures de températures et de précipitations indiquent une problématique potentielle de manque

d'eau. Comme le mandat de l'étude actuelle ne permettait pas une modélisation explicite de la rivière Saint-Charles ou du barrage Cyrille-Delage, ce système de pointage a pour but d'effectuer une approximation de l'influence de la gestion du barrage sur le risque de pénuries futur à l'UPE de Québec, en donnant un score élevé aux conditions météorologiques ayant historiquement provoqué des étiages critiques.

Selon cette formulation, l'étiage de 2002 aurait eu un score de 16,05 à son maximum : 0,72 mm/jour de précipitations (+3) et température maximale moyenne de 25,7°C (+3) depuis la dernière pluie de 10 mm ou plus, 42 jours depuis la dernière pluie de 10 mm (+6), 85 jours depuis la dernière pluie de 20 mm (+4,05). Ce score se situe en queue de distribution par rapport aux données historiques, ce qui confirme qu'il s'agissait d'un événement exceptionnel.

En contrepartie, l'étiage de 2010 aurait plutôt eu un score de 7,95 : 1,55 mm/jour de précipitations (+0) et température maximale moyenne de 26,6°C (+3) depuis la dernière pluie de 10 mm ou plus, 22 jours depuis la dernière pluie de 10 mm (+3,14), 38 jours depuis la dernière pluie de 20 mm (+1,81).

2.1.3 SCÉNARIOS DE CONSOMMATION D'EAU POTABLE

Parallèlement aux scénarios hydrologiques, une projection de la consommation d'eau potable future est réalisée. La demande en eau potable est influencée par un ensemble de facteurs qui englobent, d'une part, l'évolution démographique et l'occupation du territoire et, d'autre part, l'évolution des besoins et des comportements relatifs à la consommation dans un contexte climatique en évolution.

La projection de la demande en eau potable est réalisée séparément pour chacune des unités territoriales. Elle servira par la suite à arrimer les résultats de demande avec les capacités d'approvisionnement sur chaque territoire, afin de calculer les occurrences et la sévérité des pénuries.

La méthodologie de projection s'appuie sur une estimation statistique de la relation qui unit les conditions météorologiques quotidiennes (température, précipitations, humidité, etc.) à la consommation journalière observée. Les prochains paragraphes décrivent en détail comment est projetée l'évolution de la demande en eau dans le futur en fonction des différents facteurs d'influence.

2.1.3.1 Estimation de l'effet des conditions météorologiques sur la consommation d'eau potable

Des analyses statistiques sur les quantités d'eau quotidiennes distribuées permettent d'établir les relations entre les conditions météorologiques et la consommation d'eau potable pour chaque réseau. La modélisation vient contrôler pour les autres facteurs influençant la consommation, dont les effets de calendrier (semaine, fin de semaine, journées fériées et saisonnalité), les fuites dans le réseau, l'accroissement de la population, etc. Une fois les relations établies, les mêmes scénarios climatiques ayant

servi à générer les scénarios hydrologiques sont utilisés pour projeter les consommations quotidiennes futures pour chacun des scénarios retenus.

À titre d'exemple, la Figure 7 présente la relation qui unit la consommation quotidienne par personne et la température maximale journalière. Ces graphiques démontrent très clairement qu'une température maximale journalière au-dessus de 20 degrés fait grimper la consommation quotidienne d'eau potable pour les municipalités à l'étude.

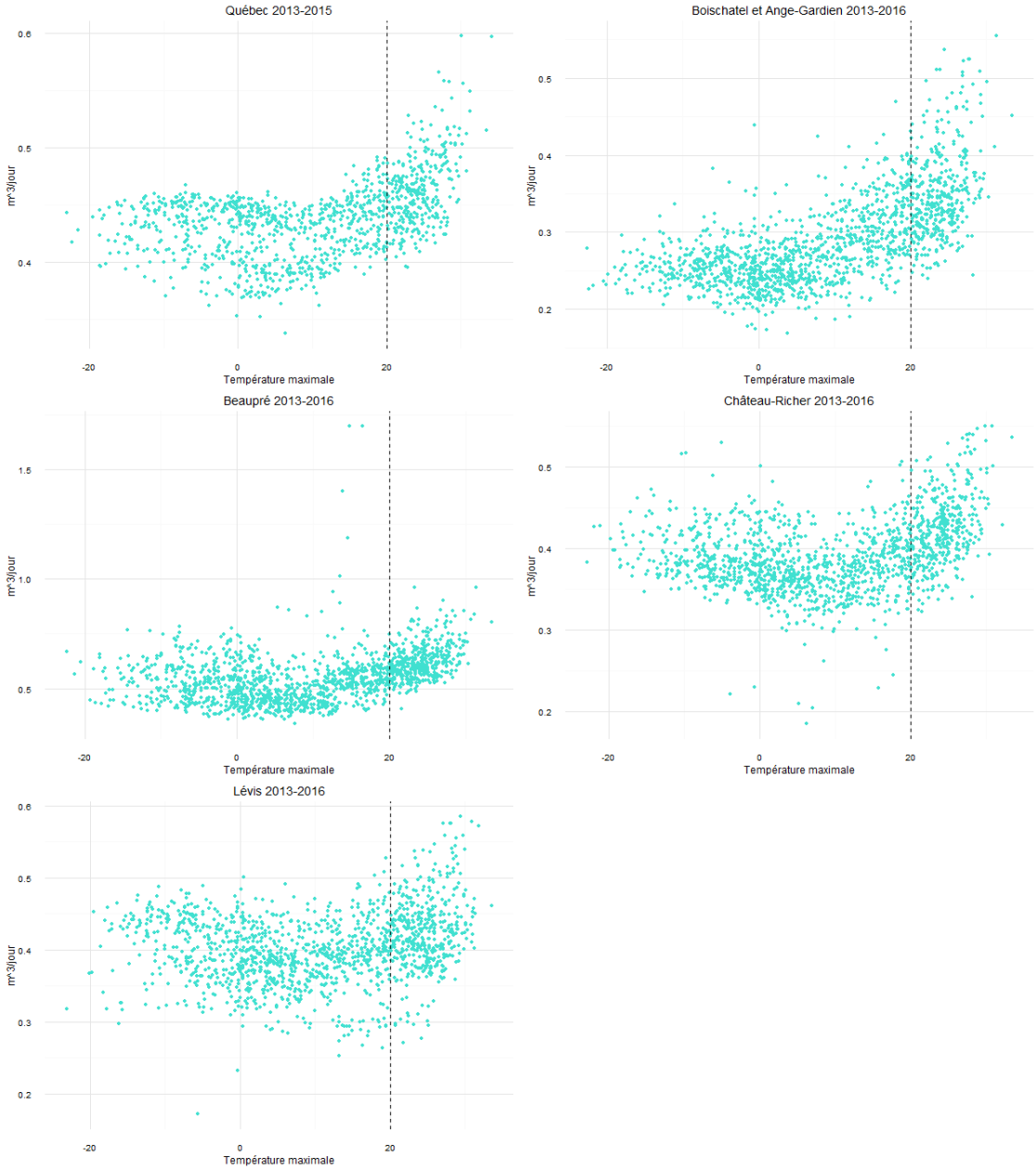


Figure 7. Relation entre consommation quotidienne par personne et la température maximale pour Québec, Boischatel et L'Ange-Gardien, Beaupré, Château-Richer et Lévis.

Pour chacun des réseaux d'approvisionnement en eau, des estimations par régression linéaire ont été réalisées. Les spécificités et caractéristiques de chaque réseau ont été tenues en compte à travers le choix des variables explicatives[7], car chaque réseau possède sa propre sensibilité et ses spécificités en lien avec la consommation d'eau potable. Pour l'essentiel, les variables suivantes ont été intégrées comme variable explicative :

- Température maximale journalière
- Précipitations
- Cumul du nombre de jours sans pluie
- Cumul de neige pour l'hiver précédent
- Indice de chaleur extrême (trois jours consécutifs au-dessus de 27 °C)
- Journée chaude (au-dessus de 25 °C)
- Projection de temps chaud (deux prochains jours au-dessus de 25 °C)
- Effet de calendrier (journées de semaine et journées fériées)
- Effet de saisonnalité
- Effet fixe d'année

La variable dépendante, soit la consommation quotidienne par habitant a été log-linéarisée afin de tenir compte des effets non linéaires des paramètres météorologiques sur la consommation des individus, entre autres observés à la Figure 7.

Le pouvoir explicatif des modèles est élevé, se situant entre 0,65 et 0,85 (R^2) pour chacun des réseaux. La Figure 8 présente les quantités d'eau distribuées observées en comparaison de celles prédites par le modèle pour l'année 2016 à Boischatel. Ce profil de consommation est assez typique de ce qu'on retrouve dans les municipalités du Québec où les pointes de consommation se produisent en période estivale au moment même où la disponibilité en rivière est la plus faible.

Le modèle prédit globalement bien les quantités d'eau distribuées, bien qu'il tende à ne pas capter toute la variabilité dans les observations. Le modèle est en mesure de prévoir les pointes de consommation estivale et donc de projeter l'effet du réchauffement des températures sur la consommation, en lien avec l'accroissement de la consommation lors des périodes de canicules et d'absence prolongée de précipitations.

[7] Les tableaux de régression n'ont pas été intégrés directement dans le rapport pour fins de concision, mais sont disponibles sur demande.

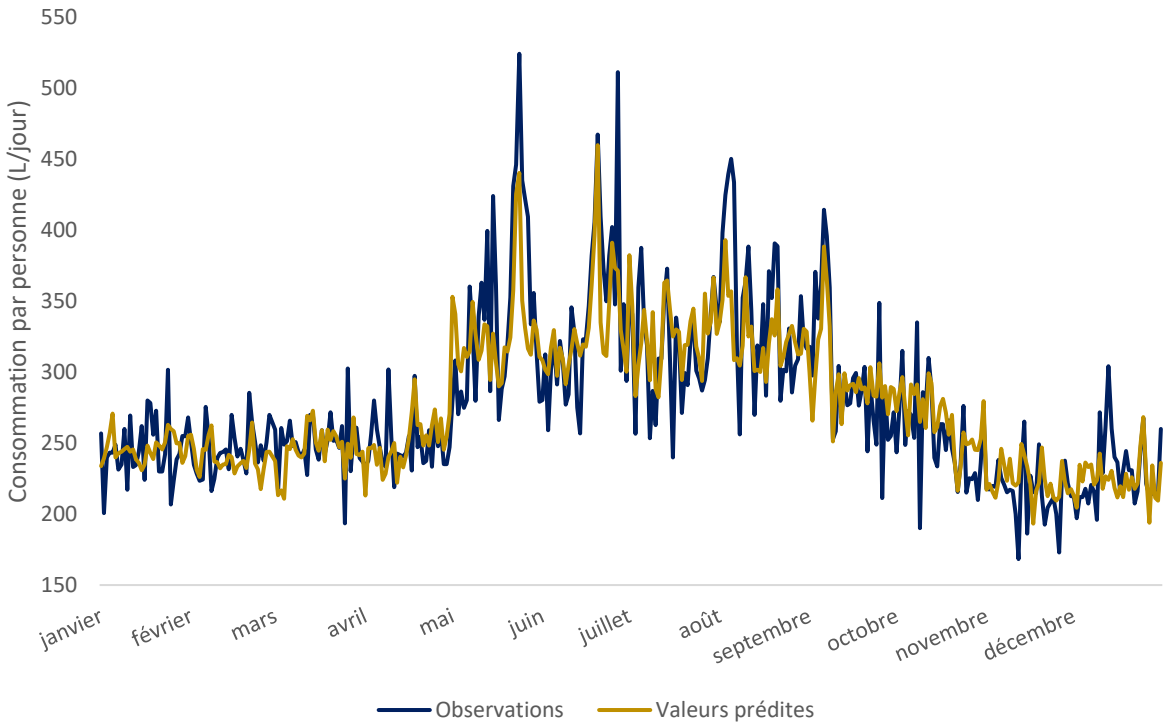


Figure 8. Consommation d'eau par personne observée (bleu) et modélisée (or) pour l'année 2016 à Boischatel.

Cette modélisation de la quantité d'eau distribuée par personne est ensuite utilisée pour projeter la consommation future d'eau potable grâce aux scénarios climatiques. Ces projections doivent non seulement tenir compte des relations entre le climat et la quantité d'eau demandée, mais également des projections de population, de croissance des secteurs institutionnel, commercial et industriel et de l'évolution dans les taux de fuite dans les réseaux, car les quantités d'eau modélisées sont les quantités distribuées et non pas strictement consommées. La prochaine section détaille la méthode de projection démographique et d'occupation du territoire.

2.1.4 PROJECTIONS DÉMOGRAPHIQUES ET D'OCCUPATION DU TERRITOIRE

2.1.4.1 Scénarios d'évolution de la population

Pour projeter la demande totale par municipalité, il faut inclure des projections démographiques et d'occupation du territoire. Au Québec, l'Institut de la statistique du Québec (ISQ) génère des projections démographiques pour la province, de même que pour chacune des municipalités sur le territoire. Les scénarios offrent un aperçu de l'évolution vraisemblable de la population québécoise entre 2011 et 2061, basée sur les tendances récentes (Institut de la statistique du Québec, 2014). Ces scénarios ont été utilisés

et combinés à d'autres sources de données afin de générer des projections de population par municipalité pour Beaupré, Château-Richer, Boischatel, L'Ange-Gardien, Lévis et Québec.

Bien que l'ISQ produise des scénarios d'évolution de la population québécoise à l'horizon 2061, les projections de population à l'échelle des municipalités sont disponibles à un intervalle de 5 ans et seulement jusqu'en 2031. Afin d'extrapoler les taux d'évolution des populations municipales, la population pour 2036 est obtenue en ajustant le taux de croissance de la municipalité entre 2026 et 2031 par le taux de variation de la croissance de la population prévue à l'échelle de la région administrative de la Capitale Nationale (RMRQ et hors RMRQ). Pour 2036-2050, le taux de croissance de la population de 2031 à 2036 est supposé constant. Cette projection est définie comme le scénario de référence.

Nous construisons également des scénarios faibles et forts à partir des données de l'ISQ. Les scénarios comportant de telles variations sont disponibles uniquement pour la région administrative jusqu'en 2036. Le rapport entre les scénarios faibles, forts et de référence est appliqué aux scénarios tels que construits et rapportés sur une base annuelle. Au-delà de 2036, on utilise le taux de variation de la croissance de population de chaque scénario pour 2031-2036 pour établir les trajectoires des scénarios faibles et forts.

Tableau 8. Scénarios de référence d'évolution des populations

	Beau.	C-R	Bois / A-G	Lévis			Québec			
				Char.	Desj.	St-Rom.	Qué.	Ste-Foy	Charl.	Beau
2020	3 938	4 206	11 841	54 129	55 441	31 060	315 081	113 860	82 500	85 609
2025	4 173	4 346	13 517	56 173	57 817	32 582	322 667	117 815	83 872	88 781
2030	4 312	4 434	14 552	58 295	60 296	34 179	329 192	121 362	85 152	91 618
2035	4 412	4 503	15 425	60 496	62 880	35 855	334 196	124 083	86 131	93 796
2040	4 510	4 570	16 325	62 781	65 575	37 613	338 239	126 293	86 921	95 564
2045	4 610	4 638	17 275	65 152	68 386	39 456	342 158	128 448	87 684	97 290
2050	4 713	4 707	18 376	67 613	71 318	41 391	346 122	130 640	88 454	99 047

Les scénarios pour la Ville de Québec ont été construits différemment. Les projections de population ont été établies par une collaboration entre la Division de la planification de la fonctionnalité des infrastructures (ingénierie) et la Division de la planification stratégique du territoire (urbanisme) dans le cadre du projet. Les prévisions ont été intégrées dans les activités courantes de la Division de la planification de la fonctionnalité des infrastructures. Les projections sont basées sur les données de l'ISQ. Les variations de population attendues sont réparties entre les différents arrondissements en se basant sur l'évaluation des logements et terrains disponibles sur le territoire. Ainsi, la densité urbaine et l'offre potentielle de nouveaux lotissements sont prises en compte, ainsi qu'une certaine proportion de densification sans utilisation de nouveaux lotissements.

La stratégie retenue pour créer des scénarios faibles et forts pour les municipalités est reproduite pour les réseaux de distribution de la Ville de Québec.

Les Tableau 8-10 résument les scénarios d'évolution de population employés pour chacun des réseaux de distribution à l'étude.

Tableau 9. Scénarios faibles d'évolution des populations

	Beau.	C-R	Bois / A-G	Lévis			Québec			
				Char.	Desj.	St-Rom.	Qué.	Ste-Foy	Charl.	Beau
2020	3 916	4 183	11 776	53 224	54 460	30 474	312 115	112 788	81 723	84 803
2025	4 112	4 283	13 321	54 521	56 061	31 555	315 505	115 200	82 010	86 810
2030	4 202	4 321	14 181	55 803	57 662	32 648	317 467	117 040	82 119	88 355
2035	4 243	4 331	14 835	57 058	59 248	33 744	317 547	117 901	81 840	89 123
2040	4 278	4 335	15 486	58 317	60 853	34 863	316 529	118 187	81 342	89 431
2045	4 314	4 340	16 164	59 612	62 510	36 024	315 392	118 400	80 825	89 680
2050	4 349	4 344	16 958	60 935	64 211	37 223	314 260	118 614	80 311	89 929

Tableau 10. Scénarios forts d'évolution des populations

	Beau.	C-R	Bois / A-G	Lévis			Québec			
				Char.	Desj.	St-Rom.	Qué.	Ste-Foy	Charl.	Beau
2020	3 961	4 231	11 910	54 380	55 643	31 136	318 898	115 239	83 499	86 646
2025	4 240	4 416	13 734	57 427	59 050	33 238	332 324	121 341	86 382	91 438
2030	4 434	4 560	14 965	60 616	62 635	35 464	344 844	127 133	89 201	95 975
2035	4 600	4 695	16 085	63 979	66 435	37 837	356 064	132 202	91 767	99 933
2040	4 770	4 834	17 267	67 536	70 472	40 374	366 561	136 868	94 199	103 567
2045	4 945	4 975	18 529	71 287	74 753	43 079	377 164	141 590	96 655	107 244
2050	5 125	5 120	19 985	75 247	79 293	45 965	388 073	146 474	99 174	111 052

2.1.4.2 Scénarios d'évolution des secteurs institutionnel, commercial et industriel

La consommation résidentielle ne constitue pas l'entièreté de l'eau potable consommée au sein des municipalités étudiées. Plusieurs institutions, commerces et industries sont alimentés par le réseau d'approvisionnement municipal. Les analyses statistiques de consommation sont réalisées sur les quantités d'eau distribuée totales, qui incluent donc à la fois la consommation résidentielle, commerciale, institutionnelle et industrielle.

Nous posons l'hypothèse que la consommation en eau potable des ICI suit proportionnellement la consommation des citoyens des municipalités étudiées. Lorsqu'on projette la demande future, cela implique que nous supposons une stabilité des secteurs ICI et donc aucune ouverture ou fermeture majeure au sein des municipalités. Cette hypothèse est assez réaliste pour les municipalités de la Côte-de-Beaupré, car le secteur ICI représente une relativement faible portion de l'eau distribuée. Il y a également peu d'industrie, de commerces, d'hébergement touristique ou d'institutions sur ce territoire, à l'exception du tourisme hivernal qu'amène le Mont-Sainte-Anne.

La situation est différente pour Québec et Lévis, qui possèdent toutes deux d'importants quartiers industriels, de nombreux commerces et des institutions réparties sur leur territoire. Des discussions ont eu lieu avec les équipes d'urbanisme et d'aménagement du territoire de Québec et Lévis afin d'évaluer l'évolution anticipée de ces secteurs de consommation. Sur la base de ces discussions et dans certains cas de l'analyse des projections d'évolution projetées des superficies de plancher commercial et industriel et des consommations unitaires par m² de superficie, il semble réaliste de poser l'hypothèse d'une croissance proportionnelle à la consommation résidentielle des ICI pour Québec et Lévis également.

2.1.5 AUTRES PARAMÈTRES DE PROJECTION

L'utilisation de données sur les quantités d'eau distribuées plutôt que consommées fait en sorte que nos estimations incluent les fuites d'eau dans le réseau. Bien que la Politique nationale de l'eau via la Stratégie québécoise d'économie d'eau potable ait favorisé la prise d'action en matière de recherche et colmatage de fuites, les réseaux d'approvisionnement ne sont jamais étanches à 100 %. En 2014, les pertes d'eau estimées étaient de 21,2 %, 26,5 %, 17,1 %, 14,3 %, 37,2 % pour Québec, Lévis, Beaupré, Boischatel et Château-Richer respectivement (MAMH, 2017). Les pertes d'eau sont évaluées par le MAMH comme le rapport de la plus faible consommation de nuit pendant l'année sur le débit moyen annuel. Nous supposons ce taux de fuite constant sur l'année en période historique, sauf pour les événements majeurs de fuite qui nous ont été rapportés.

Lors de l'analyse de la vulnérabilité des systèmes, nous supposons que les taux de fuite dans les systèmes d'approvisionnement restent constants à ce qui a été enregistré lors de l'année 2016. En contrepartie, la recherche de fuites et le colmatage, de même que le remplacement des conduites vieillissantes, pourraient être analysés comme une mesure d'adaptation permettant de réduire la quantité d'eau devant être distribuée, et donc soutirée des cours d'eau. Ces mesures pourraient d'ailleurs s'inscrire dans la nouvelle mouture de la Stratégie québécoise d'économie d'eau potable du MAMH, qui devrait être rendue publique prochainement.

Cette hypothèse peut sembler forte en considération des objectifs prévus dans la Stratégie, toutefois nous considérons que de poser cette hypothèse permet d'adopter une approche conservatrice à l'analyse de la

problématique. Elle est assez cohérente également avec le fait que dans certaines villes, les taux de fuite ont atteint des niveaux qui sont considérés comme relativement optimaux en ce sens qu'il est difficile de les réduire davantage à des coûts raisonnables.

2.1.6 PROJECTION DES RISQUES DE PÉNURIE

Les projections d'eau distribuée quotidiennement sur chacun des réseaux sont ensuite comparées aux projections hydrologiques afin d'évaluer le risque de pénurie d'eau potable. La Figure 9 illustre la manière dont les débits en rivière sont comparés à la demande en eau potable. Dans cette figure, il est possible de voir trois épisodes de pénuries d'eau qui surviennent au mois de juin et au début du mois de septembre (zones ombragées grises). Chacun de ces épisodes est identifié et quantifié (intensité et durée) afin de produire des statistiques permettant d'établir le risque de pénurie futur.

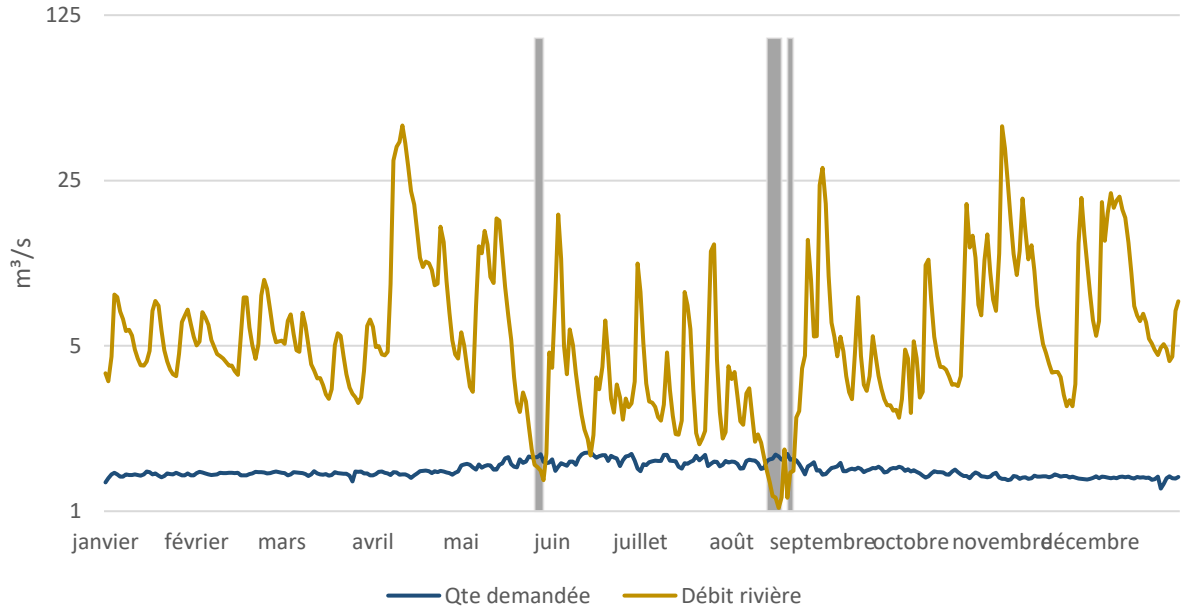


Figure 9. Comparaison des débits de la rivière Saint-Charles et de la demande en eau potable pour le réseau de Québec (Scénario hydroclimatique 2 (sur 56), année 2046)

La comparaison des conditions de demande et d'offre fournit une information sur la probabilité, l'intensité et la durée des risques de pénuries futures pour chaque municipalité. L'interprétation permet d'évaluer le niveau de risque et d'établir si la municipalité doit faire l'objet d'une analyse de mesures d'adaptation corrective à la lumière de sa vulnérabilité.

