

Évaluation de l'adaptation aux changements climatiques

Réfection du mur de soutènement rive droite
du barrage Simon-Sicard

Hydro-Québec
Version finale

Mai 2024
16-P0021176.001-0100-EN-R-0200-00



eNGLOBE

Hydro-Québec

Préparé par :



Anne-Sophie Colombani, B. Sc.

Professionnelle en environnement

Études environnementales et changements climatiques

Approuvé par :



Catherine Lalumière, biol., MBA

Chargée de projet et directrice de service

Études environnementales et changements climatiques

Équipe de réalisation

Hydro-Québec

Identification de la documentation, conseil scientifique et révision	Alexis Dufour, P.E., ing. jr., M. Sc. Marie-Ève Lemieux, biol., M. Sc. Christine Vadeboncoeur, biol., M. Sc.
--	--

Englobe Corp.

Recherche, analyse et rédaction	Anne-Sophie Colombani, B. Sc.
Direction administrative du projet	Catherine Lalumière, biol., MBA
Édition	Élodie Larochelle, B.A.

Registre des révisions et émissions

N° DE RÉVISION	DATE	DESCRIPTION
0A	14 juin 2023	Émission de la version préliminaire pour commentaires
0B	28 août 2023	Émission de la version préfinale pour commentaires
00	10 mai 2024	Émission de la version finale

Glossaire

Expression	Définition
Aléa climatique	Phénomène, manifestation physique ou activité humaine liés aux conditions climatiques susceptibles d'affecter négativement le fonctionnement d'un projet et d'amplifier ses impacts sur le milieu. Un aléa peut être un phénomène graduel ou un événement ponctuel.
Bief amont	Portion de la rivière située en amont de la centrale qui peut être considérée comme un petit réservoir dans lequel le niveau d'eau peut être contrôlé à travers l'opération des évacuateurs de l'aménagement Rivière-des-Prairies, mais pour lequel le contrôle connaît des limites.
Composante	Élément d'un projet (ex. : élément d'infrastructure ou espèce) qui peut être aisément identifié, évalué et pris en considération lors d'une analyse des risques en raison de sa vulnérabilité aux changements climatiques.
Crue de sécurité	Crue qu'un barrage doit supporter dans des conditions exceptionnelles tout en présentant un fonctionnement sûr, quelques dommages au barrage et une réduction des coefficients de sécurité, jusqu'à la limite théorique de la rupture, étant acceptés (<i>Règlement sur la sécurité des barrages</i> (S-3.1.01, r. 1, article 20), https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/S-3.1.01.%20r.%201%20/).
Crue maximale probable	Crue la plus forte qui pourrait raisonnablement survenir dans un endroit particulier et à une certaine période de l'année, compte tenu des processus météorologiques et hydrologiques. Elle est considérée comme étant la limite supérieure de la crue, de sorte que le barrage devrait être construit de manière à résister à la quantité de pluie et de fonte de neige la plus grande possible, basée sur notre compréhension du monde physique. Les valeurs de la crue maximale probable se veulent des critères objectifs, mais elles dépendent en dernier ressort de l'évolution de nos connaissances météorologiques et hydrologiques.
Enjeu	Aspect particulièrement sensible aux impacts des changements climatiques, identifié pour une discussion approfondie après l'analyse des risques. Cela peut englober des ressources, des infrastructures, des populations, des écosystèmes ou tout autre élément vulnérable face aux aléas climatiques tels que les tempêtes, les inondations, la sécheresse, etc.
Étiage	Niveau minimal atteint par un cours d'eau ou un lac en période sèche ou période de faible débit.
Exposition	Présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou écosystèmes, de fonctions, ressources ou services environnementaux, d'éléments d'infrastructures ou de bien économiques, sociaux ou culturels dans un lieu ou un contexte susceptible de subir des dommages.
Interaction	Préoccupation initiale, qui justifie une présence dans l'analyse de risque.
Milieu d'accueil	Environnement physique et contextuel spécifique où le projet est implanté, incluant les caractéristiques géographiques, environnementales, sociales et économiques de ce lieu qui peuvent influencer les résultats du projet.
Plot	Partie d'un barrage en béton entre deux joints transversaux normaux par rapport à l'axe.
Probabilité	Mesure de la fréquence ou de la possibilité qu'un événement se produise basée sur des données historiques, des modèles climatiques et des expertises pertinentes. Elle peut être exprimée en termes quantitatifs (par exemple, en pourcentages) ou qualitatifs (par exemple, faible, modérée, élevée) en fonction des informations disponibles et de la compréhension du contexte.
Revanche	Distance verticale mesurée entre le niveau du réservoir en situation de crue de sécurité et le point le plus bas de la crête du barrage.
Revanche hydraulique	Écart de hauteur entre un niveau d'exploitation spécifié et le plus bas niveau de la crête de l'ouvrage.