3. ANALYSE DE LA VULNÉRABILITÉ DES RÉSEAUX D'APPROVISIONNEMENT EN EAU POTABLE

L'analyse de la vulnérabilité se base sur le croisement des projections de consommation et des projections hydrologiques pour les cinq études de cas. Pour chacun des scénarios climatiques, la capacité de production d'eau potable quotidienne est comparée à la demande projetée en fonction des conditions climatiques, afin d'évaluer le risque de pénuries d'eau. La pénurie en eau est définie comme l'événement où les besoins en eau sont supérieurs à la capacité de production des usines de traitement de l'eau potable. Un portrait des vulnérabilités pour chacun des cinq systèmes d'approvisionnement en eau potable est dressé, permettant une meilleure compréhension des risques relatifs aux pénuries d'eau sur l'horizon temporel à l'étude et de leur gravité.

Afin d'évaluer la vulnérabilité des systèmes d'approvisionnement en eau des municipalités, différents critères de vulnérabilité ont été définis selon différents paramètres opérationnels, environnementaux et hydrologiques. Ces critères sont définis au Tableau 11.

Tableau 11. Critères d'analyse de la vulnérabilité des sources d'eau potable

Type de critère	Critères
Opérationnel	Demande en eau est supérieure à la capacité de production nominale de l'UPE
Hydrologique	Demande en eau est supérieure au débit en rivière
	Demande en eau totale (demande + débit incendie réservé) plus grande que débit en rivière ou capacité UPE
Environnemental	Demande en eau est supérieure au débit de soutirage autorisé pour le maintien des services aux écosystèmes (15 % du 7Q2[8])
	Débit résiduel inférieur au débit écologique (85 % du 7Q2[9])

Pour chacun de ces critères, des statistiques sont produites afin d'évaluer le nombre d'occurrences où ces critères sont atteints pour l'ensemble des scénarios climatiques pour la période 2021-2050.

[8] Débit minimal pour une période de 7 jours consécutifs, dont la période de retour est de 2 ans.

[9] Selon les cas, ces débits proviennent principalement de la littérature ou, dans quelques cas exceptionnels, sont calculés sur la base des données du MELCC.

Les données concernant les débits écologiques proviennent principalement de ce qui a été transmis par les villes étudiées (responsables des UPE ou autres répondants des municipalités et MRC participantes), ainsi que ce qui se trouve dans les Plans directeurs de l'eau des organismes de bassins versants. Voir l'annexe 2 pour plus de précisions sur les données utilisées.

Avant de présenter les résultats relatifs aux risques de pénuries, l'évolution des conditions hydroclimatiques est présentée brièvement.

3.1 PROJECTIONS HYDROCLIMATIQUES

3.1.1 PORTRAIT GÉNÉRAL DE L'ÉVOLUTION DES RIVIÈRES

Les changements aux débits moyens et aux étiages sont illustrés à la Figure 10 et à la Figure 11, respectivement. Bien que l'analyse du risque de pénuries futures utilise des débits quotidiens, ces figures peuvent aider à comprendre les résultats. La rivière Sault-à-la-Puce n'a pas été analysée dans le cadre de l'édition 2018 de l'Atlas hydroclimatique et possède un bassin versant de trop faible taille pour directement extrapoler les résultats des autres rivières. On peut toutefois poser comme hypothèse que les changements climatiques affecteront cette rivière d'une manière similaire.

Sur la période 2021-2050, l'impact des changements climatiques est plus variable que pour la période 2041-2070 précédemment utilisée dans les éditions 2013 et 2015 de l'Atlas hydroclimatique. Pour les décennies 2021-2050, la plateforme 2018 de la DEH pointe vers une modification des débits moyens en été allant d'une diminution de 15 à 30 %[10] en moyenne, jusqu'à une augmentation potentielle de l'ordre de 10 %, en comparaison avec la période 1971-2000. Cela s'explique par le contraste qu'amènent des températures estivales plus élevées qui induisent une évapotranspiration plus importante et une augmentation potentielle des précipitations et des phénomènes orageux. Pour les étiages, le consensus entre les modèles sur la direction des changements est plus élevé. On s'attend globalement à une diminution de 5 à 50 % des débits minimums.

En hiver, on s'attend généralement à une hausse des débits moyens de l'ordre de 20 à 80 % en raison de redoux plus fréquents. Toutefois, la concordance entre les modèles est plus faible pour les étiages. Ceux-ci pourraient être 30 % plus cléments comme ils pourraient être 10 % plus sévères. Cela s'explique par le fait que pendant la période 2021-2050, les hivers très froids sont encore relativement probables, alors que paradoxalement les redoux, la pluie hivernale et les épisodes de pluie sur neige pourraient également devenir plus communs.

[10] Les chiffres mentionnés se rapportent à la moitié des scénarios localisés autour des valeurs médianes de l'ensemble. De manière générale, les scénarios les plus extrêmes se situent à environ 20 % de part et d'autre des pourcentages indiqués.

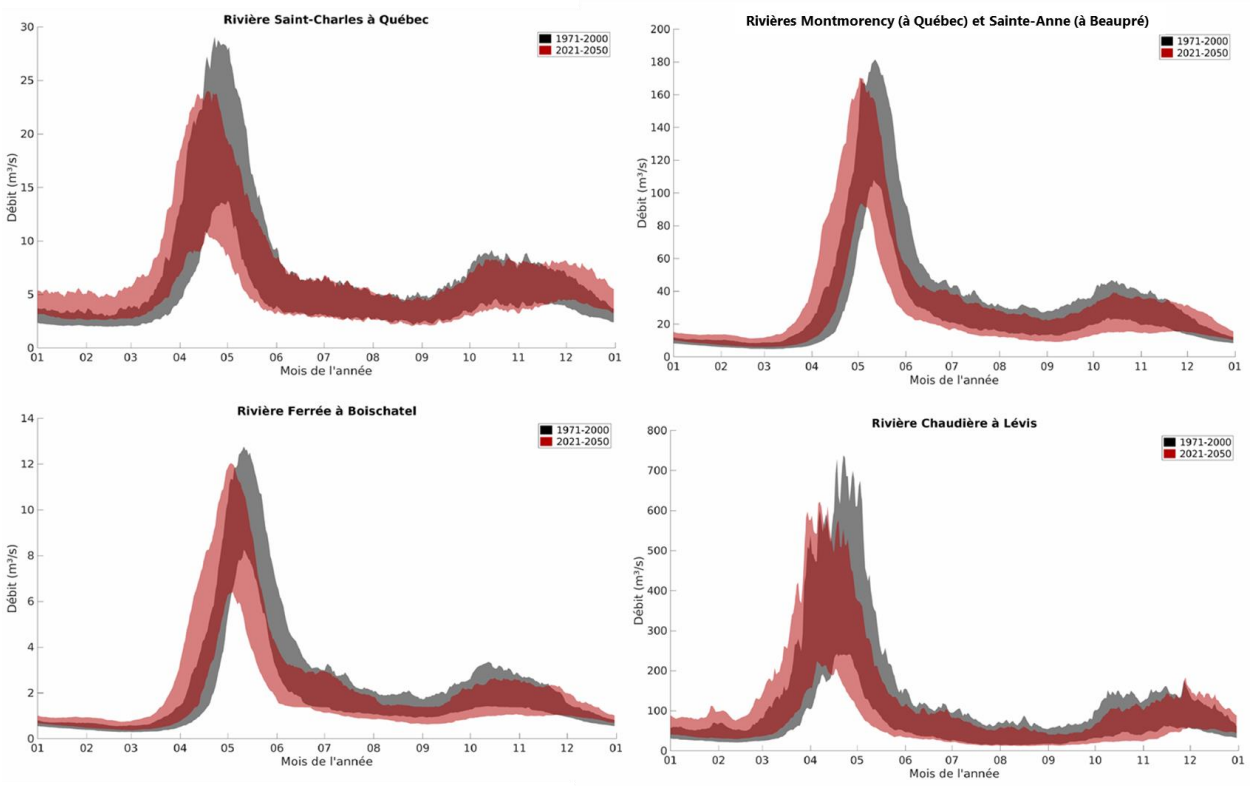


Figure 10. Projections hydrologiques pour les rivières Sainte-Charles, Montmorency, Ferrée et Chaudière. La figure présente les 25^{e} et 75^{e} percentiles de la distribution de débits (m³/s) pour les périodes de référence (1971-2000) et futures (2021-2050). Les changements pour la rivière Sainte-Anne correspondent à ceux de la rivière Montmorency.

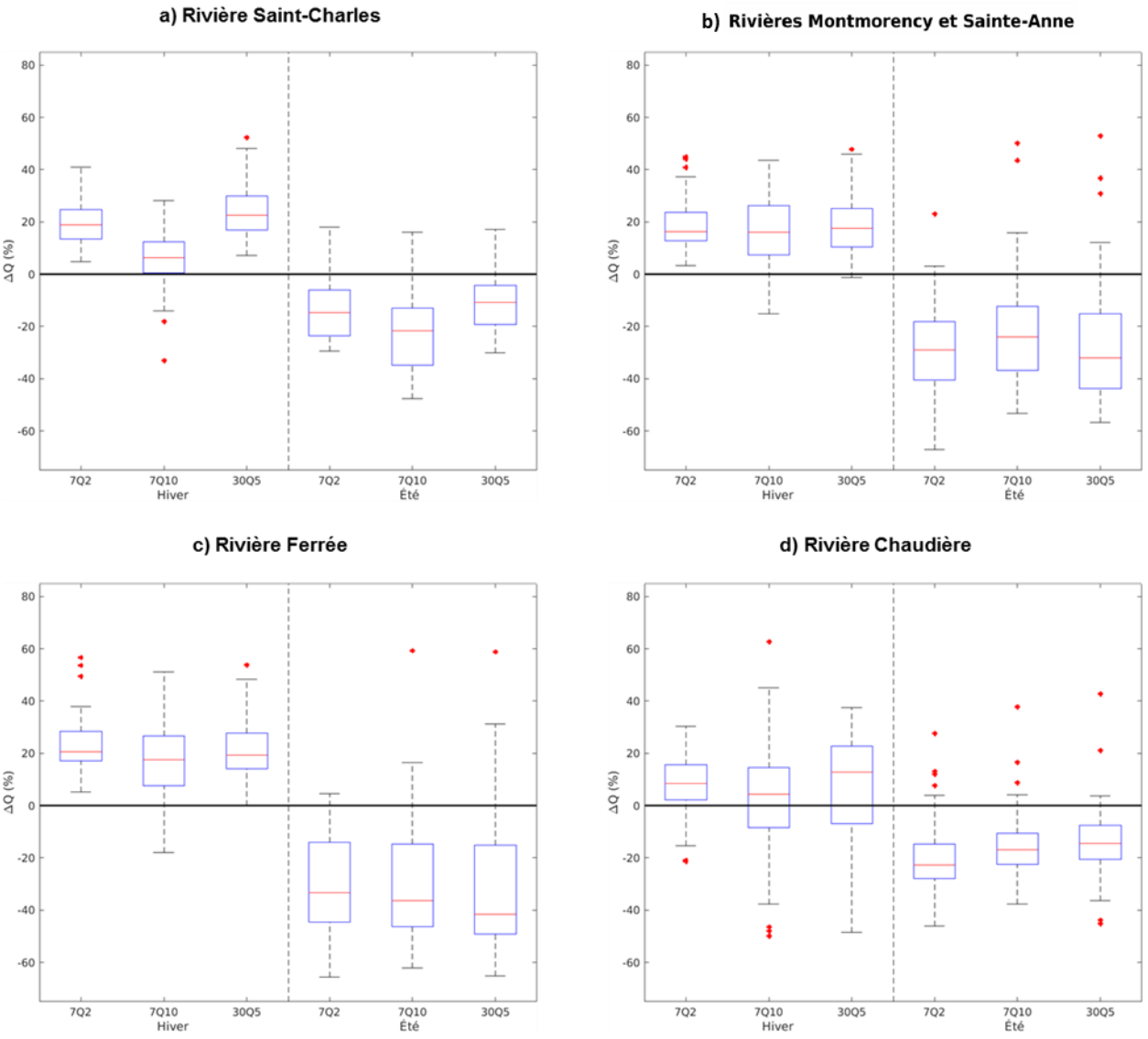


Figure 11. Projections hydrologiques des indicateurs d'étiage de l'Atlas hydroclimatique pour les rivières (a) Sainte-Charles, (b) Montmorency, (c) Ferrée et (d) Chaudière. La figure présente les changements (%) prévus entre les périodes de référence (1971-2000) et futures (2021-2050) pour divers indicateurs d'étiage[11]. Les changements pour la rivière Sainte-Anne correspondent à ceux de la rivière Montmorency. Chaque section de la boîte à moustache (boxplot) représente environ 25 % des données. La ligne rouge illustre donc la médiane. Les valeurs au-dessus (en dessous) du 95^{e} (5^{e}) centile sont illustrées séparément, à l'aide d'un point rouge.

[11] Le premier chiffre de l'indicateur d'étiage indique le nombre de jours consécutifs pour lequel le débit minimal est calculé, et le deuxième chiffre indique la période de retour. Par exemple, le débit 30Q5 est le débit minimal sur 30 jours, pour une période de retour de 5 ans.

3.1.2 INDICATEURS DE SÉVÉRITÉ DES ÉTIAGES FUTURS SUR LA RIVIÈRE SAINT-CHARLES

En raison de l'absence d'une modélisation hydrologique spécifique à la gestion du lac Saint-Charles, une analyse supplémentaire des données climatiques a été effectuée afin de comprendre si les épisodes du type de ceux vécus en 2002 et 2010 pour la région de Québec pourraient se produire plus ou moins souvent dans le futur. Tel que décrit à la Section 2.1.2.4, quatre indicateurs ont été identifiés grâce à des discussions avec les gestionnaires du barrage Cyrille-Delage, puis combinés empiriquement afin de donner un score de sévérité aux étiages observés dans les séries climatiques. Le résultat est identifié à la Figure 12.

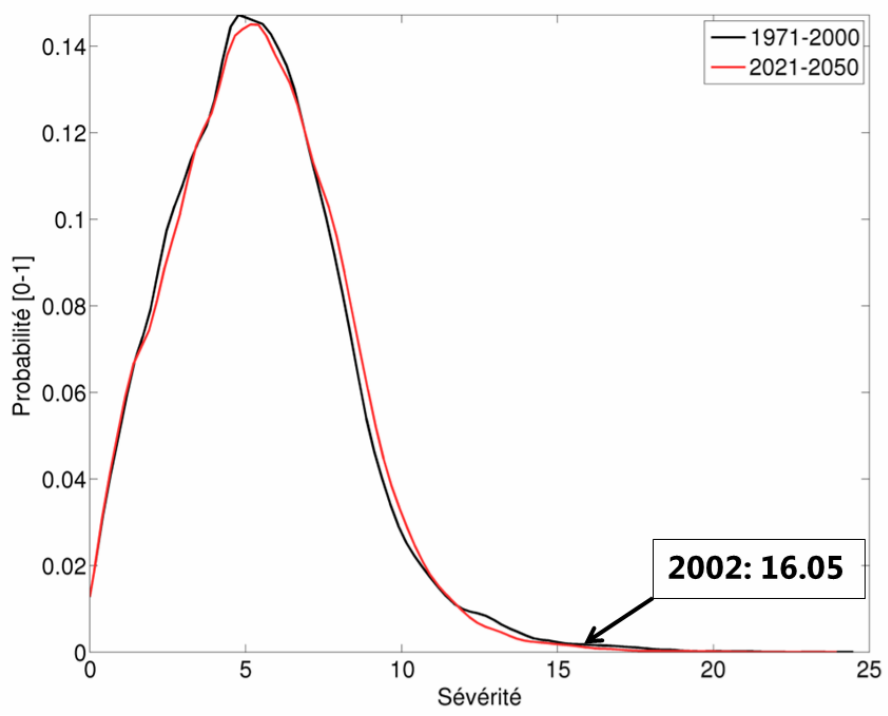


Figure 12. Distribution de la sévérité des étiages en période historique et en période future, pour le bassin versant de la rivière Saint-Charles.

Les épisodes d'étiage lors de la période future sont légèrement plus nombreux qu'en période historique, de l'ordre de +2.5 %. Toutefois, la distribution de la sévérité de ces étiages, illustrée à la Figure 12, est statistiquement identique entre les deux périodes. Un étiage tel que celui de 2002 devrait donc demeurer rare.

Cela s'explique par deux phénomènes opposés. D'une part, les précipitations de 20 mm et plus seront plus fréquentes dans le futur. L'effet est présent, mais moins marqué, pour les précipitations de 10 mm et plus. Les probabilités d'avoir une période de 42 jours sans pluie, tel qu'en 2002, diminueront donc en 2021-2050.

En contrepartie, entre ces épisodes de fortes pluies, la précipitation moyenne sera moins élevée et sera accompagnée de températures plus chaudes.

En combinant ce résultat aux projections de l'Atlas hydroclimatique (Figure 11), quelques conclusions peuvent être tirées. Premièrement, en l'absence d'une gestion explicite du lac Saint-Charles, ce qui est le cas dans l'Atlas, il est prévu que les étiages futurs soient plus sévères qu'en période historique. En raison de la portée de l'étude actuelle, ce sont ces projections de débits qui ont servi à l'analyse des vulnérabilités. Or, en réalité, la gestion du barrage Cyrille-Delage permet d'assurer une quantité d'eau suffisante à l'UPE de Québec en période d'étiage, sauf pour les cas les plus extrêmes. Tel que démontré à la présente section, les projections climatiques démontrent peu de tendances quant à la difficulté à gérer les étiages futurs. De plus, aucune tendance ne se démarque pour les étiages futurs aussi sévères que celui de 2002. Cela signifie que les résultats de l'analyse de vulnérabilité sont conservateurs, dans le sens où la gestion (probablement positive) du lac Saint-Charles n'est pas prise en compte pour les étiages futurs de la rivière.

3.2 ANALYSE DE VULNÉRABILITÉ POUR LA VILLE DE BEAUPRÉ

La municipalité de Beaupré s'approvisionne dans la rivière Sainte-Anne. La municipalité est dotée d'une usine de filtration d'eau potable d'une capacité de 8 640 m³/jour pour alimenter une population avoisinant les 4 000 résidents.

3.2.1 PROJECTION DE CONSOMMATION

Sur l'horizon d'étude (2021-2050), la croissance prévue de la population de Beaupré est de 20 %, soit 775 résidents supplémentaires. C'est le principal facteur de croissance de la consommation pour l'horizon 2021 à 2050. La Figure 13 présente l'évolution de la demande quotidienne moyenne (Qmoy) et maximale (Qmax). Le graphique est construit à partir des projections de l'ensemble des 58 scénarios climatiques utilisés pour la ville de Beaupré. La demande moyenne quotidienne est calculée en prenant la moyenne de consommation journalière par année. La moyenne de cette moyenne journalière est ensuite calculée sur l'ensemble des 58 scénarios pour Beaupré. En ce qui concerne la consommation maximale journalière, elle correspond à la journée affichant la plus grande consommation dans l'année. La moyenne des quantités maximales journalières est ensuite calculée. Ces indicateurs ont été produits pour le scénario de croissance de population de référence.

Globalement, la consommation moyenne quotidienne devrait passer d'environ 2 250 m³/jour à environ 2 400 m³/jour en 2050. La quantité maximale journalière qui correspond aux pointes de consommation estivale devrait croître légèrement plus rapidement. Ce phénomène s'explique par l'effet des variations de conditions climatiques futures.

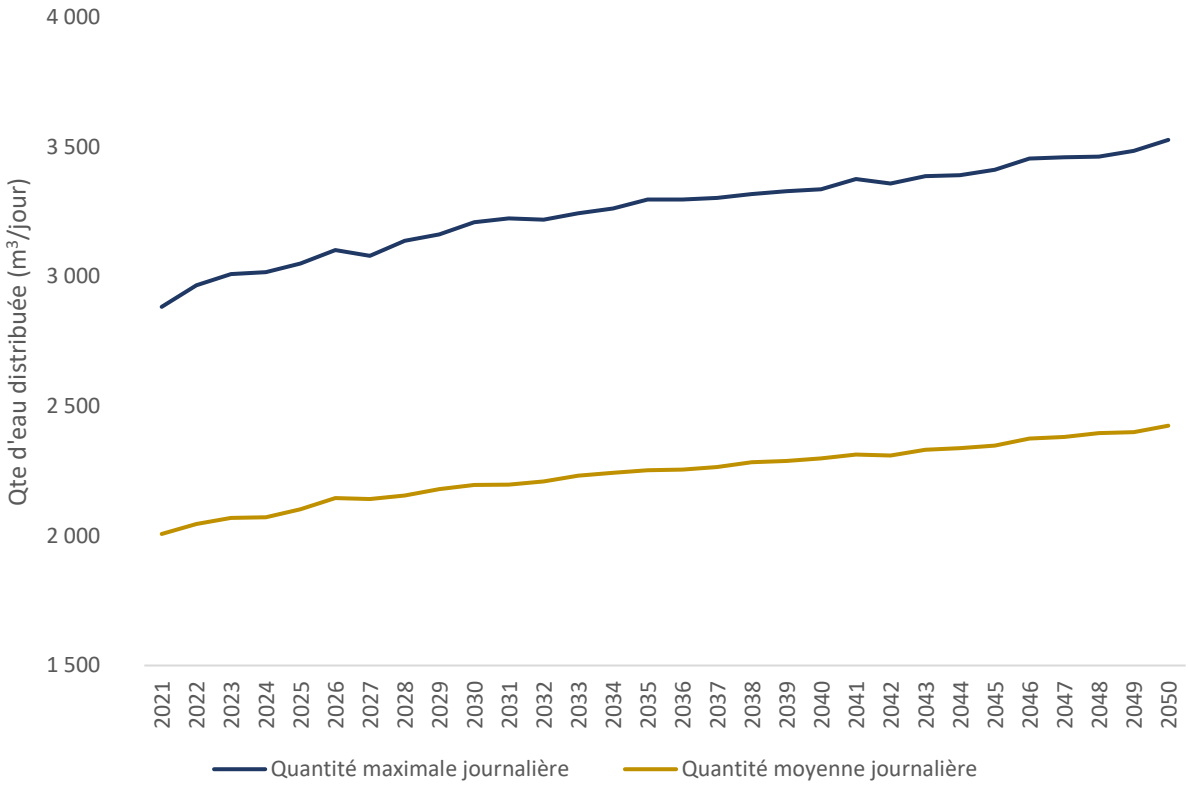


Figure 13. Projections de la demande moyenne et maximale quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour la municipalité de Beaupré.

3.2.2 ANALYSE DE LA VULNÉRABILITÉ

3.2.2.1 Critère opérationnel

Le premier critère d'analyse est lié à des enjeux opérationnels plutôt que de disponibilité en eau. Il s'intéresse à la consommation quotidienne en comparaison à la capacité de production de l'usine (8 640 m³/j). Afin d'évaluer le risque de dépassement de la capacité de production, les quantités d'eau distribuées quotidiennes sont comparées à la capacité de production pour chaque jour entre le 1e janvier 2021 et le 31 décembre 2050 pour les 58 scénarios climatiques pour Beaupré.

La Figure 14 présente la distribution de la demande en eau quotidienne historique de 2014 à 2016 (or) et future (bleu). Les projections incluent entre autres la croissance de la population et l'effet des changements climatiques sur la consommation quotidienne. Le déplacement de la distribution des consommations futures relativement à la période historique s'explique principalement par la croissance de la population et, de manière plus marginale, par l'effet des changements climatiques. Les valeurs de consommation extrêmes dépassent rarement les 4 000 m³/jour par jour, ce qui ne dépasse pas la moitié de la capacité nominale de l'usine. Il faut savoir que dans les années passées, notamment avant 2014, des valeurs de

plus de 5 000 m³/jour ont été enregistrées. Cela s'explique essentiellement par le fait que les quantités supérieures à 3 500 m³/jour sont associées à des évènements spécifiques comme des tests de prise d'eau, le rinçage du réseau ou des fuites majeures. Par exemple, lors des tests de prise d'eau réalisés en 2013, les quantités d'eau produites se sont approchées des 6 000 m³/jour. Ces évènements ne sont pas projetés dans le futur, car ils sont le fruit de décisions opérationnelles. Ce faisant, ils ne mettront jamais en péril la capacité d'approvisionnement de la municipalité, car ils ne seront pas réalisés lors des périodes de pointes de consommation ou d'étiages sévères.