Expression	Définition
Risque	Effet de l'incertitude, c'est la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un événement indésirable et de l'impact potentiel de cet événement. Il peut être mesuré en fonction de la probabilité et de la gravité des conséquences, et il est utilisé pour évaluer la sensibilité, la résilience et les mesures d'adaptation nécessaires pour faire face aux défis posés par les changements climatiques.
Sensibilité	Mesure dans laquelle un système ou une espèce est affecté, de façon préjudiciable ou bénéfique, par la variabilité ou le changement du climat.

Liste d'acronymes

Acronyme	Signification
BV	Bassin versant
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CMP	Crue maximale probable
CO	Contraintes opérationnelles
DJG	Degrés-jours de gel
DP	Dommages physiques
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
ÉIE	Étude d'impact sur l'environnement
ETP	Évapotranspiration potentielle
GES	Gaz à effet de serre
HQ	Hydro-Québec
LSB	Loi sur la sécurité des barrages
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MELCCFP	Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs
MSRD	Mur de soutènement rive droite
P	Précipitation
PM	Point métrique
PMP	Pluie maximale probable
RCP	<i>Representative concentration pathway</i>
RDP	Rivière-des-Prairies
RSB	Règlement sur la sécurité des barrages
SPEI-3	Indice normalisé d'évapotranspiration des précipitations (3-mois)

Propriété et confidentialité

« Ce document est destiné exclusivement aux fins qui y sont mentionnées. Toute utilisation du rapport doit prendre en considération l'objet et la portée du mandat en vertu duquel le rapport a été préparé ainsi que les limitations et conditions qui y sont spécifiées et l'état des connaissances scientifiques au moment de l'émission du rapport. Englobe Corp. ne fournit aucune garantie ni ne fait aucune représentation autre que celles expressément contenues dans le rapport.

Ce document est l'œuvre d'Englobe Corp. Toute reproduction, diffusion ou adaptation, partielle ou totale, est strictement prohibée sans avoir préalablement obtenu l'autorisation écrite d'Englobe Corp. et de son Client. Pour plus de certitude, l'utilisation d'extraits du rapport est strictement interdite sans l'autorisation écrite d'Englobe Corp. et de son Client, le rapport devant être lu et considéré dans sa forme intégrale.

Aucune information contenue dans ce rapport ne peut être utilisée par un tiers sans l'autorisation écrite d'Englobe Corp. et de son Client. Englobe Corp. se dégage de toute responsabilité pour toute reproduction, diffusion, adaptation ou utilisation non autorisée du rapport.

Si des essais ont été effectués, les résultats de ces essais ne sont valides que pour l'échantillon décrit dans le présent rapport.

Les sous-traitants d'Englobe Corp. qui auraient réalisé des travaux au chantier ou en laboratoire sont dûment évalués selon la procédure relative aux achats de notre système qualité. Pour toute information complémentaire ou de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec votre chargé de projet. »

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte du mandat	1
1.2	Objectifs et portée du mandat.....	3
2	Éléments méthodologiques	5
2.1	Documentation consultée	5
2.2	Conceptualisation du risque climatique	5
2.3	Durée de vie du projet et périodes climatologiques	7
3	Projet et exposition aux aléas	9
3.1	Description générale du projet.....	9
3.1.1	Infrastructure	9
3.1.2	Contexte hydrologique et hydraulique	10
3.1.3	Considérations climatiques dans les critères de conception	17
3.2	Sélection des interactions composante-aléa	19
3.2.1	Composantes de projet	19
3.2.2	Aléas climatiques	20
3.2.3	Interactions	20
3.2.4	Chaînes d'impact.....	20
3.3	Exclusions	21
4	Évolution des aléas climatiques	25
4.1	Choix des indicateurs climatiques	25
4.2	Attribution des scores de probabilité.....	26
4.2.1	Climat plus chaud.....	26
4.2.2	Chaleur extrême.....	27
4.2.3	Crue extrême	27
4.2.4	Étiage sévère	28
4.2.5	Vents forts	29
4.2.6	Glaces dérivantes.....	30
4.2.7	Embâcle	30
4.2.8	Cycles de gel-dégel.....	31
4.2.9	Remontée de la nappe phréatique.....	32
4.2.10	Sécheresse	33
5	Sensibilité aux aléas climatiques	35
5.1	Remblai amont	36
5.2	Mur de béton et crête	37
5.3	Remblai aval et milieu habité.....	39
5.4	Plantation terrestre	40

5.5	Herbier aquatique/habitat du poisson	41
5.6	Pierres plates/habitat de la tortue	42
5.7	Usagers du site	43
6	Constats et recommandations d'adaptation	45
6.1	Synthèse	45
6.2	Risques limités	46
6.3	Risques croissants	47
6.4	Risques de très faibles probabilités et de très hautes conséquences	47
6.5	Mesures d'adaptation proposées	48
6.6	Limites de l'évaluation	50
6.7	Énoncés de résilience préliminaire	50
7	Références.....	53

TABLEAUX

Tableau 1	: Échelle de probabilité pour les aléas climatiques.....	6
Tableau 2	: Échelle de sensibilité pour les paires aléa-composante.....	7
Tableau 3	: Caractéristiques générales des secteurs du MSRД concernés par l'évaluation	9
Tableau 4	: Niveaux d'exploitation à la centrale de l'aménagement RDP	16
Tableau 5	: Interactions composante-aléa sélectionnées pour l'analyse de risque	20
Tableau 6	: Chaînes d'impact justifiant la sélection des interactions	22
Tableau 7	: Indicateurs quantitatifs pour les aléas climatiques et cotes de probabilité (ou intensité)	25
Tableau 8	: Fiche de sensibilité pour le remblai amont	36
Tableau 9	: Fiche de sensibilité pour le mur de béton et la crête	37
Tableau 10	: Fiche de sensibilité pour le remblai aval et le milieu habité.....	39
Tableau 11	: Fiche de sensibilité pour la plantation terrestre	40
Tableau 12	: Fiche de sensibilité pour l'herbier aquatique/habitat du poisson	41
Tableau 13	: Fiche de sensibilité pour les pierres plates/habitat de la tortue	42
Tableau 14	: Fiche de sensibilité pour les usagers du site.....	43
Tableau 15	: Interactions composante-aléa sélectionnées pour l'analyse de risque	46
Tableau 16	: Grille de détermination des scores de risque	46

FIGURES

Figure 1	: Aménagement hydroélectrique RDP	2
Figure 2	: Secteurs du MSRД visés par le projet	2
Figure 3	: Coupe C - Fosse niveau inférieur avec sentier (tirée de SNC-Lavalin, 2023).....	11
Figure 4	: Coupe F (tirée de SNC-Lavalin, 2023)	12
Figure 5	: Vue en plan (tirée de SNC-Lavalin, 2023).....	13
Figure 6	: Station hydrométrique des Prairies (043301).....	14
Figure 7	: Hydrogrammes annuels à la station hydrométrique 043301	14
Figure 8	: Évolution de l'indice SPEI-3 pour juin, juillet et août	34



1 Introduction

1.1 Contexte du mandat

Hydro-Québec projette de procéder à la réfection du mur de soutènement rive droite (MSRD) situé en amont du barrage Simon-Sicard. S'étendant de façon discontinue sur une longueur d'environ 1,3 km (SNC-Lavalin, 2023), ce mur de soutènement fait partie de l'aménagement hydroélectrique Rivière-des-Prairies (RDP) et a été construit en même temps que ce dernier, soit en 1928-1929 (figure 1). Des travaux ont été conduits en 2018 et en 2019 afin de rétablir le niveau de sécurité de secteurs jugés prioritaires (en gris sur la figure 2). La présente évaluation concerne des sections du mur dites non prioritaires et pour lesquelles des travaux de mise aux normes sont nécessaires afin de rétablir le niveau de sécurité global du mur de soutènement (en rouge sur la figure 2). L'objectif du projet est de concevoir une solution de stabilisation permanente permettant d'éliminer le risque de rupture vers l'amont.

Prolongeant le barrage Simon-Sicard, le MSRD a une fonction de retenue des eaux, de protection de la rive ainsi que de protection contre les inondations. Les considérations hydroclimatiques (ex. : crues, étiages, vagues et glace fluviale) sont donc à prendre en compte lors de la conception de ce projet de réfection. Pour ce qui est des crues de la rivière des Prairies et donc des niveaux d'eau extrêmes à l'endroit du site du projet, ces conditions sont les conséquences de processus hydrologiques et de régulations des eaux dans le bassin versant en amont du MSRD.

Dans le contexte des changements climatiques, il est primordial de considérer les changements climatiques projetés pour évaluer les impacts et les risques pour le projet d'infrastructure et le milieu où il sera réalisé, et ce, pour la durée de vie utile attendue, qui est d'au moins 35 ans. Il est à noter que le MSRD est considéré comme un barrage et doit donc répondre à la *Loi sur la sécurité des barrages* et son règlement d'application (SNC-Lavalin, 2023).