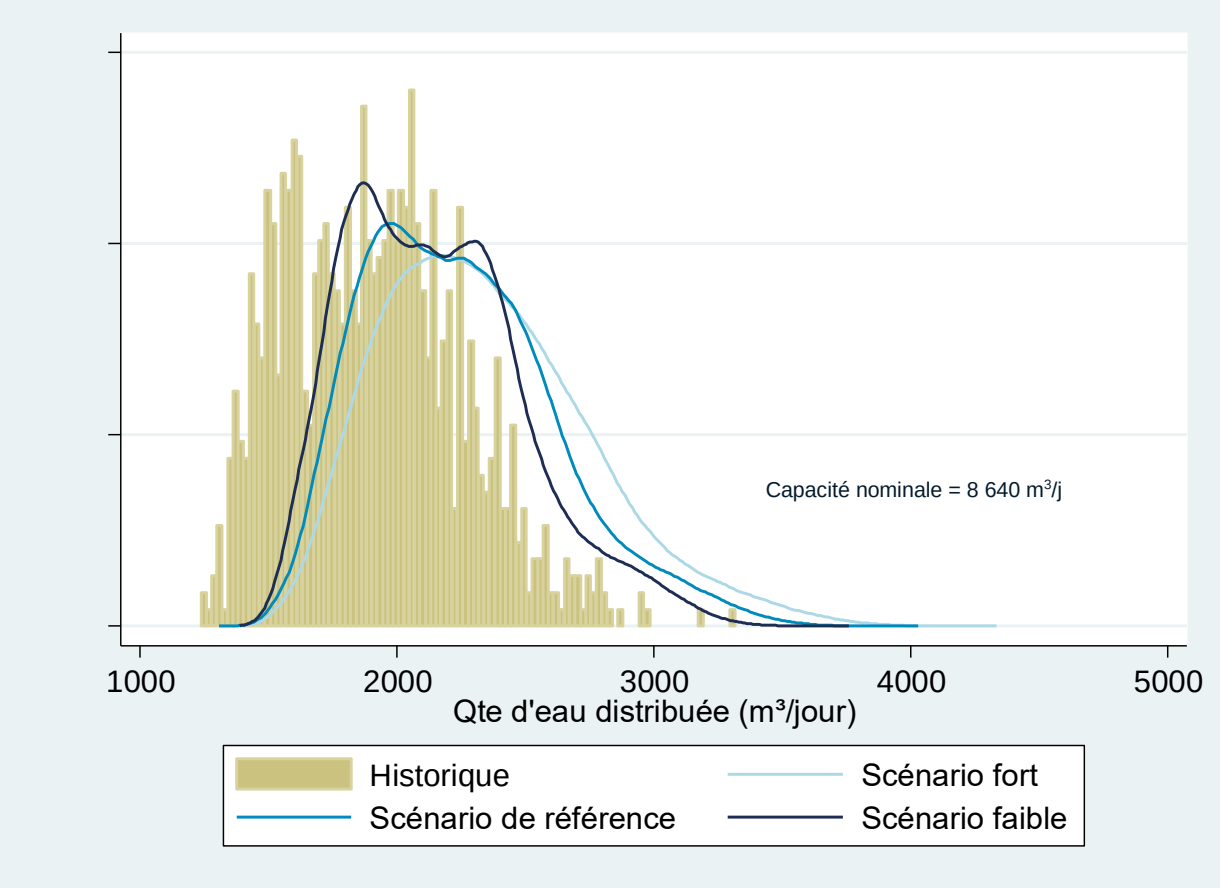


Figure 14. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour Beaupré.

Ceci étant dit, sur la période 2021-2050 pour le scénario de croissance de la population de référence, les valeurs extrêmes de quantités d'eau distribuée dépassent légèrement les 4 000 m³/jour. Pour le scénario fort de croissance de la population, les plus importantes pointes de consommation s'approchent des 4 500 m³/jour, ce qui reste bien en deçà de la capacité nominale de production de l'UPE de Beaupré. Sur la base opérationnelle, l'UPE n'est donc pas à risque de dépassement de capacité. Cela est cohérent avec le fait que l'usine ait été construite récemment.

3.2.2.2 Critère hydrologique

Le critère hydrologique correspond au croisement entre la disponibilité en eau (offre) et la consommation d'eau potable (demande). Ce critère vise à identifier le risque de pénuries en lien avec l'évolution des conditions hydrologiques.

La consommation moyenne journalière historique de Beaupré correspond à environ 2 000 m³/jour soit environ 0,023 m³/s, alors que la consommation maximale projetée au cours des 30 prochaines années correspond à 0,027 m³/s. En croisant les projections de consommation aux projections de débits journaliers, seules deux occurrences sont identifiées comme problématiques sur les 635 535 projections quotidiennes de débit et de consommation, soit 3 millièmes de pourcentage.

À la lumière de ce résultat et à moins de changement majeur dans les usages en amont de la prise d'eau de la municipalité de Beaupré, il semble que l'hydrologie actuelle et future de la rivière Sainte-Anne ne soit pas un facteur contraignant pour assurer l'approvisionnement en eau pour la municipalité de Beaupré d'ici à 2050.

3.2.2.3 Critères environnementaux

Le risque de pénurie d'eau sur la base des critères opérationnels et hydrologiques est nul pour la municipalité de Beaupré. La troisième catégorie de critères concerne le respect des débits écologiques afin de garantir à la faune aquatique un habitat adéquat.

Deux critères écologiques ont été établis afin d'analyser cet aspect. Le premier concerne le soutirage en proportion d'un débit de référence. Comme le calcul en temps réel par les opérateurs d'UPE des débits résiduels ne constitue pas une pratique présentement, les restrictions relatives aux débits écologiques s'articulent principalement en quantité d'eau qu'il est possible de prélever. Typiquement, le soutirage d'eau brute devrait correspondre en tout temps à une proportion inférieure à 15 % du débit 7Q2 afin de maintenir minimalement 85 % du 7Q2 qui correspond au débit écologique généralement reconnu. Il n'est toutefois pas certain que le respect de ces critères maintienne un niveau d'eau nécessaire pour les écosystèmes en périodes d'étiage.

Pour la municipalité de Beaupré, ce critère n'est jamais enfreint sur l'ensemble des projections futures. Autrement dit, la municipalité de Beaupré ne prélève jamais plus de 15 % du débit écologique (1,19 m³/s). Cela s'explique par le fait que la demande n'est pas suffisamment importante, mais aussi que la capacité de l'UPE ne permettrait tout simplement pas de soutirer autant d'eau brute.

Le deuxième critère s'intéresse au débit résiduel en rivière. Il doit correspondre minimalement à 85 % du débit 7Q2 en tout temps afin de maintenir les services rendus aux écosystèmes. Nous calculons également le nombre de jours où le débit résiduel chute sous ce seuil en raison du soutirage d'eau brute. 4,5 % des projections affichent un débit résiduel inférieur au débit écologique (7,9 m³/s) ce qui correspond à environ 16 jours par année en moyenne. Pour environ 1 % des jours où le débit résiduel est inférieur au débit écologique, c'est le soutirage d'eau brute de la municipalité qui en est la cause. Pour le reste des jours, le débit avant soutirage est déjà inférieur au débit écologique, ce que le soutirage vient aggraver, sans en être la cause directe.

Il est important de rappeler que, si ces résultats sont rassurants, ils doivent être interprétés prudemment. En effet, les débits réels de la rivière Sainte-Anne ne sont pas connus et les données utilisées sont issues d'une extrapolation des débits de la rivière Montmorency. Des mesures ultérieures des débits de la rivière Sainte-Anne permettraient de valider les résultats.

3.2.2.4 Sommaire de la vulnérabilité du système d'approvisionnement de Beaupré

De manière générale, le système d'approvisionnement en eau potable de la municipalité de Beaupré n'est pas vulnérable aux variations attendues dans le régime hydrologique de la rivière Sainte-Anne et à la croissance de la consommation en contexte de changements climatiques. Les trois classes de critères (opérationnel, hydrologique et écologique) ne suggèrent pas de problématique majeure sur l'horizon d'étude. La capacité de production de l'UPE est largement suffisante pour répondre aux besoins de la population. Le soutirage quotidien correspond en règle générale à une très faible proportion du débit de la rivière Sainte-Anne. Ainsi, lorsque le débit de la rivière est sous le débit écologique, cela est rarement dû au soutirage de la municipalité, mais principalement aux conditions hydroclimatiques.

Pour ces raisons, il n'est pas nécessaire de procéder à l'analyse des mesures d'adaptation aux changements climatiques pour la municipalité de Beaupré relativement à l'approvisionnement en eau, car son système d'approvisionnement n'est pas vulnérable à l'évolution des conditions climatiques futures. Toutefois, il est important de noter que l'approvisionnement à une source unique pour une municipalité peut poser d'autres risques qui doivent évidemment être pris en compte.

3.3. ANALYSE DE VULNÉRABILITÉ POUR LA VILLE DE CHÂTEAU-RICHER

La municipalité de Château-Richer s'approvisionne dans la rivière Sault-à-la-Puce. La municipalité est dotée d'une UPE d'une capacité de 3 283 m³/jour pour alimenter une population de 4 035 résidents (2016).

3.3.1 PROJECTION DE CONSOMMATION

Sur l'horizon d'étude, la population de Château-Richer devrait croître d'environ 12 %, ce qui représente 515 résidents supplémentaires. C'est le principal facteur de croissance de la consommation pour l'horizon 2021 à 2050. La Figure 15 présente l'évolution de la demande quotidienne moyenne et maximale. Le graphique est construit à partir des projections de l'ensemble des 58 scénarios climatiques utilisés pour Château-Richer.

Globalement, la consommation moyenne quotidienne devrait passer d'environ 1 700 m³/jour à environ 1 900 m³/jour en 2050. La quantité maximale journalière qui correspond aux pointes de consommation estivale devrait croître légèrement plus rapidement passant d'environ 2 300 m³/jour à 2 600 m³/jour.

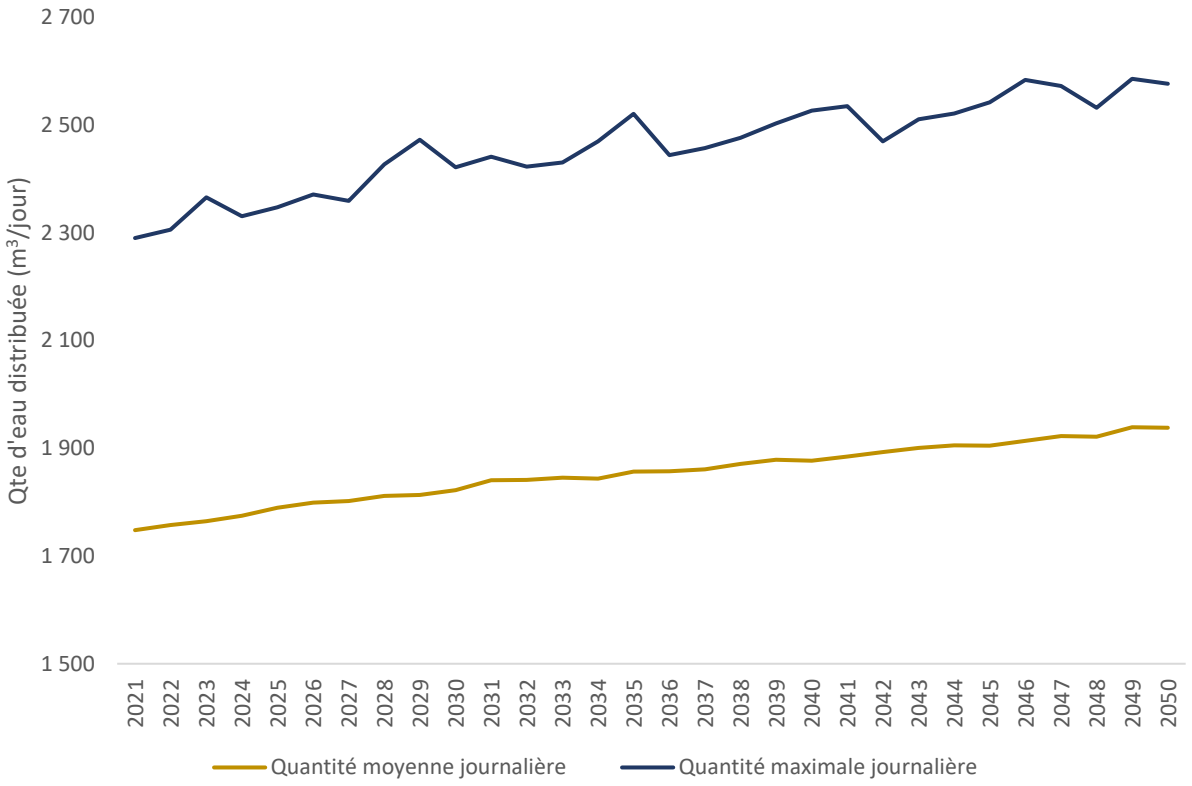


Figure 15. Projections de la demande moyenne et maximale quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour la municipalité de Château-Richer.

3.3.2 ANALYSE DE LA VULNÉRABILITÉ

L'analyse de la vulnérabilité pour le système d'approvisionnement de Château-Richer pose d'importantes limites, car les informations et données sur l'hydrologie de la rivière Sault-à-la-Puce sont manquantes. Selon l'opérateur de l'usine, il n'y a pas eu de pénuries d'eau lors des évènements d'étiages sévères connus en 2002 et 2010 dans la région, ce qui est un signe encourageant. La progression des prélèvements

maximaux est relativement modeste entre 2020 et 2050 (autour de 11 %), malgré l'influence des CC. Cette augmentation ne devrait pas mettre en péril les opérations de l'UPE de Château-Richer. Nous procédons malgré tout à l'analyse du critère opérationnel pour Château-Richer puisque celui-ci peut se faire sans avoir les informations sur les débits en rivière.

3.3.2.1 Critère opérationnel

Afin d'évaluer le risque de dépassement de la capacité de production, les quantités d'eau distribuées quotidiennes sont comparées à la capacité de production pour chaque jour entre le 1e janvier 2021 et le 31 décembre 2050 pour les 58 scénarios climatiques pour Château-Richer.

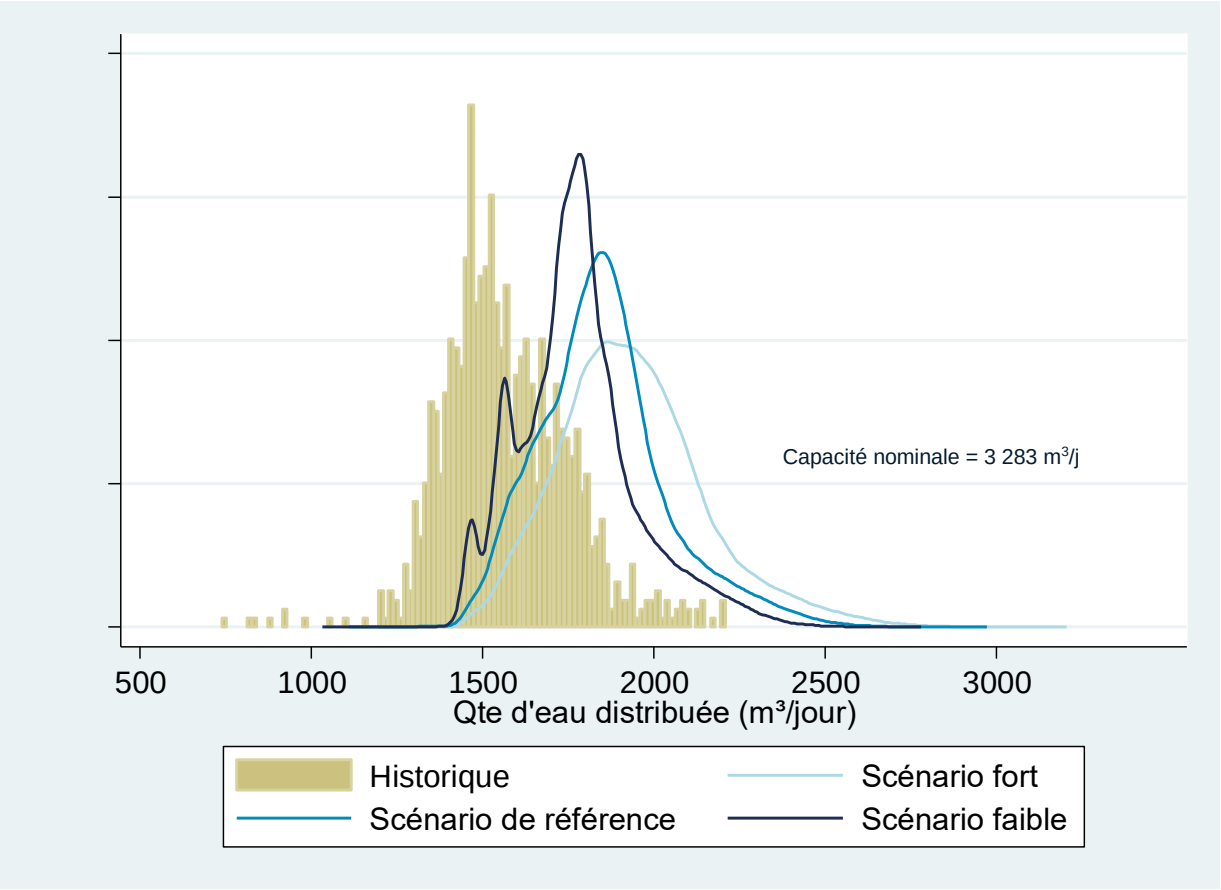


Figure 16. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour Château-Richer.

La Figure 16 présente la distribution de la demande en eau potable quotidienne historique (or) et future (bleu). Sur la période 2021-2050 pour le scénario de référence de croissance de la population, les valeurs extrêmes de demande ne dépassent jamais le seuil des 3 000 m³/jour. En fait, la quantité maximale

distribuée pour l'ensemble des scénarios climatiques pour le scénario de croissance de population de référence correspond à 2 973 m³/jour.

Pour le scénario de forte croissance de population, la projection de consommation la plus importante se situe à environ 3 200 m³/jour, ce qui est légèrement inférieur à la capacité nominale de l'UPE (3 283 m³/jour). Il est à noter que la probabilité d'occurrence d'une consommation dépassant 3 000 m³/jour est de 0,004 %. Sur la base opérationnelle, l'UPE de Château-Richer n'apparaît pas à risque de dépassement de capacité dans l'horizon court et moyen terme. À plus long terme, en fonction de la croissance réalisée sur le territoire ou dans le cas de développements commerciaux ou industriels importants, la municipalité devra réévaluer la nécessité d'augmenter sa capacité de production, car la marge opérationnelle lors des pointes de consommation s'amenuise peu à peu.

3.3.2.2 Sommaire de la vulnérabilité du système d'approvisionnement de Château-Richer

Sur la base des informations disponibles pour la municipalité de Château-Richer, il apparaît que l'accroissement de la consommation provenant de la croissance de la population et de l'effet limité des CC ne mettra pas à risque la capacité de la municipalité à alimenter sa population. L'acquisition de données sur les débits de la rivière Sault-à-la-Puce pourrait éventuellement permettre d'assurer que l'évolution des conditions hydrologiques ne sera pas également un facteur augmentant le risque de pénurie sur le territoire.

3.4. ANALYSE DE VULNÉRABILITÉ POUR LES MUNICIPALITÉS DE BOISCHATEL ET L'ANGE-GARDIEN

La municipalité de Boischatel s'approvisionnait exclusivement dans la rivière Ferrée jusqu'en 2017. En réponse à l'accroissement de la population sur le territoire de la municipalité et des besoins en eau, la municipalité procède actuellement à la mise en service d'une prise d'eau dans la rivière Montmorency. Cette nouvelle prise d'eau alimente la même usine de production d'eau potable qui a été agrandie afin de pouvoir traiter une plus grande quantité d'eau (10 388 m³/jour).

3.4.1 PROJECTION DE CONSOMMATION

Selon le scénario de référence de l'ISQ, la croissance de la population projetée sur le territoire de Boischatel et L'Ange-Gardien (tous deux desservis par le même réseau) serait de 55 % entre 2021 et 2050. Cela correspond à plus de 6 500 nouveaux résidents sur le territoire au cours des 30 prochaines années. C'est le principal facteur de croissance de la consommation pour l'horizon d'étude. La Figure 17 présente l'évolution de la demande quotidienne moyenne et maximale. Le graphique est construit à partir des projections de l'ensemble des 59 scénarios climatiques utilisés pour ces municipalités.

Globalement, la consommation moyenne quotidienne devrait passer d'environ 3 000 m³/jour à environ 4 800 m³/jour en 2050. La quantité maximale journalière qui correspond aux pointes de consommation estivale devrait croître de manière importante, passant d'environ 5 100 à 8 100 m³/jour.

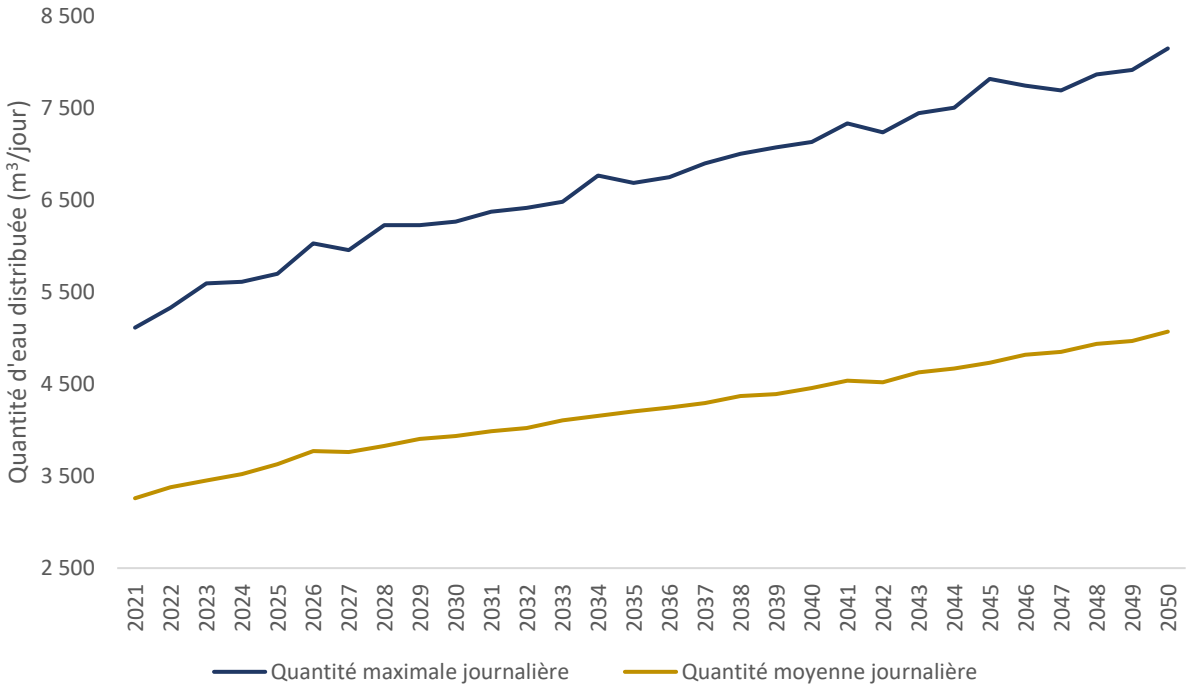


Figure 17. Projections de la demande moyenne et maximale quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour la municipalité de Boischatel.

Il est important de noter que l'évolution présentée à la Figure 17 fait référence à des projections moyennes de consommation futures. Autrement dit, pour chaque année représentée, la consommation maximale journalière correspond à la moyenne des consommations maximales projetées des 59 scénarios climatiques. Rappelons d'ailleurs que la consommation maximale journalière correspond à la plus grande consommation enregistrée dans une année donnée.

3.4.2 ANALYSE DE LA VULNÉRABILITÉ

3.4.2.1 Critère opérationnel

La Figure 18 présente la distribution des quantités d'eau distribuée quotidienne historiques (or) et futures (bleu). Sur la période 2021-2050, seul un petit nombre de journées projetées suggèrent un dépassement de la capacité de production de l'UPE (1 occurrence pour le scénario de référence et 7 occurrences pour le scénario fort). Par ailleurs, ceux-ci sont enregistrés en fin de période d'analyse soit autour de 2045. La probabilité que la demande dépasse 10 000 m³/jour (la capacité de l'usine étant 10 388 m³/jour) est très

faible, soit inférieure à un millième de pourcent tant pour le scénario de référence que pour le scénario de forte croissance de la population.