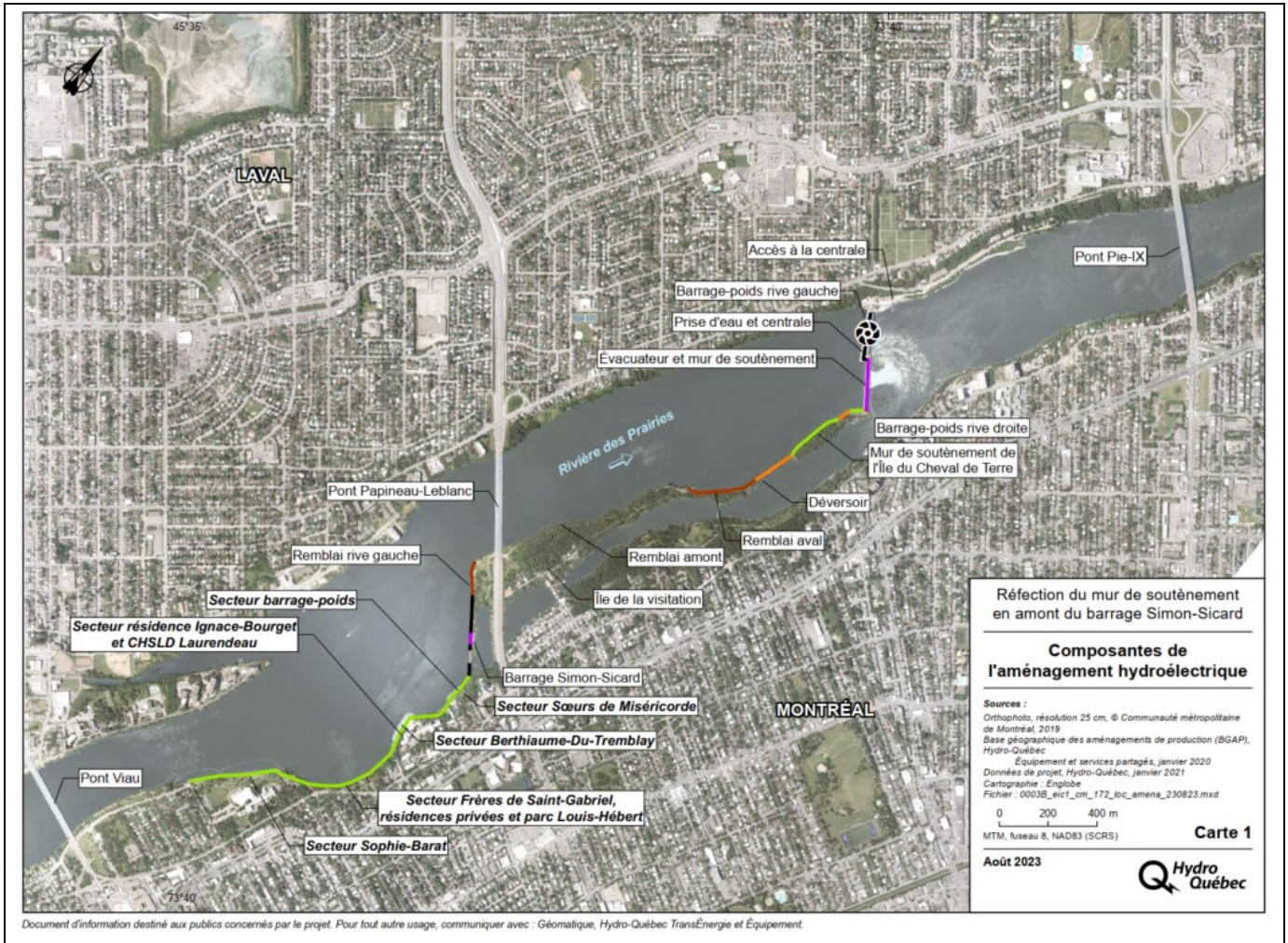


Figure 1 : Aménagement hydroélectrique RDP

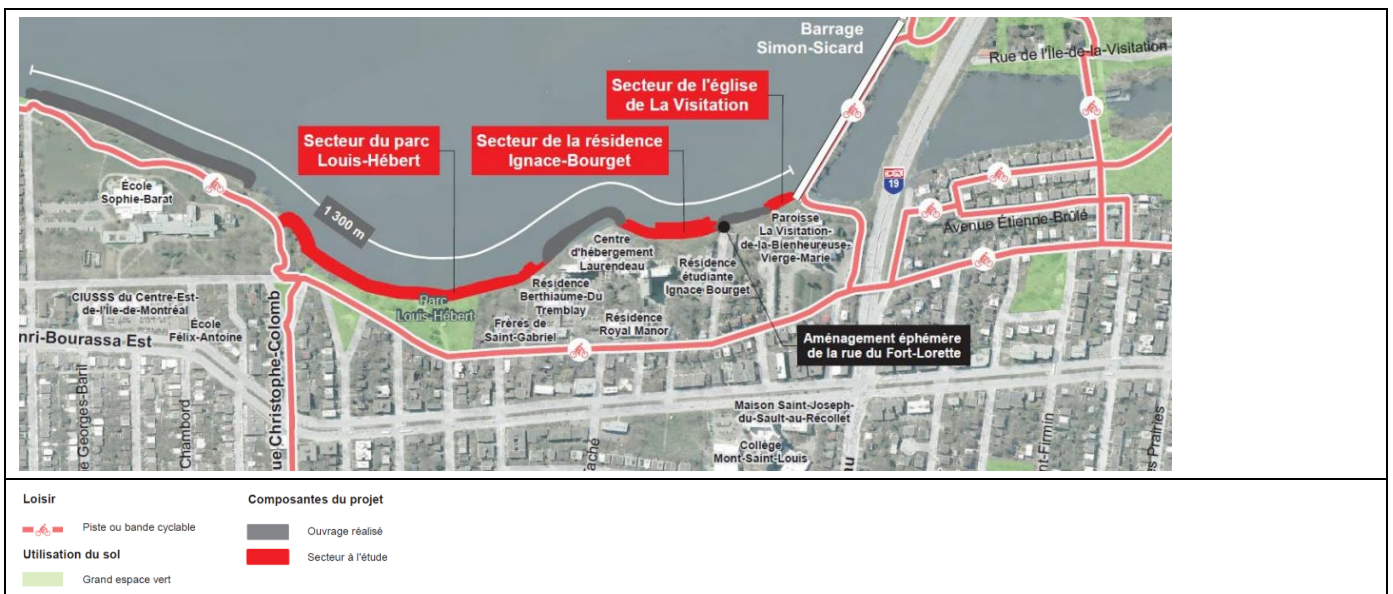


Figure 2 : Secteurs du MSR visés par le projet

Le présent document constitue l'évaluation de l'adaptation aux changements climatiques requise pour satisfaire les exigences de la directive émise pour réaliser l'étude d'impact sur l'environnement (ÉIE) du projet de réfection du MSRDR situé en amont du barrage Simon-Sicard par Hydro-Québec. Cette évaluation a été réalisée sur la base des exigences du document *Les changements climatiques et l'évaluation environnementale : Guide à l'intention de l'initiateur du projet* (ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC], 2021). En plus du guide du MELCC (2021), la méthode d'analyse s'appuie aussi sur les lignes directrices de la norme ISO 14091:2021 (*Adaptation au changement climatique - Lignes directrices sur la vulnérabilité, les impacts et l'évaluation des risques*). La structure de la présente évaluation correspond essentiellement aux étapes suivantes :

- Examen de la documentation disponible ;
- Sélection des interactions entre aléas climatiques et composantes du projet (notion d'exposition) ;
- Sélection d'indicateurs climatiques quantitatifs pour représenter les aléas climatiques ;
- Attribution des cotes de probabilité aux aléas ;
- Attribution des cotes de sensibilité des composantes face aux aléas ;
- Identification des enjeux principaux et proposition de mesures d'adaptation ;
- Formulation des énoncés de résilience préliminaires.

1.2 Objectifs et portée du mandat

Les objectifs spécifiques de l'évaluation de l'adaptation aux changements climatiques du projet sont les suivants :

- Identifier et évaluer les différents risques liés aux changements climatiques pour toutes les composantes du projet, et ce, pour toute la durée de vie d'exploitation du MSRDR (35 ans) ;
- Déterminer des mesures d'adaptation à mettre en place pour atténuer les risques identifiés.

L'atteinte de ces objectifs est inhérente à l'avancement de la science du climat et à la disponibilité des projections climatiques, ainsi qu'à l'état d'avancement de la conception du projet au moment de la rédaction du présent rapport.

La liste des interactions entre les aléas climatiques et les composantes de projet est établie sur la base des données disponibles ainsi que du jugement d'experts, en concertation avec des représentants d'Hydro-Québec.

Il est à noter que la portée de cette étude est limitée à la variante retenue (remblai en enrochement avec palier), dont le niveau de conception se trouve à l'étape « ingénierie 30 % » au moment de procéder à l'évaluation de l'adaptation aux changements climatiques. Il est à noter que l'évaluation constitue un point de vue partant d'une expertise en changements climatiques, et qu'aucun élément (notamment les cotes de sensibilité) ne doit être interprété comme une source d'information ou un avis sur les techniques d'ingénierie.

2

2 Éléments méthodologiques

2.1 Documentation consultée

Les intrants spécifiques au projet et ayant été consultés pour réaliser cette étude sont :

- Les informations publiées sur la page web du projet (Hydro-Québec, non daté) ;
- L'ensemble de la documentation technique disponible transmise par la Direction Environnement d'Hydro-Québec ;
- Les coupes-types d'ingénierie disponibles en date du 14 avril 2023 ;
- Les divers chapitres de l'ÉIE dans leur état d'avancement d'avril-mai 2023.

Quant aux principales sources d'information de nature climatologique, il y a :

- Les données des portails web *Portraits climatiques* d'Ouranos, AtlasClimatique.ca et DonneesClimatiques.ca ;
- La Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec (Ouranos, 2015) ;
- L'*Atlas hydroclimatique du Québec méridional* (ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs [MELCCFP], 2023).

2.2 Conceptualisation du risque climatique

Comme le suggère la norme ISO 14091:2021, l'évaluation est structurée autour du concept de risque. Cette section présente ce concept ainsi qu'un ensemble de concepts connexes à ce type d'évaluation (exposition, probabilité, sensibilité, impact, gravité, adaptation, résilience et vulnérabilité).

Un projet présente un risque climatique lorsqu'il y a exposition d'une composante du projet à un aléa climatique, une probabilité d'occurrence non nulle pour l'aléa ainsi qu'une certaine sensibilité de la composante face à l'aléa. Cela peut être représenté par la relation de risque suivante :

$$\text{Exposition} \otimes \text{Probabilité} \otimes \text{Sensibilité} \rightarrow \text{Risque}$$

Il convient de noter que le symbole \otimes utilisé dans cette relation ne doit pas nécessairement être interprété dans le sens d'une multiplication mathématique et qu'il exprime avant tout l'idée de croisement, d'intersection ou de conditions réunies.