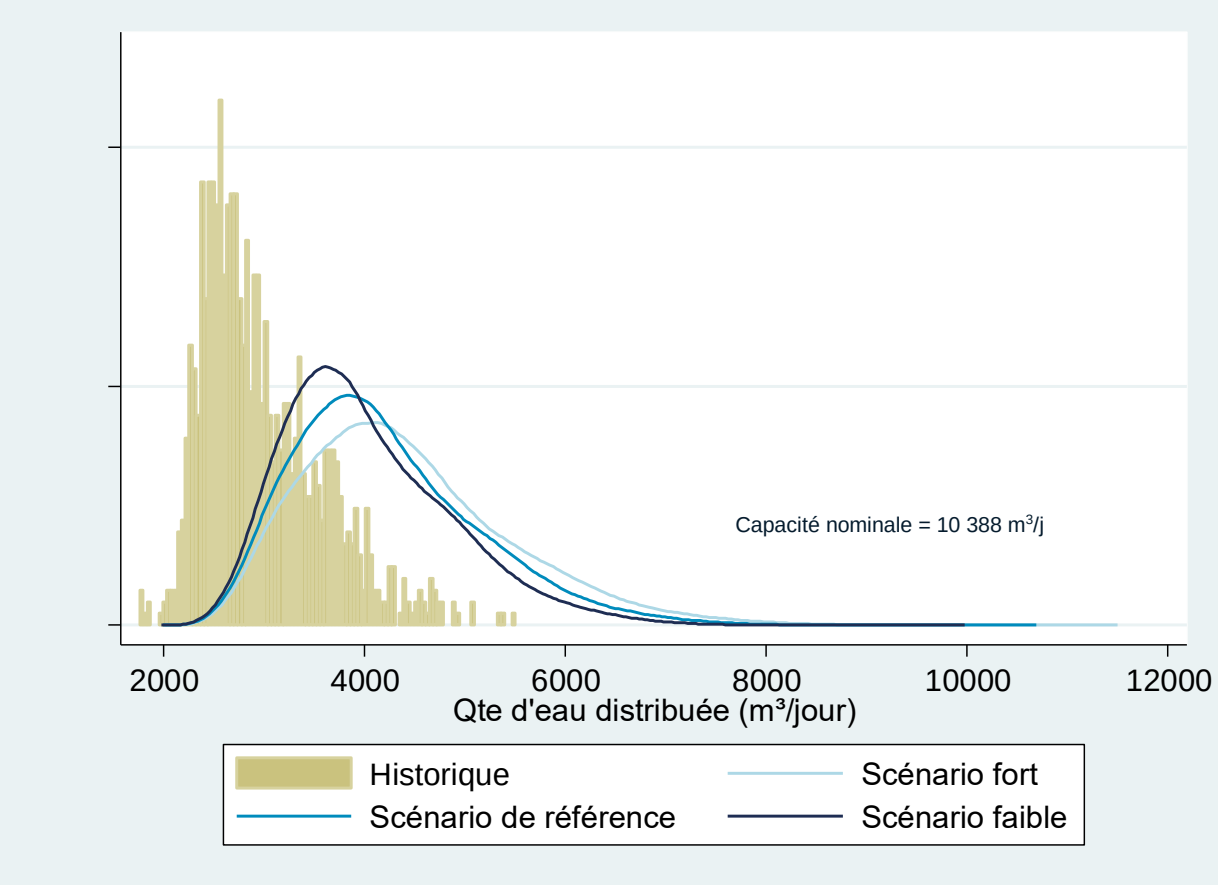


Figure 18. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour Boischatel et Ange-Gardien.

3.4.2.2 Critère hydrologique

Le critère hydrologique correspond au croisement entre la disponibilité en eau et la consommation en eau potable. Ce critère vise à identifier le risque de pénuries en lien avec l'évolution des conditions hydrologiques. L'analyse de vulnérabilité vise à identifier les risques futurs liés à la synchronisation possible des extrêmes de consommation avec des périodes d'étiages sévères.

Boischatel s'approvisionnera dès 2018 à la fois dans la rivière Ferrée et la rivière Montmorency. Une fois la prise d'eau de la rivière Montmorency en opération, Boischatel continuera à s'approvisionner prioritairement dans la rivière Ferrée et soutirera des volumes excédentaires dans la rivière Montmorency

lorsque nécessaire. Il est donc supposé que tout soutirage quotidien inférieur à 6 500 m³ provient de la rivière Ferrée, à moins que le débit de cette dernière ne le permette pas.

Dans le cas de la rivière Ferrée, 0,014 % des projections journalières futures suggèrent une possibilité de pénurie. En interprétant ces résultats sur une base annuelle, la probabilité de subir au moins une journée de pénurie dans une année donnée est inférieure à 1 %. Autrement dit, il y a moins d'une chance sur 100 que pour une année donnée la municipalité doive faire face à un épisode de pénurie d'eau dans la rivière Ferrée.

Dans la rivière Montmorency, les prises d'eau de Beauport et de Charlesbourg (Ville de Québec) sont situées en amont de celle de Boischatel. Comme les soutirages de ces prises d'eau sont également évalués dans le cadre de cette étude, il a été possible de retirer les soutirages anticipés de ces prises d'eau afin de connaître le débit résiduel à la prise d'eau de Boischatel. Afin de simplifier cet exercice et d'assurer le principe de précaution, le soutirage maximal de Beauport et de Charlesbourg est retiré aux débits projetés pour la rivière Montmorency. Lorsque ce traitement est appliqué aux séries hydrologiques, 0,030 % des projections futures posent des problématiques de pénuries dans le cas de la rivière Montmorency. Tout comme pour la rivière Ferrée, sur une base annuelle la probabilité que la municipalité subisse une pénurie d'eau en raison des faibles débits de la Montmorency est d'environ 1 % (18 ans sur 1 770 années de projection).

Considérant que Boischatel possède maintenant deux prises d'eau, il est également pertinent d'évaluer la probabilité conjointe qu'à la fois la rivière Ferrée et la rivière Montmorency subissent des étiages sévères mettant en péril l'approvisionnement global de la municipalité. Évidemment, les conditions hydroclimatiques qui dictent les débits en rivière impactent à la fois les bassins versants des rivières Ferrée et Montmorency considérant leur proximité géographique. Les résultats indiquent que lorsque la rivière Ferrée ne peut fournir suffisamment d'eau pour Boischatel, il n'est pas possible d'aller puiser dans la rivière Montmorency. Ainsi, la probabilité annuelle de pénurie d'eau pour Boischatel se situe autour de 1 %.

3.4.2.3 Critères environnementaux

Le risque de pénurie d'eau sur la base des critères opérationnel et hydrologique est minime pour la municipalité de Boischatel sur l'horizon d'étude. La troisième catégorie de critères concerne le respect des débits écologiques afin de garantir à la faune aquatique un habitat adéquat. Les critères écologiques sont évalués à la fois pour les rivières Ferrée et Montmorency.

Le Tableau 12 résume l'analyse des critères écologiques pour les rivières Ferrée et Montmorency. En vertu de la mise en place de la nouvelle prise d'eau dans la rivière Montmorency, la municipalité sera en mesure de limiter en tout temps le soutirage dans la rivière Ferrée à moins de 15 % du débit écologique (7Q2).

Cette conclusion s'applique également à la rivière Montmorency. Cela s'explique par le fait que la municipalité soutirera des volumes relativement faibles de la rivière Montmorency puisque sa prise d'eau principale reste celle dans la rivière Ferrée.

Tableau 12. Analyse des critères écologiques pour les rivières Ferrée et Montmorency

Critères	Rivière Ferrée	Rivière Montmorency
Demande en eau est supérieure au débit de soutirage autorisé pour le maintien des services aux écosystèmes (15 % du 7Q2)	0,0 %	0,0 %
Débit résiduel inférieur au débit écologique (85 % du 7Q2)	10,0 %	2,2 %
Débit résiduel inférieur au débit écologique (85 % du 7Q2) en raison du soutirage	1,2 %	0,0007 %

Le deuxième critère s'intéresse au débit résiduel en rivière. Il doit correspondre minimalement à 85 % du débit 7Q2 en tout temps afin de maintenir les services rendus aux écosystèmes. Nous calculons également le nombre de jours où le débit résiduel chute sous ce seuil en raison du soutirage d'eau brute.

Pour la rivière Ferrée, environ 10 % des projections affichent un débit résiduel inférieur au débit écologique (0,7 m^3/s) ce qui correspond à environ 38 jours par année. De ces cas, 11,5 % sont causés par le soutirage lui-même. Autrement dit, dans 88,5 % des projections où le débit de la rivière Ferrée était inférieur au débit écologique, le débit en rivière se situait déjà en dessous du débit écologique avant le soutirage.

La Figure 19 présente l'évolution du nombre de jours par année pour lesquels le débit en rivière sera inférieur au débit écologique (bleu marine) et le nombre de jours où cette situation se produira en raison du soutirage d'eau brute (or). Le graphique permet de conclure que les étiages seront plus fréquents et que le débit 7Q2 reste un référentiel théorique qui n'est pas stationnaire à travers l'horizon d'étude en raison de l'effet des changements climatiques. Autrement dit, le débit écologique tel que défini selon les débits historiques des rivières sera évidemment en évolution à mesure que les changements climatiques impacteront le régime hydrologique des rivières. Dans le cas spécifique de la rivière Ferrée, il est clair que ce phénomène augmentera le stress sur la ressource en eau exercée par le soutirage d'eau brute pour répondre aux besoins des résidents de Boischatel.

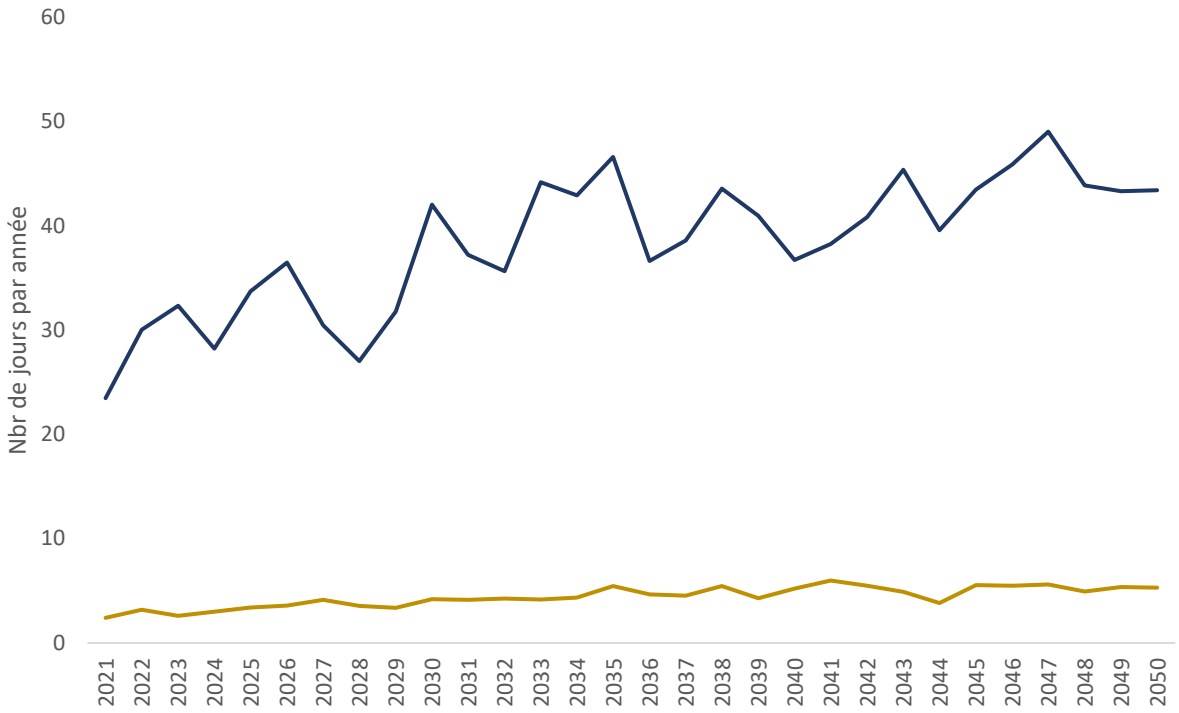


Figure 19. Évolution du nombre de jours par année où le débit résiduel est inférieur au débit écologique (marine) et du nombre de jours où le soutirage est responsable du non-respect du débit écologique en rivière (or) pour la rivière Ferrée entre 2021 et 2050.

Pour la rivière Montmorency, environ 2,2 % des projections hydrologiques affichent un débit résiduel inférieur au débit écologique. Dans seulement 5 occasions, c'est le soutirage qui fait basculer le débit sous le débit écologique (4,3 m³/s).

3.4.2.4 Sommaire de la vulnérabilité du système d'approvisionnement de Boischatel

De manière générale, le système d'approvisionnement en eau potable de la municipalité de Boischatel affiche une faible vulnérabilité aux variations attendues dans le régime hydrologique de la rivière Ferrée et à la croissance de la consommation en contexte de changements climatiques. La décision de mettre en place une nouvelle prise d'eau dans la rivière Montmorency permet de réduire la pression sur la rivière Ferrée en termes de respect des débits écologiques. Elle garantit aussi une plus grande flexibilité dans le système, ce qui s'avère un élément clé de résilience face à l'évolution des régimes hydrologiques futurs.

Les trois classes de critères (opérationnelle, hydrologique et écologique) ne suggèrent pas de problématique majeure sur l'horizon d'étude. Si l'évolution de la population correspond au scénario de plus forte croissance, il est possible que la demande en eau potable s'approche de la capacité de production de l'UPE vers la fin de l'horizon d'analyse. Ce faisant, la municipalité devra revoir sa planification

stratégique vers 2035-2040 à la lumière de l'évolution réelle de sa population et des consommations unitaires sur son territoire.

En ce qui concerne la disponibilité en eau dans les rivières Ferrée et Montmorency, il y a de très faibles chances qu'une journée de pénurie d'eau survienne au cours des 30 prochaines années bien que les étiages estivaux deviendront plus fréquents et plus sévères (voir Figure 11). L'impact se fera surtout sentir sur le débit écologique de la rivière Ferrée qui sera de plus en plus difficile à respecter selon les critères établis sur la base des débits historiques en rivière. Bien que le soutirage dans la Ferrée soit rarement responsable de cela, il pourrait s'avérer judicieux d'optimiser le soutirage des deux prises d'eau de manière à assurer un respect des débits écologiques dans les deux rivières.

Globalement, il n'est pas nécessaire de procéder à l'analyse des mesures d'adaptation aux changements climatiques pour la municipalité de Boischatel, car son système d'approvisionnement n'est pas vulnérable à l'évolution des conditions.

3.5 ANALYSE DE VULNÉRABILITÉ POUR LA VILLE DE LÉVIS

L'approvisionnement en eau potable sur le territoire de Lévis est assuré par trois réseaux d'approvisionnement (Charny (46 656 m^3/j), Desjardins (65 600 m^3/j) et Saint-Romuald (20 000 m^3/j)). Environ 70 % du soutirage d'eau brute provient du fleuve Saint-Laurent (Desjardins et Saint-Romuald) alors que 30 % proviennent de la rivière Chaudière (Charny). Bien que des plans d'interconnexion soient actuellement à l'étude, la configuration actuelle des réseaux ne permet pas de transferts entre ceux-ci. Advenant le cas d'une pénurie d'eau dans la rivière Chaudière ou d'une catastrophe environnementale dans le fleuve ou la rivière Chaudière, il n'est pas possible de transférer de l'eau d'un système à un autre pour répondre aux besoins de la population. Par exemple, lors de la tragédie ferroviaire de Lac Mégantic qui a contaminé la rivière Chaudière pendant plusieurs semaines, la Ville de Lévis a dû mettre en place un raccordement d'urgence dans la rivière Beaurivage afin d'alimenter l'UPE de Charny.

Puisque les réseaux sont indépendants au moment d'écrire ce rapport, l'évaluation de la vulnérabilité de l'approvisionnement en eau potable est réalisée distinctement pour les trois réseaux de la ville. Par contre, puisque des plans d'interconnexions sont présentement à l'étude, nous évaluons également la vulnérabilité du système dans l'optique où des interconnexions complètes sont mises en place.

3.5.1 PROJECTION DE CONSOMMATION

Selon les projections obtenues de l'ISQ et de la ville, la population de Lévis devrait croître d'environ 30 % au cours des 30 prochaines années. La croissance de population attendue dans les territoires desservis par les trois réseaux de distribution de la Ville de Lévis est relativement homogène. La croissance sera de

25 % pour le réseau de Charny, 29 % pour le réseau Desjardins et 33 % pour Saint-Romuald. La Ville de Lévis a également fourni de l'information sur l'évolution possible des consommateurs ICI, grâce aux projections des superficies de plancher pour le secteur commercial et les superficies de terrain pour le secteur industriel. Aux fins de simplification de l'analyse et suite aux discussions avec la Ville de Lévis, on suppose que le taux de croissance des ICI suivrait le taux de croissance de la population. Ce faisant, les projections de consommation ne sont pas ajustées en fonction de l'accroissement des consommations ICI, car elles sont déjà intégrées à la projection des consommations par habitant sur le territoire.

Les Figures 20 à 22 présentent l'évolution de la quantité moyenne et maximale d'eau distribuée quotidiennement pour chacun des trois réseaux de Lévis. Le graphique est construit à partir des projections de l'ensemble des 46 scénarios climatiques utilisés pour Lévis.

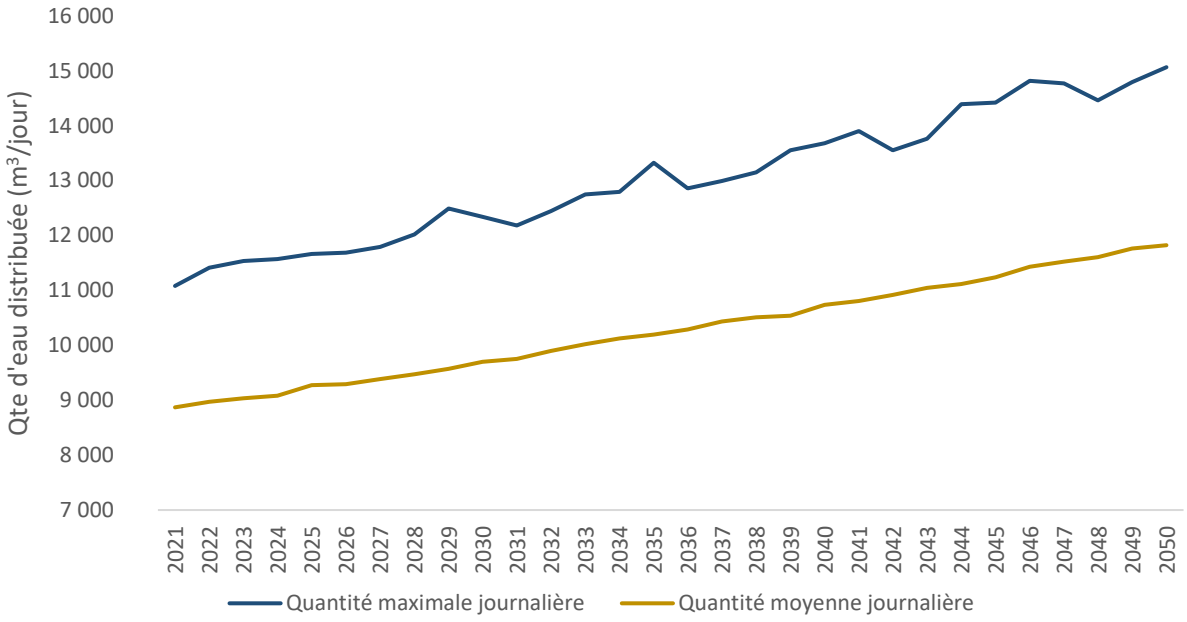


Figure 20. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau de Saint-Romuald.

Cet élément est important, car cela veut dire qu'il y a une faible différence entre les pointes de consommation et la consommation moyenne sur le réseau. Dans le cas du réseau Desjardins, le profil de consommation est relativement stable à travers l'année, avec une consommation qui est légèrement supérieure en hiver qu'en été, ce qui est atypique pour le Québec. Généralement, les pointes de consommation se situent en été alors que les conditions météorologiques influencent lourdement les usages extérieurs (piscine, arrosage, etc.) lors des périodes de grandes chaleurs et de faibles précipitations.

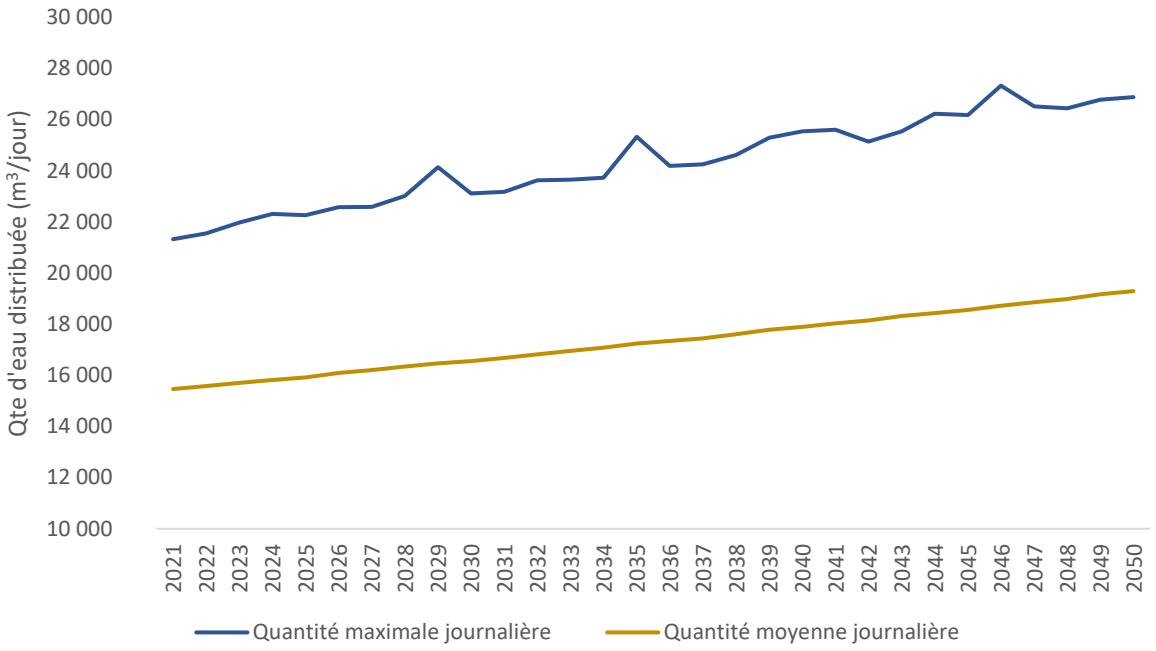


Figure 21. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau de Charny.

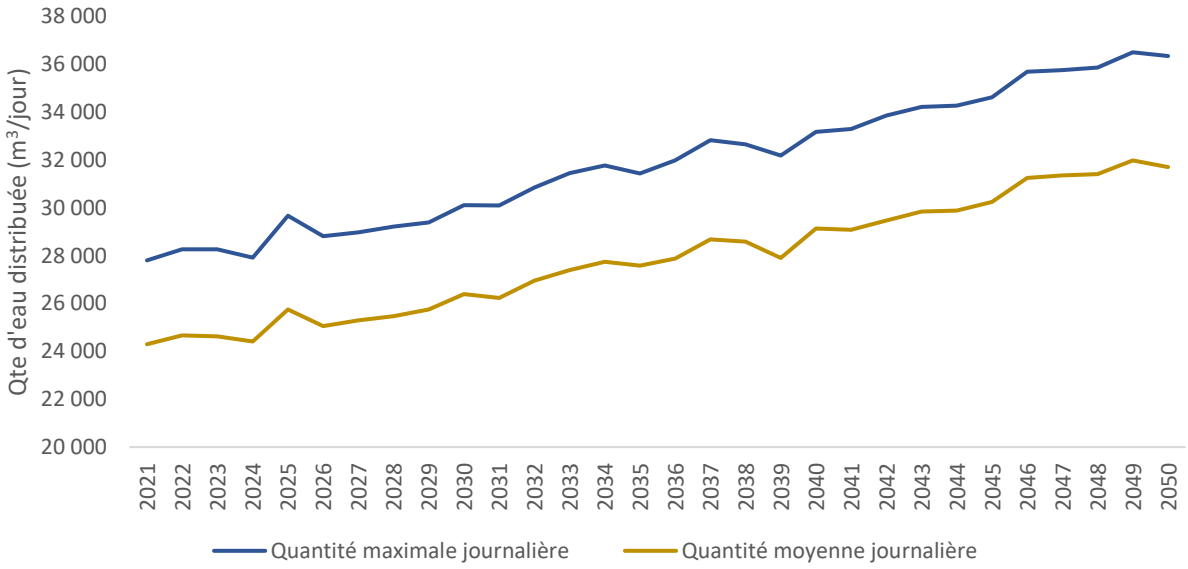


Figure 22. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau Desjardins.

Globalement, les consommations moyennes quotidiennes progresseront proportionnellement à l'évolution de la population sur les trois réseaux. La figure permet également de déduire l'évolution du facteur de pointe relatif à chacun des réseaux (Qmax/Qmoy). Le réseau Desjardins affiche un facteur de pointe faible.

La situation particulière du réseau Desjardins découle de conditions particulières de certaines portions du réseau qui ne se situent pas à une profondeur suffisante pour éviter que les tuyaux gèlent. Par conséquent, certaines résidences doivent maintenir un débit d'eau constant en hiver, ce qui fait croître la consommation hivernale et camoufle par le fait même le profil de consommation réelle. D'un point de vue statistique, cela fait en sorte que les analyses de la consommation captent une corrélation inverse entre la température et la consommation. En climat futur, cette particularité va générer des projections qui seront à la baisse en raison de la hausse attendue des températures. Par ailleurs, la Ville de Lévis entreprend des travaux d'entretien (repérage et colmatage) et de remplacement des conduites qui devraient ultimement réduire substantiellement les pertes sur ce réseau.