L'exposition constitue une forme de préanalyse du risque, au sens où le risque ne sera pas traité davantage s'il est d'emblée jugé qu'il n'y a pratiquement aucune chance pour que l'aléa survienne au lieu de la composante concernée, alors qu'il sera analysé de manière plus détaillée dans le cas jugé contraire¹. En pratique, le traitement de l'exposition correspond à la sélection des interactions composante-aléa (section 3.2).

La probabilité correspond dans le présent contexte à la fréquence d'occurrence d'un aléa, aux chances qu'il survienne². Pour chaque aléa et pour une période donnée (historique ou future), la cote de probabilité est exprimée en un nombre de fois par année ou, de manière équivalente, en une période de retour (tableau 1). Dans certains cas, une plage de cotes doit être présentée au lieu d'une cote spécifique, reflétant l'incertitude par rapport à l'évolution climatique future.

Tableau 1 : Échelle de probabilité pour les aléas climatiques

Cote de probabilité	Qualificatif	Fréquence d'occurrence
P0	Peu probable	Moins de 1 fois aux 100 ans
P1	Très rare	De 1 fois aux 100 ans à 1 fois aux 50 ans (exclus)
P2	Rare	De 1 fois aux 50 ans à 1 fois aux 25 ans (exclus)
P3	Occasionnel	De 1 fois aux 25 ans à 1 fois aux 10 ans (exclus)
P4	Récurrent	De 1 fois aux 10 ans à 1 fois aux 2 ans (exclus)
P5	Fréquent	De 1 fois aux 2 ans à 1 fois par année (exclus)
*P6	Très fréquent	De 1 par année à 5 fois par année (exclus)
*P7	Normal	5 fois ou plus par année

*Il est à noter que les cotes P6 et P7 ne s'appliquent pas aux aléas qui, par définition, ne peuvent pas dépasser la fréquence de 1 fois par année.

La sensibilité correspond à la mesure dans laquelle la composante est modifiée par les impacts de la survenue de l'aléa. L'échelle de sensibilité utilisée dans le contexte du projet (tableau 2) est appliquée à deux catégories d'impact : dommages physiques et contraintes opérationnelles. L'objectif général d'attribuer une cote de sensibilité est d'évaluer la gravité des impacts.

L'adaptation correspond à l'ensemble des mesures mises en place pour diminuer le niveau de ce risque (en intervenant généralement au niveau de l'exposition ou de la sensibilité).

Enfin, la résilience climatique correspond à une capacité relativement grande de résistance ou de préservation d'une composante dans le contexte des changements climatiques, alors que la vulnérabilité climatique correspond au contraire de la résilience, c'est-à-dire à une capacité relativement petite de résistance ou de préservation d'une composante dans le contexte des changements climatiques. La résilience est un état souhaité pour toute composante, alors que la vulnérabilité est un état non souhaité.

¹ Une certaine redondance avec la notion de probabilité peut être perçue.

² Il est à noter qu'il s'agit d'une simplification conceptuelle, puisque fréquence d'occurrence et probabilité ne correspondent pas exactement au même concept en statistiques.

Tableau 2 : Échelle de sensibilité pour les paires aléa-composante

Cote de sensibilité	Qualificatif	Dommages physiques (DP)	Contraintes opérationnelles (CO)
S4	Très élevée	<ul style="list-style-type: none"> - Dommages irréparables ou destruction de la composante - Défaillance effective et complète - Composante ne pouvant plus jouer son rôle 	<ul style="list-style-type: none"> - Accès à la composante quasiment impossible - Travail d'entretien quasiment impossible
S3	Élevée	<ul style="list-style-type: none"> - Dommages majeurs réparables - Dégradation fortement accélérée - Défaillance potentielle 	<ul style="list-style-type: none"> - Accès à la composante fortement limité - Travail d'entretien fortement entravé - Gestion d'opérations supplémentaires
S2	Moyenne	<ul style="list-style-type: none"> - Dommages mineurs réparables - Dégradation accélérée - Dysfonctionnement 	<ul style="list-style-type: none"> - Accès à la composante limité - Travail d'entretien ralenti - Gestion d'opérations supplémentaires
S1	Basse	<ul style="list-style-type: none"> - Dommages superficiels - Fonctionnement sous-optimal 	<ul style="list-style-type: none"> - Aucun problème d'accès - Travail d'entretien ralenti - Gestion d'opérations supplémentaires
S0	Négligeable	<ul style="list-style-type: none"> - Aucun dommage à la composante - Aucun problème de fonctionnement 	<ul style="list-style-type: none"> - Aucun problème d'accès - Aucune entrave au travail d'entretien

2.3 Durée de vie du projet et périodes climatologiques

Selon le rapport synthèse d'avant-projet (HQ-TÉE, 2021b), le projet de réfection du MSRDR a pour objectif de donner une durée de vie utile additionnelle après travaux, selon les encadrements de gestion des immobilisations, d'au moins 50 % de la durée de vie standard de la catégorie « barrage en béton », soit au moins 35 ans sur la totalité du corps du mur de soutènement dans son ensemble.