3.5.2 ANALYSE DE LA VULNÉRABILITÉ

3.5.2.1 Critère opérationnel

Le premier critère d'analyse est lié à des enjeux opérationnels plutôt que de disponibilité en eau. Il s'intéresse à la consommation quotidienne maximale en comparaison de la capacité de traitement des UPE sur le territoire de Lévis. Afin d'évaluer le risque de dépassement de la capacité de production, les quantités d'eau distribuées quotidiennes sont comparées à la capacité de production pour chaque jour entre le 1er janvier 2021 et le 31 décembre 2050 pour les 46 scénarios climatiques pour Lévis.

La Figure 23 présente les quantités d'eau distribuée quotidiennes historiques (or) et futures (bleu) pour le réseau de Saint-Romuald. Sur la période 2021-2050, la demande en eau potable sur le réseau ne dépassera pas la capacité de production de l'UPE de Saint-Romuald (20 000 m³/j) tant dans le scénario de croissance de population de référence (fourni par Lévis) que dans les scénarios faible et fort de l'ISQ.

La Figure 24 présente la distribution des quantités d'eau distribuée quotidiennes historiques (or) et futures (bleu) pour le réseau de Saint-Nicolas (UPE Desjardins). Tout comme pour le réseau de Saint-Romuald, la demande en eau potable sur le réseau alimenté par l'UPE Desjardins (65 600 m³/j) ne sera pas dépassée au cours de l'horizon d'analyse.

La Figure 25 présente la distribution des quantités d'eau distribuée quotidiennes historiques (or) et futures (bleu) pour le réseau de Charny. Tout comme les deux autres UPE, l'usine de Charny (46 656 m³/j) est dimensionnée de manière à pouvoir répondre à l'évolution de la consommation d'eau potable sur le réseau découlant de la croissance de la population et de l'évolution des conditions climatiques. Aucun des scénarios ne suggère de dépassement de capacité au cours de la période 2021-2050, malgré l'accroissement de 25 % de la population. Le même constat peut être tiré si les scénarios de croissance de population fort et faible sont utilisés pour l'analyse.

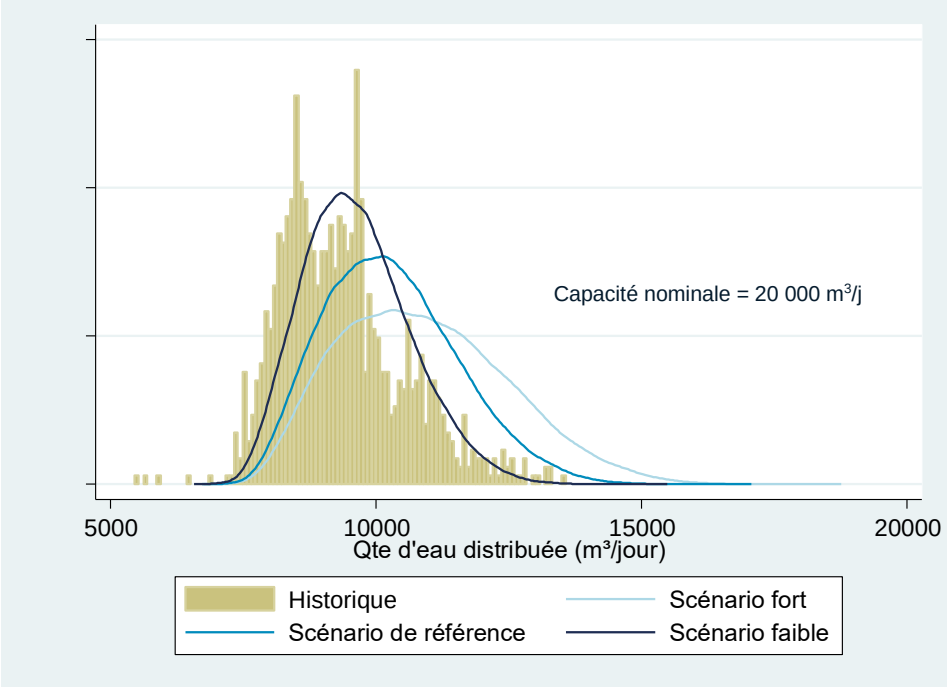


Figure 23. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE de Saint-Romuald.

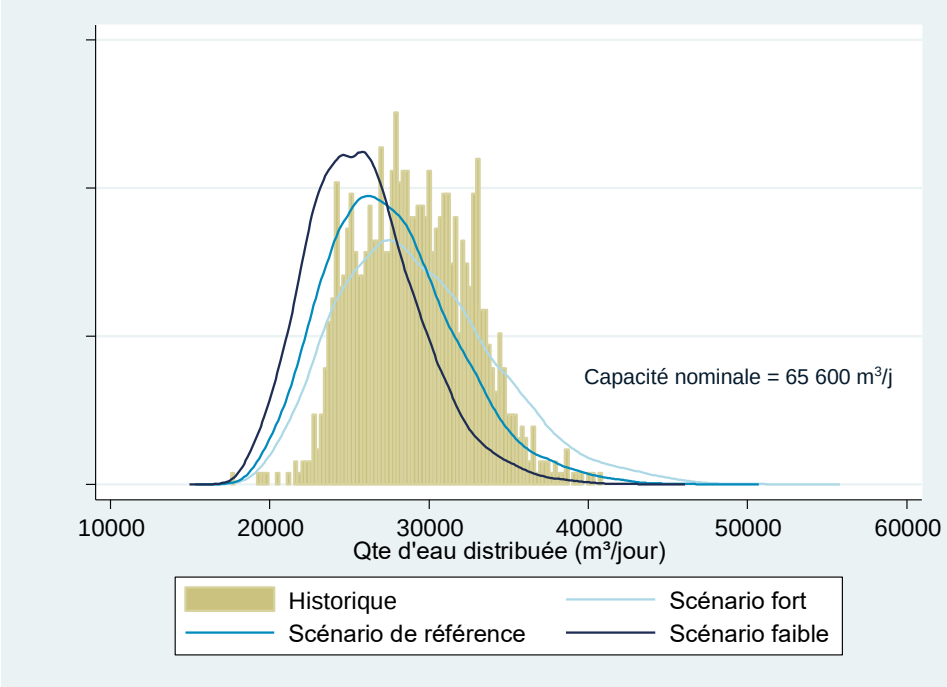


Figure 24. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE Desjardins.

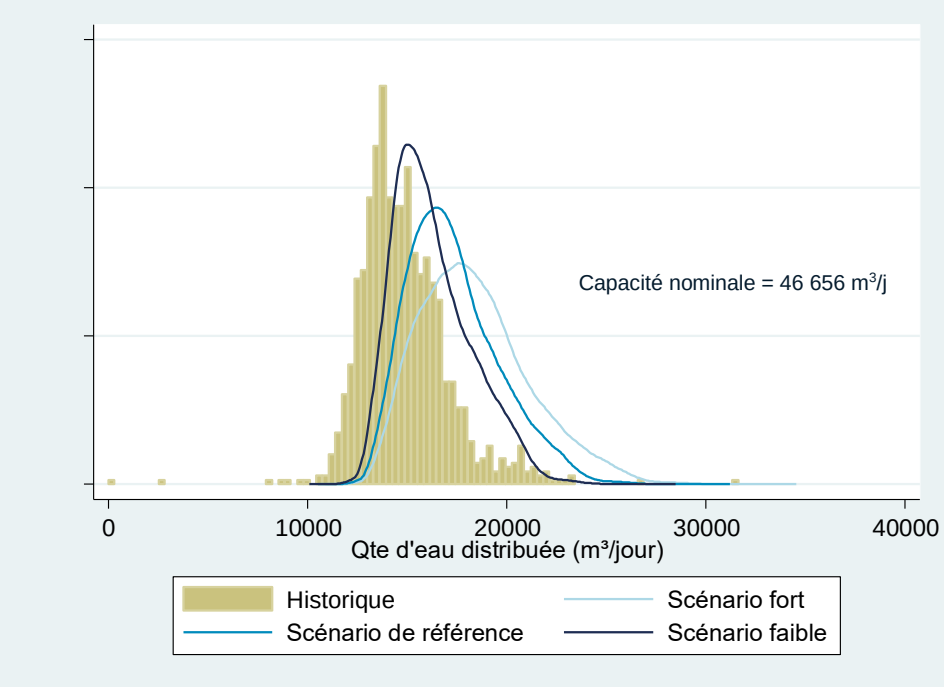


Figure 25. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE Charny.

3.5.2.2 Critère hydrologique

Le critère hydrologique correspond au croisement entre la disponibilité en eau (offre) et la consommation en eau potable (demande). Ce critère vise à identifier le risque de pénuries en lien avec l'évolution des conditions hydrologiques. Ce qui importe pour l'analyse de vulnérabilité, c'est d'identifier les probabilités associées à des besoins de consommation qui dépasseraient la disponibilité de la ressource en rivière.

Lévis s'approvisionne à la fois dans la rivière Chaudière et dans le fleuve Saint-Laurent. Le risque de pénurie d'eau touche d'abord la rivière Chaudière considérant que le débit et le niveau du fleuve ne sont pas contraignants. Nous analysons donc en priorité la vulnérabilité du système d'approvisionnement de Charny, qui s'alimente dans la rivière Chaudière. Dans un premier temps, nous supposerons que le réseau reste configuré selon les conditions actuelles, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de transférer de l'eau brute ou potable d'un réseau à l'autre.

Selon ces hypothèses, 0,0019 % des projections journalières futures suggèrent une problématique de pénuries, c'est-à-dire que le soutirage d'eau brute serait supérieur au débit en rivière. Sur une base annuelle, le risque qu'il y ait une journée de pénurie d'eau au cours de l'année est inférieur à 1 %.

Une interconnexion entre les réseaux de Saint-Romuald et Charny permettrait d'éliminer ce faible risque, en plus de se prémunir contre les risques d'incidents qui viendraient compromettre l'une ou l'autre des prises d'eau. Il faudrait toutefois s'assurer que la capacité de traitement de l'usine de Saint-Romuald puisse répondre au manque à gagner de l'usine de Charny. Ce manque à gagner pour les épisodes de pénurie projetés s'établit en moyenne à 10 175 m³/j avec un déficit minimum enregistré de 847 m³ et un maximum de 20 300 m³.

3.5.2.3 Critères environnementaux

Le risque de pénuries d'eau sur la base des critères opérationnels et hydrologiques est faible pour l'UPE de Charny qui s'approvisionne dans la rivière Chaudière. La troisième catégorie de critères concerne le respect des débits écologiques afin de garantir à la faune aquatique un habitat adéquat.

Deux critères écologiques ont été établis afin d'analyser cet aspect. Le premier concerne le soutirage en proportion d'un débit de référence. Typiquement, le soutirage d'eau brute devrait correspondre en tout temps à une proportion inférieure à 15 % du débit 7Q2 afin de maintenir minimalement 85 % du 7Q2 qui correspond au débit écologique généralement reconnu. Pour la municipalité de Lévis, la capacité nominale de l'usine de Charny (46 656 m³/j) est inférieure à 15 % du débit 7Q2. Selon la capacité actuelle de production, il est donc impossible que le prélèvement de l'usine cause un non-respect de ce critère.

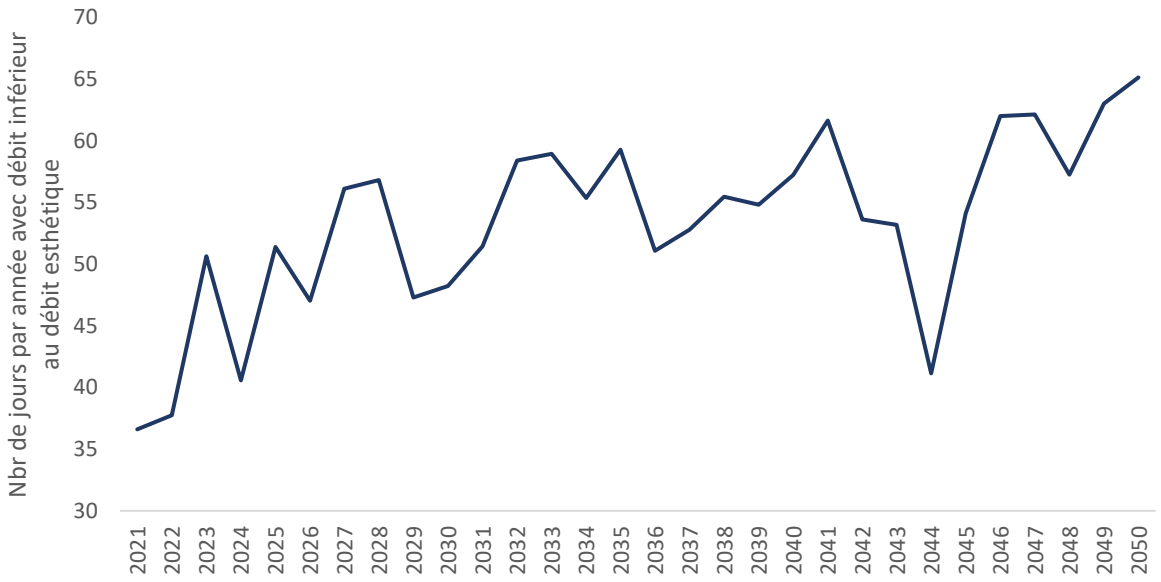


Figure 26. Évolution du nombre de jours par année où le débit résiduel est inférieur au débit esthétique pour la rivière Chaudière entre 2021 et 2050.

Le deuxième critère s'intéresse au débit résiduel réel en rivière. Il doit correspondre minimalement à 85 % du débit 7Q2 en tout temps afin de maintenir les services rendus aux écosystèmes. Nous calculons également le nombre de jours où le débit résiduel chute sous ce seuil en raison du soutirage d'eau brute.

0,19 % des projections affichent un débit résiduel inférieur au débit écologique. De ces cas, 16 % sont causés par le soutirage lui-même. C'est donc dire que le débit avant le soutirage était, dans la plupart des cas, déjà sous le débit écologique.

La rivière Chaudière est également soumise à des restrictions en lien avec un débit esthétique fixé pour maintenir un débit visuellement intéressant à la hauteur du Parc des Chutes-de-la-Chaudière. Le débit esthétique est fixé à 21 m³/s. Les analyses suggèrent que le non-respect du débit esthétique va croître au cours de l'horizon d'analyse, passant d'une moyenne d'environ 35 jours par année à plus de 60 jours par année.

3.5.2.4 Analyse de sensibilité – perte des prises d'eau dans le fleuve

L'analyse précédente suppose un maintien des conditions d'opération actuelles à l'exception des transformations dans le régime hydrologique de la rivière Chaudière. Or, des questionnements ont été soulevés sur la progression du front salin en raison de la baisse des débits du fleuve combinée à une hausse du niveau marin. Bien que nous n'ayons pas de projections précises à l'heure actuelle sur la vitesse de progression du front salin, nous procédons à une analyse de sensibilité afin d'évaluer les conséquences de la perte d'une ou des deux prises d'eau brute dans le fleuve Saint-Laurent (UPE Desjardins et Saint-Romuald).

La prise d'eau la plus à l'est, donc la plus vulnérable à l'avancée du front salin, est la prise d'eau du réseau Desjardins. Cette prise d'eau est la plus importante de la Ville de Lévis et fournit l'UPE Desjardins qui produit en moyenne 25 000 à 30 000 m³/j. Advenant la perte de cette prise d'eau, il faudrait que l'eau brute puisée à la prise d'eau à Saint-Romuald puisse être acheminée vers l'usine Desjardins. Cela nécessiterait d'accroître la capacité de prélèvement à la prise d'eau de Saint-Romuald et la mise en place d'une interconnexion de grande capacité (minimalement 50 000 m³/j) vers l'usine Desjardins ou bien d'agrandir l'usine de Saint-Romuald pour combler la baisse de capacité à l'usine Desjardins. Cette dernière option nécessiterait malgré tout l'installation d'une interconnexion de grande capacité permettant d'acheminer l'eau potable sur le réseau Desjardins.

À plus long terme, advenant le cas où les deux prises d'eau de Lévis qui puisent leur eau brute dans le fleuve seraient compromises, il faudrait que l'eau soit puisée dans la rivière Chaudière. Indépendamment de la capacité du système à produire et à acheminer l'eau du secteur de Charny vers les secteurs de Saint-Romuald et Desjardins, nous avons étudié l'impact de prélever toute l'eau brute nécessaire à alimenter la population de Lévis directement dans la rivière Chaudière. Dans ce cas extrême de perte d'accès au fleuve, le critère hydrologique a été estimé de sorte à évaluer la capacité de la Chaudière à supporter une pression accrue sur la ressource en eau. Le risque de pénurie d'eau serait augmenté, mais resterait peu probable malgré tout (moins de 0,001 % des projections futures).

Considérant que la problématique de l'avancement du front salin dans le fleuve ne se produira pas du jour au lendemain et qu'on ne perdrait pas complètement l'utilisation des prises d'eau, ce scénario catastrophique doit être interprété avec nuances. En effet, la progression du front salin aurait probablement comme conséquence d'empêcher le prélèvement d'eau brute seulement pour une partie de la journée à marée haute. Il serait donc possible de prélever de l'eau brute pour la majeure partie de la journée sauf au plus haut point de la marée.

La perte des prises d'eau du fleuve en raison de l'avancée du front salin aurait des impacts importants sur la capacité des infrastructures de production d'eau potable de la Ville de Lévis à alimenter la population. Toutefois, la disponibilité en eau dans la rivière Chaudière ne semble pas le facteur qui mettrait en péril cet approvisionnement.

3.5.2.5 Sommaire de la vulnérabilité du système d'approvisionnement de Lévis

Globalement, la vulnérabilité des systèmes d'approvisionnement en eau potable de la Ville de Lévis est faible face à l'évolution des conditions climatiques et à la croissance de la population sur son territoire. La capacité des installations actuellement en opération ne devrait pas être dépassée à l'intérieur de l'horizon d'analyse à moins de changements majeurs dans les habitudes de consommation des citoyens et des secteurs ICI.

En ce qui concerne la vulnérabilité du système de Charny, l'évolution de la population dans ce secteur de même que les changements hydrologiques en lien avec l'évolution dans le climat ne menacent pas la sécurité de l'approvisionnement en eau potable sur ce territoire. Au niveau écologique, l'augmentation de la sévérité des étiages estivaux augmentera la fréquence de non-respect des débits écologiques et esthétiques relativement à l'historique, et ce de façon croissante sur l'horizon d'étude.

Au moment d'écrire ce rapport, un plan alternatif de mesures d'urgence existe et peut être mis en place rapidement advenant une catastrophe compromettant l'approvisionnement de l'une ou l'autre des prises d'eau. Il apparaît toutefois encore pertinent d'évaluer le bien-fondé et la valeur ajoutée d'accroître la capacité de transfert entre les réseaux pour se prémunir de manière préventive et durable aux risques d'accidents environnementaux majeurs – comme celui de Mégantic – qui pourraient se produire autant dans le fleuve que dans la rivière Chaudière. À cela s'ajoute la problématique de l'avancement du front salin. Considérant que 70 % de l'approvisionnement en eau potable de la ville de Lévis provient du fleuve Saint-Laurent et qu'il est possible que le front salin migre progressivement vers les prises d'eau de l'UPE de Desjardins et ensuite de Saint-Romuald, il sera éventuellement nécessaire d'investiguer plus en détail les conséquences de ce phénomène pour la Ville. Celui-ci pose une menace importante à la pérennité de

l'approvisionnement en eau potable sur le territoire, menace qui semble davantage liée à la planification stratégique des infrastructures d'approvisionnement qu'à la disponibilité en eau sur le territoire.

3.6 ANALYSE DE VULNÉRABILITÉ POUR LA VILLE DE QUÉBEC

L'approvisionnement en eau potable de l'agglomération de Québec est assuré par 4 réseaux (Sainte-Foy, Québec, Charlesbourg et Beauport) qui alimentent une population de près de 600 000 habitants. L'approvisionnement se fait à partir de 3 principales sources d'approvisionnement, soit la rivière Saint-Charles, la rivière Montmorency et le fleuve Saint-Laurent[12]. La capacité de production totale s'élève actuellement à 436 000 m³/jour et passera à 496 000 m³/jour une fois l'agrandissement de l'usine de Sainte-Foy réalisé (les travaux sont en cours de réalisation). Chacun des 4 réseaux possède une interconnexion avec au moins un autre des réseaux. Cela permet de transférer certaines quantités d'eau entre les réseaux.

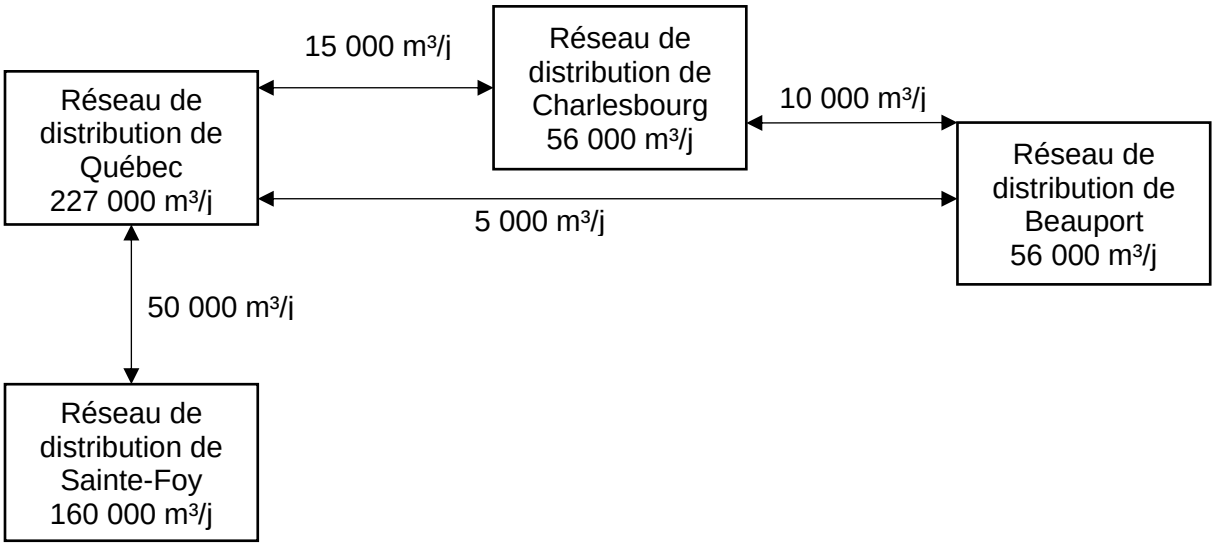


Figure 27. Schéma simplifié des interconnexions entre les quatre réseaux de l'agglomération de Québec (construit à partir de Ville de Québec (2016))

Ces interconnexions permettent notamment de réduire les coûts de traitement et de distribution en priorisant les réseaux dont le coût est le moins élevé. Cette configuration permet également de se prémunir en partie contre les conditions critiques de disponibilité en eau. La Figure 27 résume les interconnexions entre les réseaux de même que leur capacité. La plus importante interconnexion est celle entre le réseau de Sainte-Foy et celui de Québec (50 000 m³/j). La mise en opération de cette interconnexion permet déjà de réduire substantiellement la vulnérabilité du réseau de Québec et sera un facteur de résilience encore plus important lorsque l'agrandissement de l'usine de Sainte-Foy sera terminé.

[12] L'eau de surface de ces trois sources couvre approximativement 99 % des besoins en eau de l'agglomération. Environ 1 % de l'approvisionnement vient d'eau souterraine.

En temps normal, l'eau est généralement transférée de l'UPE de Québec vers le réseau de Sainte-Foy puisqu'il en coûte moins cher de transporter l'eau à Québec en raison de la configuration du système (gravitaire). Cependant, lors des épisodes d'étiages estivaux importants, l'interconnexion est utilisée pour transférer de l'eau du réseau de Sainte-Foy à celui de Québec afin de maintenir le niveau du lac Saint-Charles suffisamment haut pour assurer l'approvisionnement en eau dans le réseau de Québec.

3.6.1 PROJECTION DE CONSOMMATION

La population devrait croître d'environ 11 % entre 2021 et 2050 sur le territoire de l'agglomération de Québec avec une croissance plus importante dans le secteur de Beauport (15,7 %) et plus faible dans le secteur de Charlesbourg (7,2 %). La population desservie par le réseau de Québec devrait croître d'environ 9,8 % tandis que celle du secteur de Sainte-Foy de 14,7 %.

Les Figures 28 à 31 présentent l'évolution de la quantité moyenne et maximale d'eau distribuée quotidiennement pour chacun des quatre réseaux de l'agglomération de Québec. Les graphiques sont construits à partir des projections de l'ensemble des 56 scénarios climatiques utilisés pour Québec.

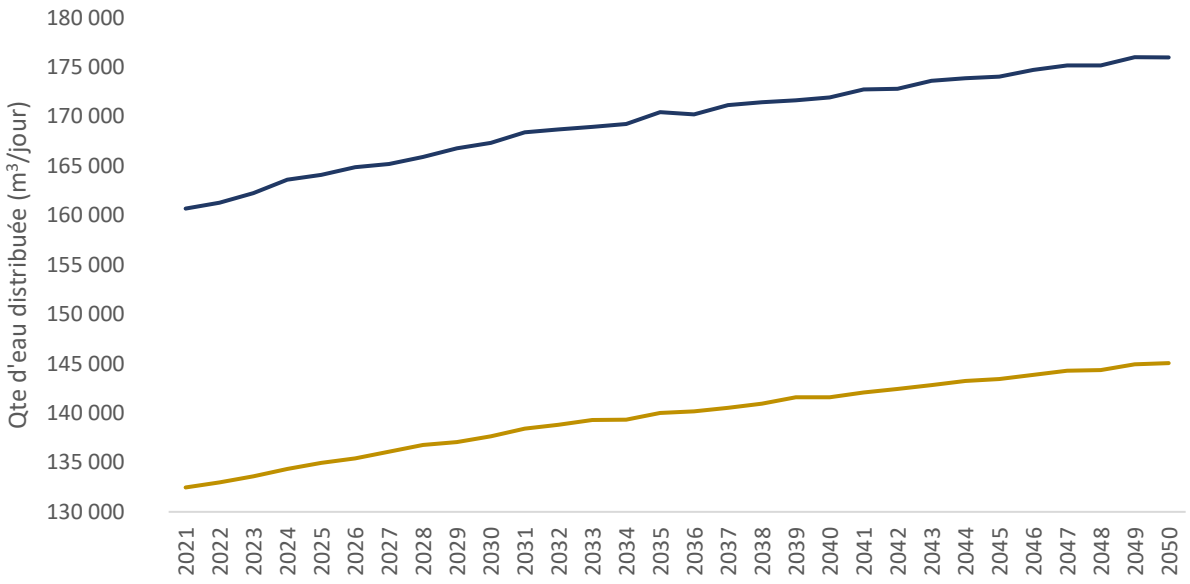


Figure 28. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau de Québec.

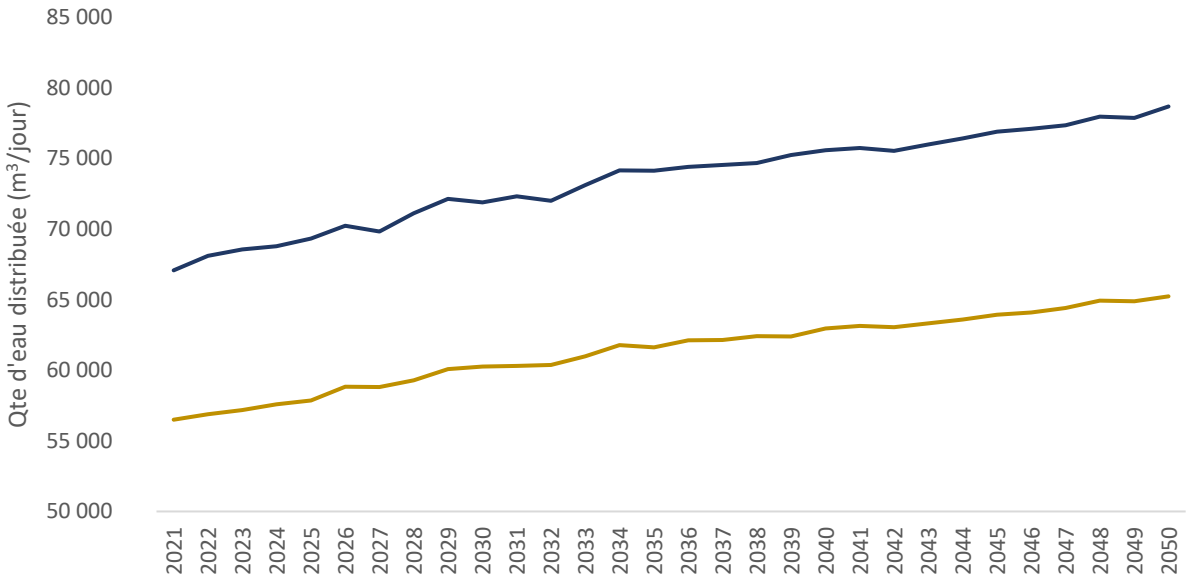


Figure 29. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau de Sainte-Foy.

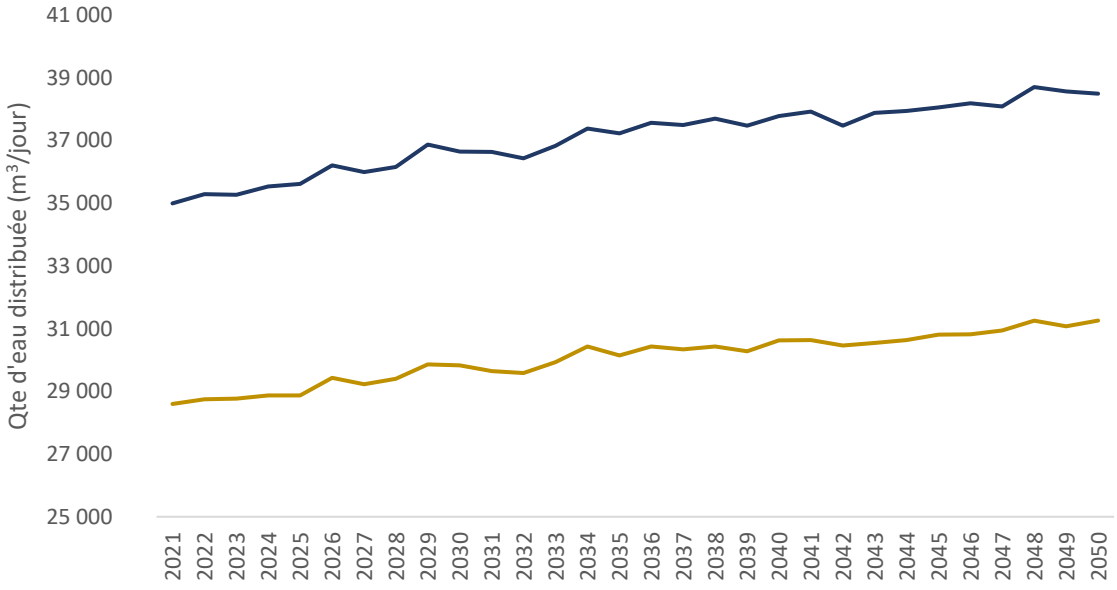


Figure 30. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau de Charlesbourg.

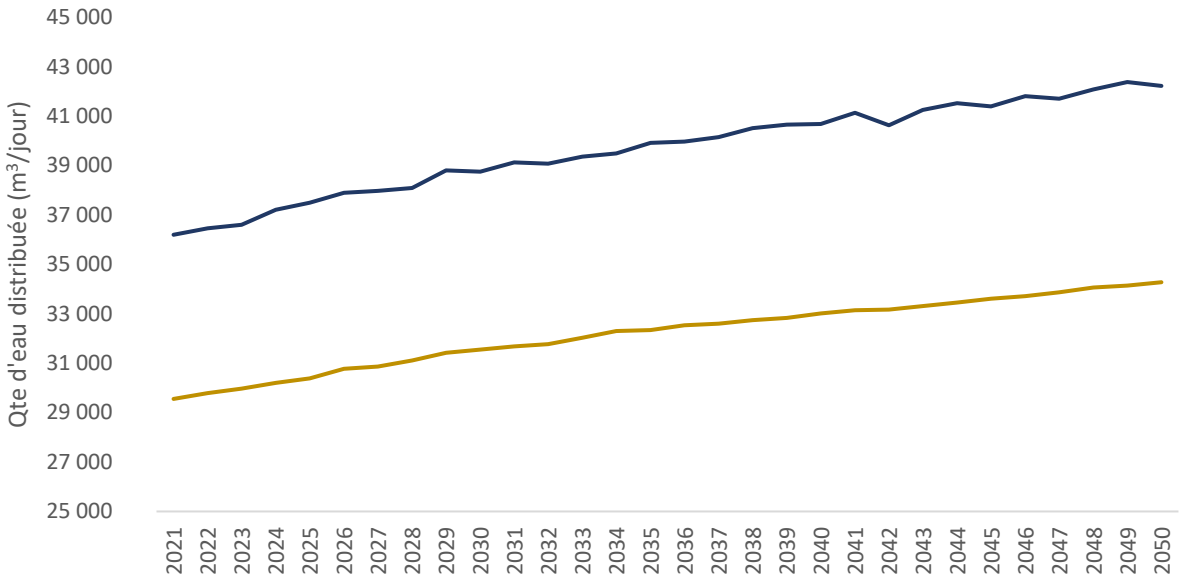


Figure 31. Projections de la demande moyenne (or) et maximale (bleu) quotidienne pour l'horizon 2021 à 2051 pour le réseau de Beauport.

La croissance de la consommation suit l'évolution de la population pour chacun des quatre réseaux d'approvisionnement avec un effet positif quoique relativement marginal de l'évolution du climat sur les quantités d'eau distribuée quotidiennement.

3.6.2 ANALYSE DE LA VULNÉRABILITÉ

3.6.2.1 Critère opérationnel

Le premier critère d'analyse est lié à des enjeux opérationnels plutôt que de disponibilité en eau. Il s'intéresse à la consommation quotidienne maximale quotidienne en comparaison de la capacité de traitement de l'usine. Afin d'évaluer le risque de dépassement de la capacité de production, les quantités d'eau distribuées quotidiennes sont d'abord comparées à la capacité de production des quatre UPE pour leurs réseaux respectifs, pour chaque jour entre le 1er janvier 2021 et le 31 décembre 2050 pour les 56 scénarios climatiques pour Québec.

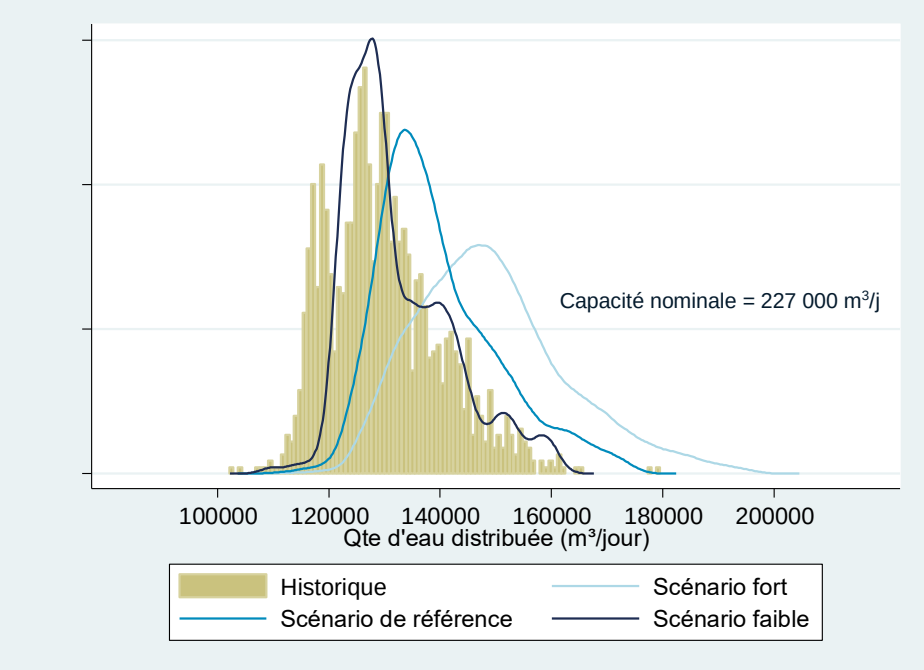


Figure 32. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE de Québec.

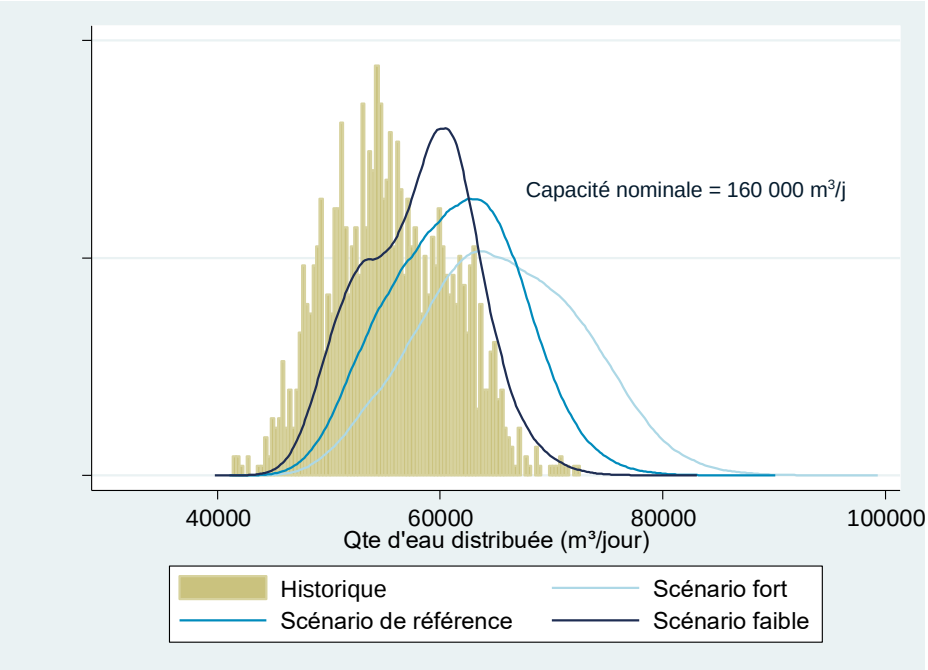


Figure 33. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE de Sainte-Foy.

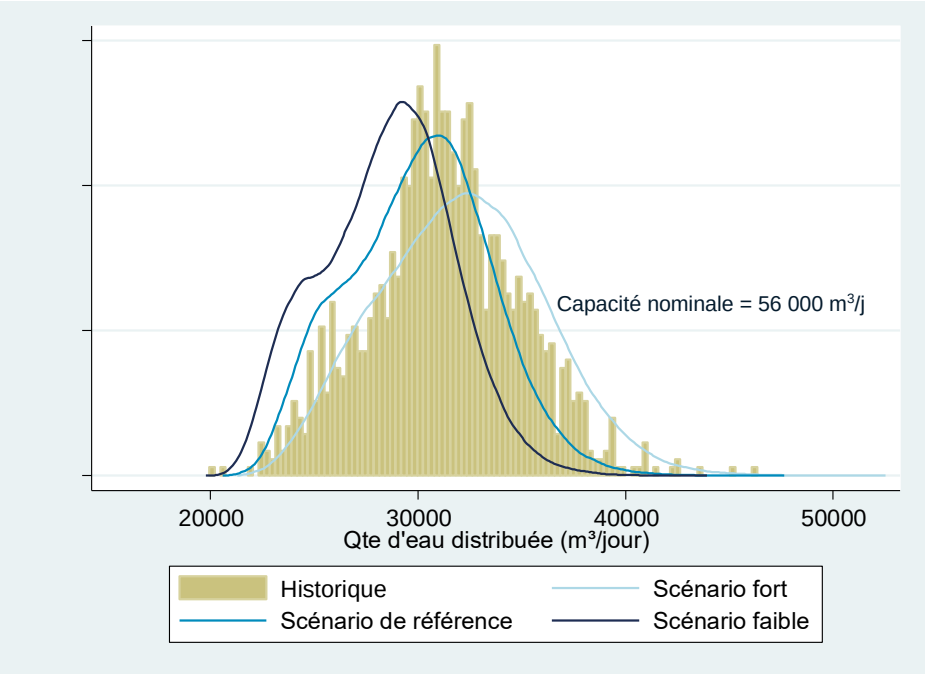


Figure 34. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE de Charlesbourg.

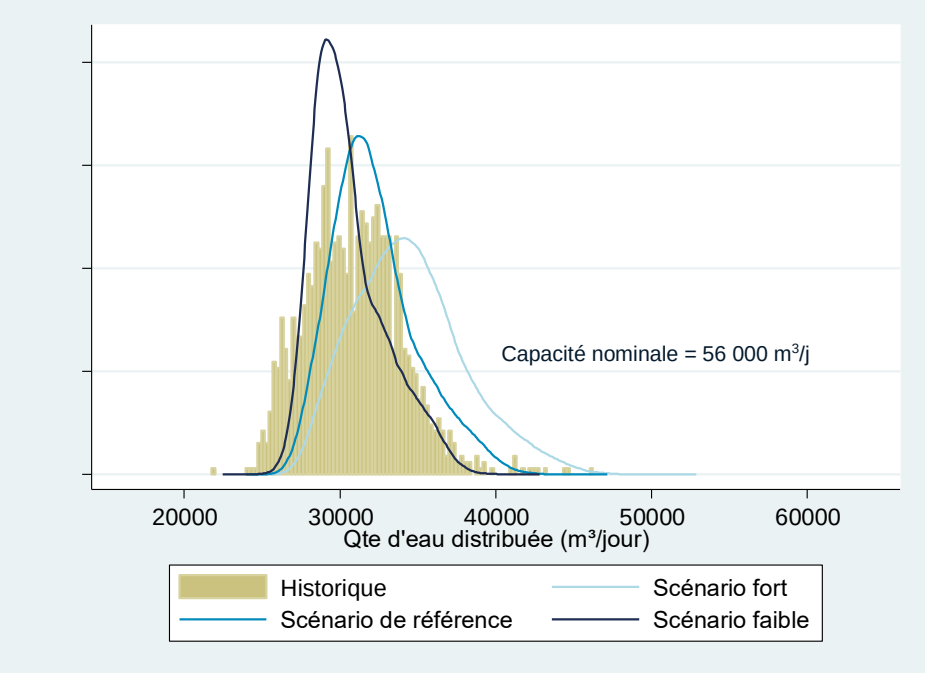


Figure 35. Distribution de la demande quotidienne historique (or) et projetée pour les scénarios de croissance démographique faible (marine), de référence (bleu) et fort (bleu pâle) pour l'horizon 2021 à 2051 pour l'UPE de Beauport.

Les Figures 32 à 35 présentent les quantités d'eau distribuée quotidiennes historiques (or) et futures (bleu) pour les quatre réseaux d'approvisionnement de Québec sur la période 2021-2050. Pour les UPE du réseau de Québec (capacité nominale de 227 000 m³/j) et de Charlesbourg (capacité nominale de 56 000 m³/j), la demande en eau potable n'excède jamais la capacité de production nominale. Le même constat s'applique pour le réseau de Sainte-Foy considérant que la capacité de production sera augmentée à 160 000 m³/j avant 2021. Pour le réseau de Beauport, le scénario de croissance de population forte suggère quelques dépassements de la capacité de production d'ici la fin de l'horizon d'analyse. Ces dépassements se produisent en fin d'horizon, soit à partir de 2044. La probabilité de dépassement demeure cependant très faible.

3.6.2.2 Critère hydrologique

Le critère hydrologique correspond au croisement entre la disponibilité en eau (offre) et la consommation en eau potable (demande). Ce critère vise à identifier le risque de pénuries en lien avec l'évolution des conditions hydrologiques. Ce qui importe pour l'analyse de vulnérabilité, c'est d'identifier les probabilités associées à des besoins de consommation qui dépasseraient la disponibilité de la ressource en rivière.

Québec s'approvisionne principalement dans la rivière Saint-Charles, dans la rivière Montmorency et dans le fleuve Saint-Laurent. La plus grande UPE s'alimente dans la rivière Saint-Charles dont le débit peut être modulé partiellement grâce au barrage Cyrille-Delage et à la capacité de stockage du lac Saint-Charles. Malgré ces mécanismes de gestion, la rivière Saint-Charles est vulnérable aux faibles débits estivaux et une gestion serrée doit être assurée afin de minimiser les risques de pénurie.

Pour la rivière Saint-Charles, sur la seule base de la disponibilité en eau en vertu des débits projetés, il est anticipé que le risque de pénurie augmente progressivement. Les projections journalières présentent 3,45 % des occurrences où le débit de la rivière Saint-Charles est inférieur à la demande en eau potable sur le réseau. Cette proportion est en croissance entre 2021 et 2050.

Sachant que les réseaux de Sainte-Foy et de Québec sont interconnectés par une conduite de 50 000 m³/j, nous avons recalculé la probabilité de pénurie en exploitant cette capacité de transfert. Il est supposé qu'en cas de maque d'eau, l'UPE de Sainte-Foy fournira une part des besoins en eau du réseau de Québec. Aux fins de l'analyse, la capacité de transfert entre les réseaux de Sainte-Foy et de Québec est bornée soit par la capacité de l'interconnexion (50 000 m³/j), soit par la capacité résiduelle de l'usine de Sainte-Foy si elle est plus petite que 50 000 m³/j. Lorsque cela se produit, la proportion des jours où il n'est pas possible de répondre aux besoins pour le réseau de Québec chute à 0,74 %.

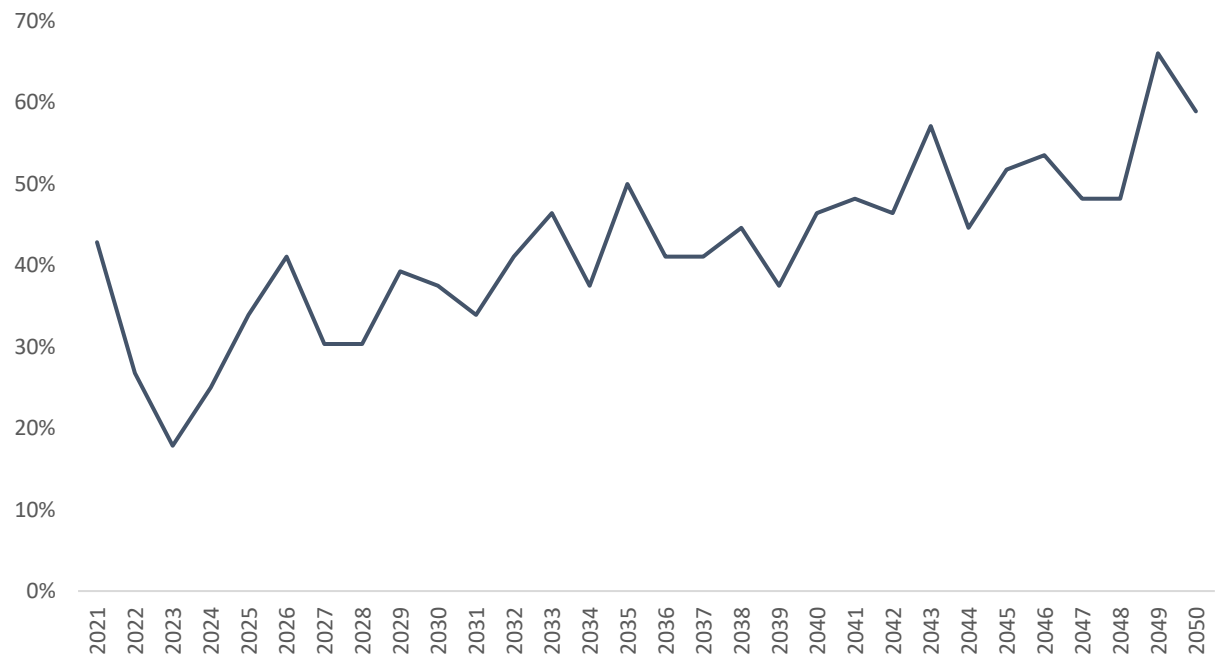


Figure 36. Évolution du pourcentage de scénarios climatiques présentant minimalement une journée de pénurie d'eau potable dans l'année pour le réseau de Québec entre 2021 et 2050 pour les 56 scénarios climatiques en considérant l'interconnexion entre le réseau de Québec et de Sainte-Foy

La Figure 36 illustre la probabilité annuelle de faire face à une pénurie d'eau pour le réseau. Cette probabilité est calculée en fonction du nombre de scénarios hydroclimatiques qui affichent au moins une journée de pénuries d'eau dans l'année.

Les résultats démontrent que la durée et l'intensité des pénuries ne seront pas réellement en croissance au cours des trente prochaines années, c'est plutôt au niveau de la probabilité des épisodes de pénurie potentiels que l'on constate une évolution marquée. La probabilité de vivre un épisode de pénurie doublera essentiellement pour le réseau de la ville de Québec. Ces résultats sont cohérents avec l'évolution anticipée des conditions climatiques et hydroclimatiques. Autrement dit, nous nous attendons davantage à un accroissement de la fréquence des étiages estivaux, mais pas nécessairement à un accroissement de leur intensité ni de leur durée.

La modélisation actuelle de la gestion des étiages et des pénuries grâce à l'interconnexion avec le réseau de Sainte-Foy suppose une gestion à court terme avec une anticipation limitée des problématiques. Autrement dit, lorsque les opérateurs anticipent une baisse des apports dans le lac, ils transfèrent de l'eau du réseau de Sainte-Foy vers le réseau de Québec afin de maintenir le lac à un niveau acceptable pour les prochains jours. Le Tableau 13 résume les paramètres clés des pénuries appréhendées pour le réseau de Québec selon la modélisation simplifiée du système d'approvisionnement en eau de Québec.

Tableau 13. Fréquence, durée et intensité des épisodes de pénurie futurs pour le réseau de Québec en considérant l'interconnexion entre le réseau de Québec et de Sainte-Foy.