En considérant un début des travaux prévu pour l'été 2026 et une durée de vie d'au moins 35 ans, il est suggéré de tenir en compte le climat représentatif de la période 2051-2080. Les informations scientifiques disponibles ne s'alignent pas nécessairement exactement sur cet horizon, mais seront suffisamment proches pour être considérées comme valables pour l'objectif de cette analyse.

L'incertitude climatique est considérée, autant que possible, en recourant aux résultats de simulations générées par plusieurs modèles numériques du climat et basées sur au moins deux scénarios de concentration de gaz à effet de serre (GES).

3

3 Projet et exposition aux aléas

3.1 Description générale du projet

3.1.1 Infrastructure

Trois secteurs du MSRD sont visés par les travaux de réfection, soit celui de l'église de La Visitation, celui de la résidence Ignace-Bourget et celui du parc Louis-Hébert (tableau 3). Après une revue de différentes variantes pour les travaux de stabilisation des secteurs non prioritaires du MSRD, le concept d'un remblai en enrochement avec palier a été retenu pour tous les secteurs visés par le projet (SNC-Lavalin, 2023). Le projet inclut des composantes d'ingénierie, dont la fonction première est de participer à la stabilité et à l'étanchéité de l'ouvrage, ainsi que des aménagements aux fonctions diverses (habitats naturels, esthétisme, limitation des îlots de chaleur, etc.). Selon SNC-Lavalin (2023), « l'enrochement a comme objectif d'assurer la stabilité du mur de soutènement et ne fait pas partie du système d'étanchéité du barrage celui-ci étant composé du mur de soutènement en béton, des palplanches, de la fondation et du remblai aval ».

Tableau 3 : Caractéristiques générales des secteurs du MSRD concernés par l'évaluation

Nom du secteur	Emplacement	Longueur (m)	Type de structure actuelle
Église de La Visitation	Plots 1 à 3 (PM 300,0 à 334,8)	34,8	Barrage-poids en béton fondé sur le roc.
Résidence Ignace-Bourget	Plots 11 à 21 (PM 439,3 à 610,9)	171,6	Mur de béton en T inversé d'une hauteur de 5,79 m fondé à l'élévation 12,80 m avec un rideau de palplanches jusqu'au roc.
Parc Louis-Hébert	Plots 29 à 61 (PM 727,0 à 1196,7)	469,7	Plots 29 à 51 : T inversé d'une hauteur de 5,79 m fondé à l'élévation 12,80 m avec un rideau de palplanches jusqu'au roc. Plots 52 à 61 : mur à contreforts en béton encastré au rocher avec recharge aval en terre

Source : SNC-Lavalin (2023)

En raison de la réalisation de travaux prioritaires sur certains secteurs du MSRD, l'agencement des composantes considérées pour le projet ne sera pas homogène le long du mur. L'évaluation des risques climatiques est faite en utilisant deux coupes (C et F ; figures 3, 4 et 5) représentatives de la diversité des composantes de l'ouvrage et des aménagements en faisant l'hypothèse que les risques et mesures d'adaptation pourront être transférés à toutes les coupes du projet MSRD.

3.1.2 Contexte hydrologique et hydraulique

3.1.2.1 Réseau hydrographique

L'aménagement RDP se trouve approximativement à mi-chemin du tracé de la rivière des Prairies, longue d'environ 50 km et s'écoulant entre les îles de Montréal et Jésus. L'eau s'écoulant dans la rivière des Prairies provient principalement du bassin versant de la rivière des Outaouais, lequel couvre une superficie de 142 987 km². Quant au bassin intermédiaire de l'aménagement RDP, il couvre une superficie de 3 300 km² (HQ-DBi, 2011). La rivière des Outaouais se déverse dans le lac des Deux Montagnes, qui à son tour se déverse dans le lac Saint-Louis (fleuve Saint-Laurent) et dans les rivières qui entourent l'île Jésus (rivière des Mille-Îles et rivière des Prairies). L'aménagement RDP ne reçoit pas tout le débit de la rivière des Outaouais, se limitant à une fraction qui est globalement fonction du niveau du lac des Deux Montagnes. Cette fraction varie de 50-45 % à débit moyen à 35-30 % aux débits de grandes crues.

La centrale de la RDP est une centrale au fil de l'eau dotée d'un réservoir au fil de l'eau avec un volume net de l'ordre de 0,75 hm³, ce qui signifie qu'elle ne possède pas de réservoir lui permettant d'emmagasiner les crues ou de soutenir les étiages.

Le bief amont de la centrale de la RDP, le long duquel se trouve le MSRD, peut donc être considéré comme un petit réservoir dont le niveau d'eau peut être contrôlé à travers l'opération des évacuateurs de l'aménagement RDP, mais pour lequel le contrôle connaît des limites. La situation hydrologique et hydraulique dans le bassin de la rivière des Outaouais a une influence marquée sur la situation hydrologique et hydraulique de la rivière des Prairies.

La complexité de la situation hydrologique et hydraulique dans le bassin de la rivière des Outaouais est amplifiée par la présence de nombreux lacs et barrages. La rivière des Outaouais est l'une des plus régularisées au Québec grâce à ses réservoirs qui contribuent à la gestion des crues et atténuent les dommages. Cependant, la majeure partie de la capacité de stockage étant en amont, cela rend la gestion des crues en aval plus difficile (ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MDDELCC], 2015).