Période	Probabilité	Durée moyenne (en jours)	Intensité (déficit moyen par jour)
2021-2025	0,48 %	3,2	15 600 m^3
2026-2030	0,60 %	2,8	14 808 m^3
2031-2035	0,75 %	2,9	17 115 m^3
2036-2040	0,77 %	2,8	15 739 m^3
2041-2045	0,84 %	2,6	15 004 m^3
2046-2050	1,02 %	2,9	16 862 m^3

Pour la rivière Montmorency qui alimente les UPE de Charlesbourg et de Beauport, les journées critiques où le débit de la rivière n'est pas suffisant pour alimenter les deux prises d'eau sont très faibles, soit dans moins de 0,01 % des projections journalières futures. En considérant que l'UPE de Charlesbourg s'approvisionne également dans le lac des Roches, la rivière des Sept Ponts et dans le lac Bégon, il est fort probable que ce pourcentage soit encore plus faible.

L'analyse du critère hydrologique n'est pas réalisée pour la prise d'eau de Sainte-Foy puisque celle-ci s'approvisionne dans le fleuve. Un suivi de l'évolution de la remontée du front salin devrait cependant être assuré afin de garantir que ce phénomène ne menacera pas la prise d'eau à long terme.

3.6.2.3 Critères environnementaux

Le soutirage d'eau brute ne devrait pas mener à un débit d'eau inférieur au débit écologique en rivière. Pour la rivière Saint-Charles deux débits écologiques ont été définis, soit un débit de 0,9 m^3/s en tout temps et un débit de 0,6 m^3/s lors des étiages estivaux sévères. Le Tableau 14 résume l'évolution du non-respect des débits écologiques pour la rivière Saint-Charles historiquement (2013-2017) et pour les années 2021-2050 selon les scénarios hydrologiques et de consommation. Les résultats montrent une croissance de la fréquence de non-respect entre le début de la période de l'horizon d'analyse et sa fin. Ils montrent également une fréquence de non-respect globalement plus élevée dans la période future que dans la période historique. Le tableau illustre que la capacité de transfert des eaux de Sainte-Foy diminue substantiellement le risque de non-respect du débit écologique. En contrepartie, tel que mentionné plus haut, les coûts de traitement et d'acheminement de l'eau de Sainte-Foy vers Québec sont plus élevés que les coûts du traitement de l'eau brute directement de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles à l'usine de Québec.

Tableau 14. Fréquence du non-respect des débits écologiques pour la rivière Saint-Charles

	Débit écologique normal		Débit écologique critique	
Période	**Absence de transfert**	**Avec transfert entre réseaux**	**Absence de transfert**	**Avec transfert entre réseaux**
Historique	4,6 %	0,1 %	1,1 %	0,0 %
2021-2025	9,6 %	4,4 %	6,7 %	2,4 %
2026-2030	10,4 %	5,0 %	7,5 %	2,9 %
2031-2035	11,5 %	5,8 %	8,5 %	3,5 %
2036-2040	11,3 %	5,8 %	8,3 %	3,4 %
2041-2045	11,9 %	6,3 %	9,1 %	3,7 %
2046-2050	12,5 %	6,7 %	9,5 %	4,1 %

Au même titre que l'évolution dans le risque de pénurie, une tendance claire se dégage quant à la fréquence de non-respect des débits écologiques au cours de l'horizon d'analyse. Malgré des bénéfices évidents de la mise en opération et de l'exploitation de l'interconnexion entre les réseaux de Sainte-Foy et de Québec, le non-respect des débits écologiques pourrait survenir jusqu'à 6,7 % des jours à l'horizon 2046-2050, ce qui constitue une hausse marquée par rapport à la période historique. Le même constat s'applique au débit écologique critique (0,6 m^3/s), où plus de 4 % des projections journalières de débit résiduel futur se situent sous le seuil du débit écologique critique. Bien que cette analyse se concentre sur la quantité d'eau et non pas sur la qualité de l'eau, ces problématiques sont interreliées. Une augmentation de la fréquence des faibles débits pourrait mener à un accroissement de différentes problématiques de qualité de l'eau, ce qui à terme pourrait menacer l'approvisionnement en eau.

Pour la rivière Montmorency, la situation est beaucoup moins critique que pour la rivière Saint-Charles. Le soutirage des secteurs de Beauport et de Charlesbourg alimente certes plus de 100 000 habitants, mais le débit moyen de la rivière est beaucoup plus important que celui de la rivière Saint-Charles. Le non-respect du critère écologique survient environ dans 1 % des débits quotidiens futurs projetés. Comme pour les autres rivières, la fréquence de journées problématiques tend à croître sur l'horizon d'analyse. Pour la rivière Montmorency, lors des journées où le débit quotidien résiduel se situe sous le débit écologique, dans 50 % des cas c'est soutirage d'eau brute qui en est la cause.

3.6.2.4 Sommaire de la vulnérabilité du système d'approvisionnement de Québec

Le réseau d'approvisionnement de Québec est soumis à une forte demande due à la taille de la population sur le réseau. Les épisodes d'étiages de 2002 et 2010 ont démontré la vulnérabilité du réseau, en particulier pour le réseau de la ville de Québec qui s'approvisionne dans la rivière Saint-Charles. Les interventions réalisées sur le réseau, notamment l'interconnexion de 50 000 m^3 entre le réseau de Sainte-Foy et celui de Québec, permettent de réduire substantiellement la vulnérabilité du système. Toutefois, les projections

réalisées dans le cadre de ce projet suggèrent que ces interventions ne permettent pas d'éliminer tout le risque associé aux pénuries d'eau sur le territoire. Ce risque devrait être en croissance en termes de fréquence, mais ne devrait pas mener à des épisodes de pénuries plus longs ou plus intenses. Il est ainsi recommandé de poursuivre le travail d'analyse et d'étudier les mesures d'adaptation disponibles afin d'éliminer complètement ce risque de pénurie sur le territoire de l'agglomération de Québec.

4. L'ÉCONOMIE DES MESURES DE RÉDUCTION DU RISQUE DE PÉNURIE D'EAU POTABLE

Comme il a été exposé précédemment, plusieurs municipalités de la CMQ s'approvisionnent à partir d'eaux de surface provenant notamment des rivières Montmorency, Saint-Charles, Ferrée, Sault-à-Puce, Sainte-Anne, Chaudière et du fleuve Saint-Laurent. La capacité de ces municipalités à fournir de l'eau potable aux citoyens et aux différents usagers sur le territoire est en conséquence tributaire de l'hydrologie de ces cours d'eau. Or, même s'il y a une abondance en eau douce sur le territoire de la CMQ et au Québec en général, certaines périodes critiques lors d'étiages sévères, combinées à des pointes de consommation, peuvent mettre en péril la capacité des systèmes d'approvisionnement en eau des municipalités.

Ces pénuries de durée et d'intensité variables lorsqu'elles surviennent, représentent des coûts importants tant pour les usagers que pour les municipalités qui doivent mettre en place des mesures d'urgence. De même, les étiages sévères se traduisent souvent par des niveaux d'eau en deçà des seuils écologiques requis pour la biodiversité aquatique et par des coûts pour la société.

4.1 SYNTHÈSE DE LA VULNÉRABILITÉ

Des étiages sévères dans la rivière Saint-Charles, survenus lors des étés 2002 et 2010, ont forcé la Ville de Québec à revoir sa planification stratégique à long terme et à prendre des mesures pour réduire la vulnérabilité de son système d'approvisionnement en eau potable. Parmi ces mesures figurent la mise en place d'interconnexions de grande capacité entre ses réseaux d'aqueducs, la gestion des fuites en réseaux, les programmes d'économie d'eau potable et éventuellement, la tarification modulée selon les périodes de l'année. Mais la situation a aussi poussé la CMQ à réfléchir sur les enjeux d'approvisionnement en eau potable à l'échelle des bassins versants.

L'effet anticipé des changements climatiques pourrait amplifier la fréquence et l'intensité des étiages estivaux critiques lors des périodes de canicule, précisément aux moments où la demande est la plus forte. Comme le montre le graphique suivant, obtenu en appliquant des scénarios de changements climatiques à la modélisation hydrologique des principales rivières de la CMQ, on anticipe, pour les mois de juin, juillet, août et septembre, une baisse marquée de plusieurs points de pourcentage du débit mensuel des différentes rivières approvisionnant la CMQ à l'horizon 2050.

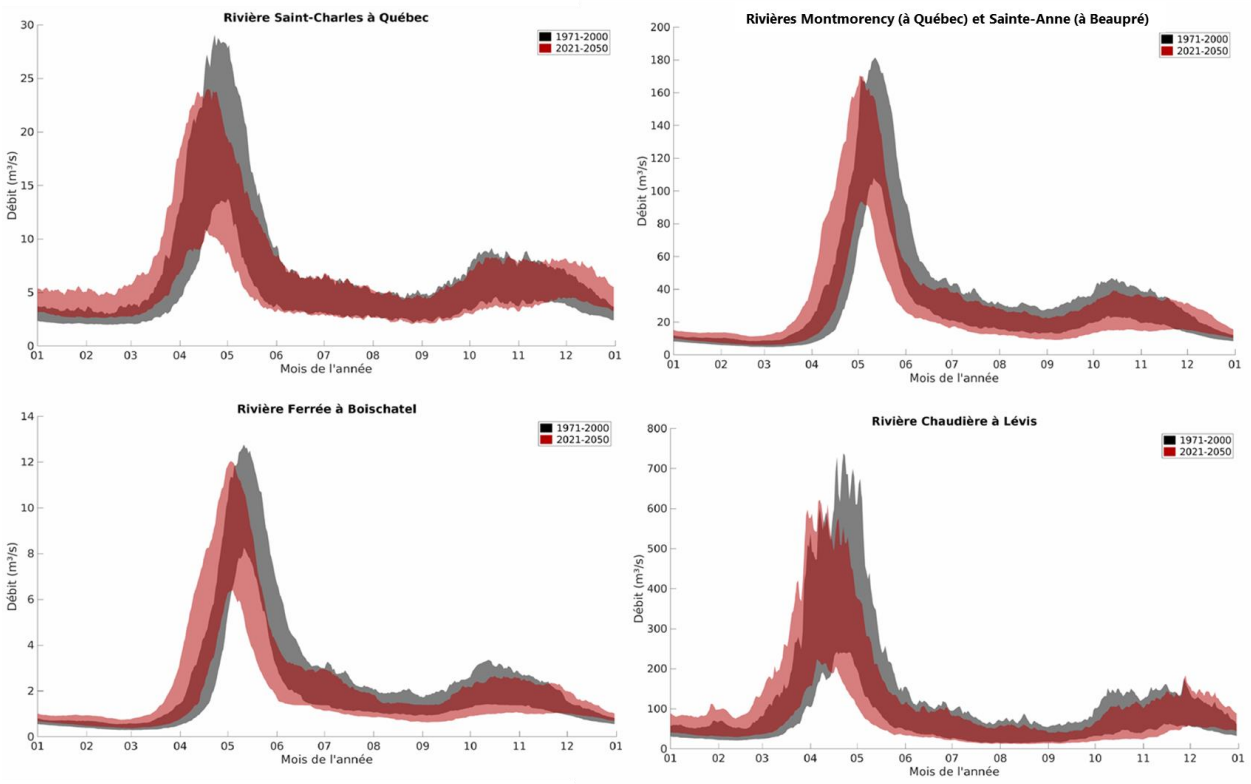


Figure 37. Projections hydrologiques pour les rivières Sainte-Charles, Montmorency, Ferrée et Chaudière. La figure présente les 25^{e} et 75^{e} percentiles de la distribution de débits (m³/s) pour les périodes de référence (1971-2000) et futures (2021-2050). Les changements pour la rivière Sainte-Anne correspondent à ceux de la rivière Montmorency.

C'est cette baisse anticipée des débits mensuels qui soulève des appréhensions relatives à la vulnérabilité de l'approvisionnement en eau, soit la capacité des systèmes d'approvisionnement des diverses municipalités à fournir en tout temps les volumes nécessaires à la consommation. Il s'agit en effet pour elles de s'assurer qu'au-delà de l'adéquation entre la capacité opérationnelle de leurs unités de production d'eau potable et les besoins de la population, il y ait aussi une adéquation hydrologique entre les volumes d'eau disponibles en rivière et les besoins des unités de production, tout en respectant les normes de débits écologiques.

Les analyses décrites dans les précédents chapitres pour cinq des municipalités de la CMQ – soit les villes de Boischatel, Château-Richer, Beaupré, Québec et Lévis - montrent que, malgré la baisse des débits, le niveau de vulnérabilité est très variable d'une municipalité à l'autre. En effet, alors que les municipalités de la Côte de Beaupré semblent peu vulnérables aux problèmes d'approvisionnement en eau en période d'étiage, il n'en est pas de même pour les villes de Québec et de Lévis où l'on anticipe une vulnérabilité plus importante notamment en raison d'une forte croissance de la consommation au cours des prochaines décennies.

4.1.1 BEAUPRÉ, CHÂTEAU-RICHER, BOISCHATEL ET L'ANGE-GARDIEN

Ainsi, de manière générale, malgré les variations attendues dans le régime hydrologique de la rivière Sainte-Anne, le système d'approvisionnement en eau potable de la municipalité de Beaupré n'est pas vulnérable et peut répondre à la croissance prévue de la consommation en contexte de changements climatiques. Le soutirage quotidien correspond en règle générale à une très faible proportion du débit de la rivière Sainte-Anne.

De même, sur la base des informations disponibles pour la municipalité de Château-Richer, il apparaît que l'augmentation de la consommation provenant de la croissance démographique, combiné à l'effet des changements climatiques, ne mettra pas à risque la capacité de la municipalité à alimenter sa population.

Selon le scénario de référence de l'ISQ, la croissance de la population projetée sur le territoire de Boischatel et L'Ange-Gardien (toutes deux desservies par le même réseau) serait de 55 % entre 2021 et 2050. Cela correspond à plus de 6 500 nouveaux résidents sur le territoire au cours des 30 prochaines années. C'est le principal facteur de croissance de la consommation moyenne quotidienne pour l'horizon d'étude qui, globalement, devrait passer d'environ 3 000 m³/jour à environ 4 800 m³/jour en 2050. De même, la quantité maximale journalière qui correspond aux pointes de consommation estivale, devrait croître de manière importante, passant d'environ 5 100 m³/jour à 8 100 m³/jour.

De manière générale, le système d'approvisionnement en eau potable de la municipalité de Boischatel affiche une faible vulnérabilité aux variations attendues dans le régime hydrologique de la rivière Ferrée en contexte de changements climatiques ainsi qu'à la croissance anticipée de la consommation. Cependant, la décision de mettre en place une nouvelle prise d'eau dans la rivière Montmorency permet de réduire la pression sur la rivière Ferrée afin de respecter les débits écologiques requis. Elle garantit aussi une plus grande flexibilité dans le système, ce qui s'avère un élément clé de résilience face à l'évolution des régimes hydrologiques futurs.

En somme pour cette municipalité, les trois classes de critères de vulnérabilité (opérationnelle, hydrologique et écologique) ne suggèrent pas de problématique majeure sur l'horizon d'étude. Si l'évolution de la population correspond au scénario de plus forte croissance, il est possible que la demande en eau potable s'approche de la capacité de production de l'UPE vers la fin de l'horizon d'analyse. Ce faisant, la municipalité devra revoir sa planification stratégique vers 2035-2040 à la lumière de l'évolution réelle de sa population et des consommations unitaires sur son territoire.

En ce qui concerne la disponibilité en eau dans les rivières Ferrée et Montmorency, il y a de très faibles chances qu'une journée de pénurie d'eau survienne au cours des 30 prochaines années, bien que les

étiages estivaux deviendront plus fréquents et plus sévères. L'impact se fera surtout sentir sur le débit écologique de la rivière Ferrée qui sera de plus en plus difficile à respecter selon les critères établis sur la base des débits historiques en rivière. Bien que le soutirage dans la Ferrée soit rarement responsable de cela, il pourrait s'avérer judicieux d'optimiser le soutirage des deux prises d'eau de manière à assurer un respect des débits écologiques dans les deux rivières.

4.1.2 QUÉBEC

En ce qui concerne les réseaux de la Ville de Québec, les projections de demandes ne laissent pas entrevoir de vulnérabilités opérationnelles. Les capacités des unités de production d'eau potable semblent adéquates pour les prévisions de consommation sur l'horizon 2050, même en tenant compte d'une prévision de croissance forte de la population et des effets des changements climatiques.

Selon le scénario de référence de l'ISQ, la croissance de la population projetée sur le territoire de Québec serait de 11 % entre 2021 et 2050. Cela correspond à plus de 31 000 nouveaux résidents sur le territoire au cours des 30 prochaines années. C'est le principal facteur de croissance de la consommation moyenne quotidienne pour l'horizon d'étude qui, globalement, devrait passer d'environ 247 000 m³/jour à environ 276 000 m³/jour en 2050. De même, la quantité maximale journalière qui correspond aux pointes de consommation estivale, devrait croître de manière importante, passant d'environ 301 000 m³/jour à 335 000 m³/jour.

Cependant, les épisodes d'étiages de 2002 et 2010 ont démontré la vulnérabilité hydrologique du réseau, en particulier pour le réseau de la Ville de Québec qui s'approvisionne dans la rivière Saint-Charles. Les interventions réalisées sur le réseau, notamment l'interconnexion de 50 000 m³ entre le réseau de Sainte-Foy et celui de Québec, permettent de réduire substantiellement la vulnérabilité du système. Toutefois, les projections réalisées dans le cadre de ce projet suggèrent que ces interventions ne permettent pas d'éliminer tout le risque associé aux pénuries d'eau sur le territoire au cours des prochaines décennies. Ce risque, bien que faible, devrait croitre sur le plan de la fréquence, même s'il ne devrait pas mener à des épisodes de pénuries plus longs ou plus intenses.

Comme l'évolution du risque de pénurie, une tendance claire se dégage quant à la fréquence de non-respect des débits écologiques au cours de l'horizon d'analyse. Malgré des bénéfices évidents de la mise en opération et de l'exploitation de l'interconnexion entre les réseaux de Sainte-Foy et de Québec, qui feront passer le potentiel d'apport en eau brute du fleuve Saint-Laurent à près de 10% de la capacité totale du réseau de la Ville, le non-respect des débits écologiques pourrait survenir près de 7 % des jours à l'horizon 2046-2050, ce qui constitue une hausse marquée par rapport à la période historique. Le même constat s'applique au débit écologique critique (0,6 m³/s), où plus de 4 % des projections journalières de débit résiduel futur se situent sous le seuil du débit écologique critique. Bien que cette analyse se concentre

sur la quantité d'eau et non pas sur la qualité de l'eau, ces problématiques sont inter-reliées. Une augmentation de la fréquence des faibles débits pourrait mener à un accroissement de différentes problématiques de qualité de l'eau, ce qui à terme pourrait générer certains défis pour le traitement en usines et l'approvisionnement en eau.

Pour la rivière Montmorency, la situation est beaucoup moins critique que pour la rivière Saint-Charles. Le soutirage des secteurs de Beauport et de Charlesbourg alimente certes plus de 100 000 habitants, mais le débit moyen de la rivière est beaucoup plus important que celui de la rivière Saint-Charles. Le non-respect du critère écologique ne surviendrait dans ce cas que dans environ 1 % des débits quotidiens futurs projetés. Comme pour les autres rivières, la fréquence de journées problématiques tend à croître sur l'horizon d'analyse. Il n'a pas été possible d'identifier un seuil pour le débit esthétique nécessaire à la chute Montmorency, mais il est raisonnable de croire que la fréquence de journées problématiques pour ce paramètre risque lui aussi d'augmenter dans le futur. Pour la rivière Montmorency, lors des journées où le débit quotidien résiduel se situe sous le débit écologique, le soutirage de l'eau brute en est la cause dans 50 % des cas, ce qui souligne l'importance de poursuivre les efforts relatifs au gaspillage de l'eau dans les fuites et les usages extérieurs.

4.1.3 LÉVIS

Selon les projections obtenues de l'ISQ et de la Ville, la population de Lévis devrait croître d'environ 30 % au cours des 30 prochaines années. La croissance de population attendue dans les territoires desservis par les trois réseaux de distribution de la Ville de Lévis est relativement homogène. La croissance sera de 25 % pour le réseau de Charny, 29 % pour le réseau Desjardins et 33 % pour Saint-Romuald. Globalement, les consommations moyennes quotidiennes progresseront proportionnellement à l'évolution de la population sur les trois réseaux.

Lévis s'approvisionne à la fois dans la rivière Chaudière et dans le fleuve Saint-Laurent. Le risque de pénurie d'eau touche essentiellement la rivière Chaudière considérant que le débit et le niveau du fleuve ne sont pas contraignants. À cet égard, les résultats indiquent un risque relativement limité considérant l'évolution de l'hydrologie de la rivière Chaudière par rapport à celle des besoins en eau. Comme le réseau d'approvisionnement de Charny s'alimente dans la rivière Chaudière, dans les conditions actuelles où il n'est pas possible de transférer de l'eau brute d'un réseau à l'autre, les projections journalières futures suggèrent une possibilité d'une journée de pénurie d'eau, c'est-à-dire que le soutirage d'eau brute serait supérieur au débit en rivière, qui serait inférieure à 1 % sur une base annuelle.

Une interconnexion entre les réseaux de Saint-Romuald et Charny permettrait d'éliminer ce faible risque, en plus de se prémunir contre les risques d'incidents qui viendraient compromettre l'une ou l'autre des

prises d'eau. Des analyses plus détaillées seraient toutefois nécessaires pour s'assurer que la capacité de traitement de l'usine de Saint-Romuald puisse répondre au manque à gagner de l'usine de Charny.

Il convient cependant de mentionner qu'il y a des préoccupations plus importantes concernant le nombre de jours où le débit écologique et le débit esthétique ne seraient pas respectés. Ainsi, les analyses suggèrent que le non-respect du débit esthétique va croître au cours de l'horizon d'analyse, passant d'une moyenne d'environ 35 jours à plus de 60 jours par année.

En ce qui concerne les deux autres réseaux qui s'approvisionnent dans le Saint-Laurent, des questionnements ont été soulevés sur la progression du front salin en raison de la baisse des débits du fleuve, combinée à une hausse du niveau marin. À cet égard, la prise d'eau la plus vulnérable à l'avancée du front salin est celle la plus à l'est, soit celle du réseau Desjardins. Celle-ci est la plus importante de la Ville de Lévis et fournit l'usine de production d'eau potable Desjardins. Advenant la perte de cette prise d'eau, il faudrait que l'eau brute puisée à la prise d'eau à Saint-Romuald puisse être acheminée vers l'usine Desjardins. Cela nécessiterait soit d'accroître la capacité de prélèvement à la prise d'eau de Saint-Romuald et la mise en place d'une interconnexion de grande capacité vers l'usine Desjardins, soit d'agrandir l'usine de Saint-Romuald pour combler la baisse de capacité à l'usine Desjardins ou encore construire un réservoir d'eau brute pour faire face à cette problématique qui aurait probablement lieu en marée haute en période d'étiage important.

À plus long terme, advenant le cas où les deux prises d'eau de Lévis qui puisent leur eau brute dans le fleuve seraient compromises, il faudrait que l'eau soit soutirée de la rivière Chaudière. Dans ce cas extrême de perte d'accès au fleuve, le risque de pénurie d'eau serait augmenté, mais resterait peu probable malgré tout (moins de 0,001 % des projections futures).

4.2 ADAPTATION AUX RISQUES

La pénurie d'eau, même d'une durée limitée à quelques jours, représente pour la collectivité et les usagers concernés, un coût relativement important que les municipalités cherchent naturellement à minimiser. Les épisodes de pénurie impliquent souvent la distribution d'eau par camion-citerne ou en bouteille et des restrictions importantes de consommation pour les ménages touchés. De même, des coûts environnementaux non négligeables sont encourus lors du non-respect des débits écologiques. À cet égard, il est utile de déterminer quelles sont les mesures tant de réduction de la demande que d'amélioration des infrastructures d'approvisionnement qui constituent les solutions les plus avantageuses ou les plus rentables pour la société.

4.2.1 SUIVRE LES RIVIÈRES DANS LE TEMPS

Dans le but d'améliorer la capacité d'analyser en détail les problématiques puis d'identifier les solutions les plus pertinentes, tous les cours d'eau servant de source d'approvisionnement en eau potable devraient faire l'objet d'un suivi régulier dans le temps. Ainsi, une première mesure consisterait à avoir en place pour ces cours d'eau un système de suivi pour obtenir des données d'observation des débits et niveaux d'eau dans le temps, accompagné d'un système de prévision.

4.2.2 GESTION DE LA DEMANDE

Parmi les mesures les plus pertinentes, la réduction de la consommation apparaît comme une solution intéressante aux nombreux avantages. Rappelons à cet égard que le Québec a réduit sa consommation d'eau potable de 26 % depuis le lancement de la Stratégie québécoise de l'eau potable en 2013, dépassant l'objectif de réduction fixé à 20 %. La réduction de la consommation au-delà des objectifs déjà atteints demeure toutefois réaliste, puisque la consommation d'eau au Québec reste 28 % plus élevée que la moyenne canadienne et 55% plus élevée qu'en Ontario. La nouvelle Stratégie québécoise d'économie d'eau potable, Horizon 2019-2025 vise à diminuer la distribution d'eau potable en deçà des seuils canadiens et ontariens, qui sont respectivement de 235L et 201L par personne, par jour. En 2016, aucune des municipalités à l'étude ne rencontrait ces objectifs (voir Tableau 1 à 4).

Une telle réduction de consommation constituerait à elle seule une contribution importante pour réduire la vulnérabilité des réseaux de Québec et de Lévis qui affichent une probabilité réelle, bien que limitée, de pénurie d'eau sur l'horizon de planification. En effet, rappelons que le risque de pénurie d'eau sur le territoire de la ville de Québec, bien que faible, devrait croître sur le plan de la fréquence, même s'il ne devrait pas mener à des épisodes de pénuries plus longs ou plus intenses. Quant au risque sur le territoire de Lévis, les analyses précédentes suggèrent aussi une possibilité de pénurie d'eau de l'ordre d'une journée par année, mais qui serait inférieure à 1 % sur une base annuelle.

Plusieurs options sont disponibles pour obtenir de telles réductions de consommation, notamment la mise en place de programmes d'économie d'eau potable, la réduction des fuites en réseau d'aqueduc, la tarification de l'eau et l'installation de compteurs ainsi que des subventions pour l'achat d'équipements à faible consommation d'eau. Les mesures de réduction sont par ailleurs intéressantes pour assurer le respect des débits écologiques et donc la protection des milieux naturels.

13 Stratégie québécoise d'économie d'eau potable, Horizon 2019-2025

Par exemple dans la nouvelle stratégie montréalaise de l'eau adoptée en 2011, la Ville de Montréal donnait une liste de mesures susceptibles de réduire la consommation d'eau potable des ménages à coût presque nul :
Dans la salle de bains, où l'on utilise environ 65 % de l'eau de la maison, on y suggère de remplacer les vieilles toilettes par de nouveaux modèles à faible débit, avec des réservoirs de 6 litres ou moins, d'installer des pommeaux de douche à faible débit et d'adopter des pratiques qui économisent l'eau.

De même dans la cuisine, on suggère d'installer un aérateur de robinet à débit réduit ce qui permet de réduire de moitié l'utilisation d'eau, de réparer les fuites et d'opter pour des lave-vaisselles qui consomment 25 % moins d'eau.

À l'extérieur, il est suggéré en été de réduire l'arrosage excessif de la pelouse par l'utilisation d'arroseurs à faible inclinaison qui produisent des gouttelettes d'eau et de favoriser les boyaux à fermeture manuelle. Ceci peut permettre de réduire de 50% l'usage d'eau des ménages.

Dans la Stratégie québécoise d'économie d'eau potable, il est précisé que chaque municipalité a la responsabilité à cette fin de sensibiliser ses citoyens par divers programmes tels que le programme éducatif Fantastiko, le programme de sensibilisation Municipalité Écon'eau de Réseau Environnement, des programmes d'incitatifs financiers pour l'installation d'équipement certifiés WaterSense ainsi qu'une application plus stricte de la réglementation par un système progressif de sensibilisation, d'avertissement et d'infraction.

La tarification de la consommation de l'eau représente aussi un moyen potentiellement efficace de réduire le gaspillage de l'eau. Ainsi la Stratégie québécoise prévoit qu'à partir de 2021, les municipalités devront mesurer la consommation des immeubles non résidentiels, soit des secteurs commercial, industriel et institutionnel (ICI) et estimer la consommation des autres immeubles. Déjà, les villes de Québec et de Lévis, à l'instar de plusieurs autres agglomérations, ont procédé à l'installation de compteurs d'eau dans les secteurs ICI. Selon la Stratégie québécoise d'économie d'eau potable, on estime à 90% la proportion des immeubles non résidentiels qui seraient équipés d'un compteur d'eau. Couplée à une tarification adéquate, cette mesure est susceptible de contribuer fortement à l'atteinte des objectifs de réduction de la consommation d'eau potable, en plus d'améliorer l'estimation de la consommation provenant des ménages, des ICI et des fuites.

Plusieurs des mesures énumérées ci-dessus, visant des modifications de comportement des consommateurs, peuvent être réalisées grâce à la mise en place par les municipalités de programmes à faible coût de sensibilisation et d'information. Les mesures plus coûteuses, comme l'achat d'équipement à

faible débit, peuvent également être réalisées à faible coût en profitant du remplacement progressif des appareils à la fin de leur vie utile.

4.2.3 GESTION DE L'OFFRE

Les mesures de gestion de l'offre représentent aussi plusieurs options permettant de réduire la vulnérabilité des systèmes d'approvisionnement en eau. La nouvelle Stratégie québécoise d'économie d'eau potable met d'ailleurs l'accent sur cette dimension, en fixant un objectif de réduction des fuites à 20% du volume d'eau total distribué, objectif qui n'a pas été atteint dans la période d'application de la stratégie précédente. En soi, cette réduction des fuites aurait le potentiel de répondre en bonne partie au faible risque de pénurie suggéré par les résultats d'analyse de cette étude.

Outre la recherche de fuite, on peut penser à des mesures de gestion de la ressource telles qu'une meilleure capacité à gérer les étiages avec les sources d'eau et les équipements en place notamment grâce à un système de prévision des étiages, de nouvelles interconnexions entre les réseaux, l'utilisation de nouvelles sources d'approvisionnement et l'utilisation de réservoirs naturels et artificiels.

Chacune de ces mesures devrait faire l'objet d'une évaluation économique spécifique et détaillée qui compare les mesures de sensibilisation et d'information aux coûts des programmes de mise en œuvre sur la durée de leur exécution par rapport à leur contribution réelle à la réduction des pénuries anticipées et du non-respect des débits écologiques. Ce type d'analyse coûts-efficience permettrait ainsi de cibler les mesures les plus utiles pour assurer une véritable protection contre la vulnérabilité d'approvisionnement en eau potable. Il serait également utile de comparer les avantages de ces mesures en termes de coûts évités lors des pénuries avec les coûts totaux de leur mise en œuvre afin de déterminer leur rentabilité sociale.

Pour les mesures plus importantes en terme de coûts d'investissement, il s'agirait de comptabiliser à la fois les coûts d'investissement et les frais d'entretien sur la durée de vie des installations envisagées par rapport également à leur contribution pour réduire les pénuries. Parmi celles-ci, le rapport mentionne que la mise en place d'une interconnexion entre les réseaux de Saint-Romuald et Charny permettrait d'éliminer le faible risque de pénurie tout en réduisant le non-respect des débits écologiques dans la rivière Chaudière.

Si le recours à de nouvelles sources d'approvisionnement ou encore l'utilisation de réservoirs naturels ne semble pas a priori être justifiés par l'ampleur des pénuries anticipées, il pourrait être intéressant de les étudier dans le cadre d'une analyse coûts-avantages de façon à s'assurer de leur rentabilité plus globale. Il s'agit en effet de comptabiliser, outre leur contribution à la protection contre les pénuries, l'ensemble de leurs conséquences sociales et environnementales et d'inclure dans les calculs tous les avantages directs, indirects et induits que peuvent procurer certaines infrastructures, de même que les inconvénients ou coûts

directs, indirects et induits. Ainsi, par exemple un réservoir d'eau naturel peut devenir une étendue d'eau favorisant les activités nautiques et les loisirs, augmenter la valeur foncière des propriétés environnantes et contribuer à la protection de la biodiversité tout en protégeant une municipalité contre les pénuries d'eau et ainsi devenir un investissement socialement rentable.

Une saine alimentation en eau constitue l'un des éléments principaux de la sécurité et du bien-être des populations et depuis longtemps un des rôles majeurs des autorités publiques. Au Québec, l'abondance des sources d'eau de qualité a amené une certaine négligence dans la gestion de l'eau que le Québec s'emploie à corriger depuis maintenant plusieurs années notamment par le biais de la Stratégie québécoise d'économie d'eau potable lancée en 2011 et plus récemment par la nouvelle Stratégie québécoise d'économie d'eau potable, Horizon 2019-2025.

Les objectifs fixés par la stratégie visent à amener le Québec à des niveaux d'efficience dans l'utilisation de la ressource en eau, plus proche de ceux atteints ailleurs au Canada. Il s'agit de réduire la consommation d'eau potable ainsi que le gaspillage par des pratiques plus efficaces tout en diminuant les pertes en réseau.

Plusieurs événements de pénurie au cours des dernières années, notamment lors des périodes d'étiage dans différentes régions, ont sensibilisé les citoyens du Québec à l'importance de préserver les ressources en eau potable. Il est de la responsabilité des autorités municipales d'assurer l'accès à la ressource en eau potable de tous leurs citoyens en tout temps, tant en quantité suffisante qu'en qualité. Les changements climatiques anticipés viennent ajouter une pression additionnelle dans le délicat exercice d'équilibrage entre les besoins croissants de la population et de l'économie avec la préservation de la ressource et des milieux naturels.

La Communauté métropolitaine de Québec est particulièrement bien dotée en sources d'eau potable ayant accès à la fois au fleuve Saint-Laurent, à de nombreux lacs et rivières, ainsi qu'aux eaux souterraines. Mais elle doit aussi faire face à des problèmes de croissance et de limitation de la ressource. Plusieurs moyens sont à sa disposition pour réaliser cet équilibre, à la fois du côté de la gestion de la demande et celui de la mise en place de systèmes d'offre plus efficace. Il s'agit pour la CMQ de déterminer lesquelles de ces mesures sont les plus susceptibles de répondre à ses besoins, tout en favorisant un ensemble d'objectifs connexes. À cette fin, des analyses coûts-efficience ou encore des analyses plus complètes de l'ensemble des coûts et avantages, représentent des outils utiles à la prise de décision permettant d'éclairer l'ensemble des choix qui s'offrent aux citoyens et aux autorités.

5. CONCLUSION

Les analyses de la vulnérabilité de l'approvisionnement en eau potable pour les cinq municipalités montrent que la vulnérabilité n'est pas également répartie sur le territoire. En effet, les municipalités de la Côte-de-Beaupré sont peu ou pas vulnérables à des problèmes d'approvisionnement liés à des étiages sévères dans les cours d'eau. Elles présentent des probabilités très faibles, voire nulles, de pénurie aujourd'hui et dans le futur malgré l'évolution de population et du climat.

Pour la Ville de Lévis, les résultats tendent à montrer que le risque climatique en lien avec l'évolution de l'hydrologie dans la Chaudière ne va pas accroître la vulnérabilité du réseau d'approvisionnement de la Ville. Par ailleurs, la gestion de l'approvisionnement en eau potable lors de l'évènement de lac Mégantic montre que la Ville possède un plan d'urgence qu'elle peut déployer lors de catastrophes environnementales qui peuvent affecter ses sources d'eau potable. Il n'en demeure pas moins que l'absence d'interconnexion pose des enjeux potentiels quant à la capacité à long terme du système à répondre à divers risques environnementaux. Considérant que ce type de risque pourrait affecter l'approvisionnement en eau de manière permanente sur le territoire, une réflexion sur la planification stratégique des infrastructures d'approvisionnement demeure pertinente.

Les vulnérabilités identifiées pour la Ville de Québec sont plus importantes. Nos analyses confirment les conclusions identifiées dans Villeneuve et al. (2002) à savoir que « le potentiel d'approvisionnement offert par la rivière Saint-Charles est actuellement atteint ». L'évolution dans les besoins de consommation d'eau en combinaison avec l'augmentation de la fréquence des étiages amplifie la pression sur la rivière Saint-Charles. La probabilité de subir une pénurie d'eau potable devrait doubler au courant des trente prochaines années, alors que la durée et l'intensité de ces pénuries ne devraient cependant pas croître substantiellement.

Les enjeux de pénurie d'eau, même d'une durée limitée à quelques jours, représentent une problématique importante pour la collectivité et les usagers concernés. Un meilleur suivi des débits pour les cours d'eau servant de source d'eau potable, accompagné d'un système prévisionnel, constitue la première mesure à avoir en place pour mieux analyser les problématiques et identifier les solutions les plus pertinentes. Des mesures existent pour composer avec cette problématique et sont mises de l'avant dans la Stratégie québécoise d'économie d'eau potable pour atteindre des objectifs de réduction à l'échelle du Québec. Les mesures de réduction de la demande présentent de nombreux avantages et se traduisent par des mesures relativement peu coûteuses. Quant à la gestion de l'offre, il existe aussi plusieurs mesures, dont principalement des actions pour réduire les fuites en réseau. Ce rapport propose quelques exemples de

mesures. Chacune nécessitera une évaluation économique plus spécifique et détaillée pour cibler et comparer les mesures les plus avantageuses pour les municipalités de la région.

BIBLIOGRAPHIE

Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord (APEL), (2009). Étude limnologique du haut-bassin de la rivière Saint-Charles, rapport final. Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord, Québec, 354 pages.

Centre d'expertise hydrique du Québec (2013). Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 51 pp.

Centre d'expertise hydrique du Québec (2014). Plateforme de modélisation hydrologique du Québec méridional. Rapport technique, Québec, 20 pp. + annexes.

Centre d'expertise hydrique du Québec (2015). Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 81 pp.

Fortin, J., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J. et Villeneuve, J.-P. (2001). A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part I: Description of the model. Journal of Hydraulic Engineering, 6(2), p. 91-99.

Gennaretti, F., Sangelantoni, L., et Grenier, P. (2015). Toward daily climate scenarios for Canadian Arctic coastal zones with more realistic temperature-precipitation interdependence. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120(23), 11-862.

Institut de la statistique du Québec, Direction des statistiques sociodémographiques (2016). Estimation de la population des municipalités du Québec, http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/structure/mun_15000.htm (site web consulté le 1er février 2018).

Institut de la statistique du Québec (2014). Perspectives démographiques du Québec et des régions, 2011-2061, Québec, 123 p.

Knutti, R. et Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. Nature Climate Change, 3, p. 369-373.

MAMH (2017). Rapport annuel de l'usage de l'eau potable 2015 – Base de données, Direction des infrastructures, https://www.mamh.gouv.qc.ca/infrastructures/strategie/cartographie-et-rapports-annuels/#c22818 (site web consulté le 30 octobre 2017).

Mpelasoka, F. S. et Chiew, F. H. S. (2009). Influence of Rainfall Scenario Construction Methods on Runoff Projections. Journal of Hydrometeorology, 10(5), p. 1168–1183.

OBV Charlevoix – Montmorency (2014). Plan directeur de l'eau de la zone hydrique Charlevoix - Montmorency. Présenté au ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 903 pages.

Ouranos (2016). Bilan hydrologique des rivières Saint-Charles et Montmorency dans un contexte de changements climatiques. Rapport présenté à la Communauté métropolitaine de Québec. Ouranos. 44 pp. + annexes.

Pelletier, P.-M. (2012). Évaluation de la vulnérabilité de la prise d'eau sous-fluviale de la rivière Montmorency – Secteur des îlets, Mémoire de maîtrise, Université Laval, 101 pp.

Seiller, G., Roy, R. et Anctil, F. (2017). Influence of three common calibration metrics on the diagnosis of climate change impacts on water resources. Journal of Hydrology, 547, p. 280-295.

Snover A.K., Hamlet A.F. et Lettenmaier D.P. (2003). Climate-Change Scenarios for Water Planning Studies: Pilot Applications in the Pacific Northwest. Bull Am Meteorol Soc 84:1513–1518. doi: 10.1175/BAMS-84-11-1513

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R.B, Berntsen, T., Bindoff, N.L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J.M., Hegerl, G.C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B.J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T.F., Whetton, P., Wood, R.A. et Wratt, D. (2007) Technical Summary. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Statistique Canada (2017). Profil du recensement, Recensement de 2016, produit nº 98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 29 novembre 2017.

Taylor, K.E., Stouffer, R.J. et Meehl, G.A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(4), p. 485-498.

Ville de Québec (2016). Schéma en alimentation en eau potable de l'agglomération de Québec, Service de l'ingénierie.

Villeneuve, J.-P., Mailhot, A. et Salvano, E. (2002). Problématique de l'approvisionnement et de l'utilisation de l'eau potable dans la nouvelle ville de Québec. Rapport de recherche (R610). INRS, Centre Eau, Terre et Environnement, Québec.

Ye, A., Duan, Q., Schaake, J., Xu, J., Deng, X., Di, Z., Miao, C. and Gong, W (2015). Post-processing of ensemble forecasts in low-flow period. *Hydrological processes*, 29(10), p. 2438-2453.

Ye, A., Duan, Q., Yuan, X., Wood, E. F., & Schaake, J. (2014). Hydrologic post-processing of MOPEX streamflow simulations. *Journal of hydrology*, 508, p. 147-156.

Yuan X. et Wood E.F. (2012) Downscaling precipitation or bias-correcting streamflow? Some implications for coupled general circulation model (CGCM)-based ensemble seasonal hydrologic forecast. Water Resour Res 48:1–7. doi: 10.1029/2012WR012256.

ANNEXE

ANNEXE 1 – POST-TRAITEMENT DES SÉRIES DE DÉBIT

Dans tous les cas, afin de correspondre aux périodes utilisées pour l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional, la période de référence est située entre 1971 et 2000, et la période future est de 2021 à 2050.

Un classement initial a été effectué parmi les scénarios hydroclimatiques afin de ne garder que les séries quotidiennes qui parviennent à bien représenter le régime hydrique des rivières à l'étude, notamment par rapport aux faibles débits. Quatre indices ont été calculés sur la base d'un « étiage relatif », défini comme étant le débit à 25 % de la distance entre le débit minimal de juin à novembre et la médiane :

- Nombre de fois par année qu'un « étiage relatif » survient.
- Sévérité moyenne de ces « étiages relatifs ».
- Sévérité maximale moyenne des « étiages relatifs ».
- Durée moyenne de chaque « étiage relatif ».

La notion « d'étiage relatif » a été utilisée afin de ne pas pénaliser les simulations qui n'auraient qu'un biais constant par rapport aux observations. Les débits observés, utilisés pour la comparaison, proviennent des stations hydrométriques de la DEH. Dans le cas de la rivière Sainte-Anne, qui ne possède pas d'observations, les débits ont été extrapolés à partir de la rivière Montmorency. Cette rivière a été gardée malgré l'absence d'observation puisque des débits étaient nécessaires pour réaliser l'analyse de la vulnérabilité du système d'approvisionnement. Cela s'explique par la similitude entre ces deux bassins versants.

Une fois les quatre indices calculés, la performance de chaque simulation pour chaque rivière est mesurée à partir d'un test de Student (*t-test*), qui permet de quantifier la différence entre deux ensembles de données. Il est à noter qu'alors que les 196 scénarios hydroclimatiques sont uniques sur la période future, il existe de nombreux doublons sur la période de référence; les différents scénarios de gaz à effet de serre sont identiques avant 2005 et l'une des méthodes de post-traitement utilisées emploie directement les données historiques pour la période de référence. Ainsi, le test de Student n'a été calculé que pour les 69 séries de référence uniques. Pour chaque région étudiée, les 35 séries performant mieux que la médiane ont été sélectionnées. En considérant l'ensemble des séries futures associées à ces 35 séries de référence, cela signifie de 46 à 59 simulations pour chaque région, tel que présenté au Tableau A.1.

Tableau A.1. Nombre de simulations utilisées pour chaque territoire

Centre de modélisation (16)	Modèle (29)	Nombre de simulations									
		Québec		Lévis		Boischatel		Château-Richer		Beaupré	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation / Bureau of Meteorology (CSIRO-BOM)	ACCESS1.0										
	ACCESS1.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (BCC)	bcc-csm1.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	bcc-csm1.1(m)	1	1			1	1	1	1	1	1
College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University (GCESS)	BNU-ESM									1	1
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	CanESM2	4	4	2	2	3	3	4	4	3	3
Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (CMCC)	CMCC-CESM						1				1
	CMCC-CM	1	1	1	1			1	1		
	CMCC-CMS			1	1	1	1			1	1
Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS)	CNRM-CM5			1	1					1	1
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence (CSIRO-QCCCE)	CSIRO-Mk3.6.0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences / Tsinghua University (LASG-CESS)	FGOALS-g2	1	1			1	1	1	1	1	1
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA GFDL)	GFDL-CM³	1		1		2		1		2	
	GFDL-ESM2G	1	1	2	2			1	1		
	GFDL-ESM2M			1	1						
NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA GISS)	GISS-E2-H	1						1		1	
	GISS-E2-R										
Institute for Numerical Mathematics (INM)	inm-cm4	1	1	1	1			1	1		
Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)	IPSL-CM5A-LR	1	1	2	2	4	4	1	1	3	3
	IPSL-CM5A-MR	1	1			1	1	1	1	1	1
	IPSL-CM5B-LR	1	1			1	1	1	1	1	1
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo) / National Institute for Environmental Studies / Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	MIROC-ESM	1	1			1	1	1	1	1	1
	MIROC-ESM-CHEM									1	1
	MIROC5	1	1	1	1	3	3	1	1		
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-ESM-LR	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2
	MPI-ESM-MR	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
Meteorological Research Institute (MRI)	MRI-CGCM³	1	1			1	1	1	1	1	1
	MRI-ESM1		1				1		1		1
Norwegian Climate Centre (NCC)	NorESM1-M	2	2			1	1	2	2	1	1
	Total	**29**	**27**	**24**	**22**	**30**	**29**	**29**	**27**	**30**	**28**

Tel qu'indiqué précédemment, une correction de biais par quantile a été appliquée sur les débits sélectionnés (Snover et al., 2003). Lorsque nécessaire, un rapport des aires de bassin versant entre la station hydrométrique de la DEH et la station de pompage est employé afin de projeter les débits observés vers la station de pompage.

Dans le cas des rivières Saint-Charles et Montmorency, les stations de mesure se situent en aval des stations de pompage. Le soutirage peut parfois représenter une proportion importante du débit total de la rivière. Par exemple, pour la rivière Saint-Charles, il avait entre autres été noté qu'avant l'an 2000, la station de pompage à Château d'Eau pouvait parfois utiliser jusqu'à 98 % du débit de la rivière (Ouranos, 2016). Afin de corriger ce problème, un soutirage mensuel moyen a été rajouté aux débits afin de tenir compte de la présence de la station de pompage. Ce soutirage mensuel moyen a été calculé à partir des données fournies par les villes dans le cadre de ce projet et correspond généralement aux années 2009 à 2016 (l'influence des années chaudes sur cette période, par rapport à notre référence de 1971-2000, est négligeable sur le soutirage mensuel moyen). Cela n'a pas été fait pour la rivière Chaudière, puisque la station hydrométrique se situe en amont de l'usine de Charny.

ANNEXE 2 – SOURCES DES DÉBITS ÉCOLOGIQUES

Municipalité - rivière	Débit	Type	Source
Boischatel - Montmorency	4,26 m3/s	Débit réservé et préservé au complet	PDE OBV CM & CEHQ
Québec- Montmorency	4,26 m3/s	Débit réservé et préservé au complet	PDE OBV CM & CEHQ
Beaupré – Sainte-Anne	0,4 m3/s, pouvant être réduit à 0,25 m3/s en étiage hivernal	Débit réservé et conservé au complet	PDE OBV CM – débits prévus par un projet de centrale hydroélectrique Axor (a été annulé)
Québec – Saint-Charles	0,9 m3/s (0,6 m3/s en étiage exceptionnel)	Débit réservé (conservé au complet) hydrobiologique IFIM en étiage d'été	PDE OBV Capitale
Québec – Saint-Charles	1,3 m3/s	Débit réservé (conservé au complet) hydrobiologique IFIM en octobre (fraie des salmonidés)	PDE OBV Capitale
Québec – Saint-Charles	0,6 m3/s (0,4 m3/s en étiage exceptionnel)	Débit réservé (conservé au complet) hydrobiologique IFIM en étiage d'hiver	PDE OBV Capitale
Lévis –Chaudière	4 m3/s	Débit réservé écologique – en tout temps	Innergex
Lévis –Chaudière	21 m3/s Avril-mai-juin- sept-oct 33 m3/s Fin juin-Première fds de septembre	Débit esthétique pour les chutes – De jour entre 8h et 19h	Innergex



550, rue Sherbrooke Ouest, 19ième étage
Montréal, Québec H3A 1B9, Canada

Tel : 514-282-6464
Fax : 514-282-7131
www.ouranos.ca

Ouranos est né de la vision commune du Gouvernement du Québec, d'Hydro-Québec et d'Environnement Canada, avec le soutien financier de Valorisation-Recherche-Québec en 2001. Intégrant un réseau de quelque 450 scientifiques et professionnels issus de différentes disciplines, le consortium se concentre sur deux grands thèmes : la science du climat et les vulnérabilités, les impacts et l'adaptation. Sa mission est l'acquisition et le développement de connaissances sur les changements climatiques et leurs impacts ainsi que sur les vulnérabilités socioéconomiques et environnementales, de façon à informer les décideurs sur l'évolution du climat et à les conseiller pour identifier, évaluer, promouvoir et mettre en œuvre des stratégies d'adaptation locales et régionales.