3.1.2.2 Débits

Selon l'étude de crues fréquentielles (Hydro-Québec Production, 2010), la seule station hydrométrique présentement active le long de la rivière des Prairies est la station des Prairies (à laquelle on référera ci-après par son numéro provincial, soit 043301), sous la responsabilité du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Cette station se trouve dans la partie amont de la rivière, à la tête du rapide du Cheval Blanc (figure 6). En se basant sur les données hydrométriques couvrant la période 1923-2009 (87 années de données historiques ; figure 7) cette étude montre que le cycle annuel des débits connaît une crue principale au printemps, avec des débits de l'ordre de 2 000 à 3 000 m³/s (causés principalement par la fonte des neiges et parfois de fortes précipitations dans le bassin de la rivière des Outaouais), ainsi qu'une crue secondaire à l'automne, avec des débits de l'ordre de 1 000 à 2 000 m³/s (causés par de fortes précipitations).

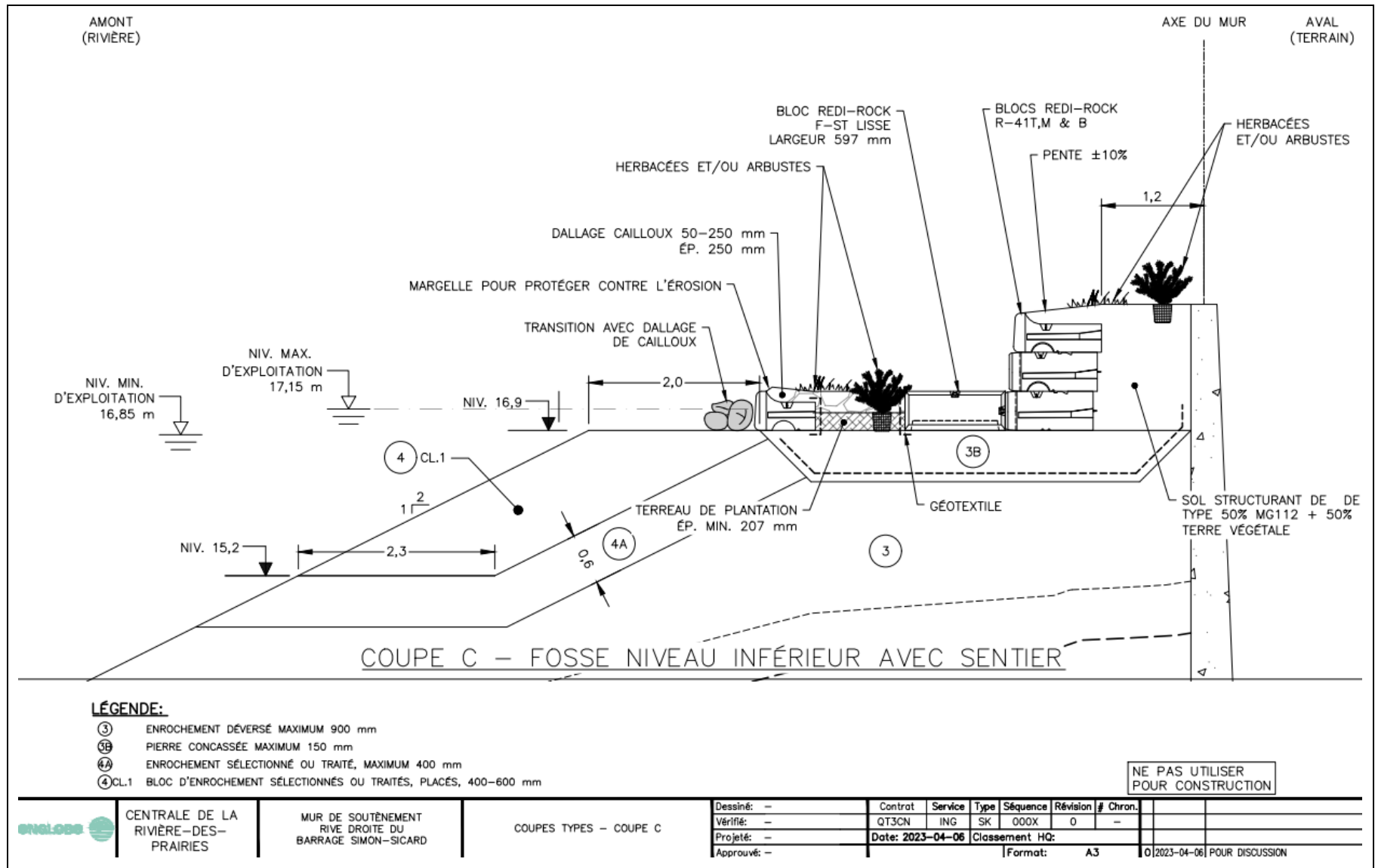


Figure 3 : Coupe C - Fosse niveau inférieur avec sentier (tirée de SNC-Lavalin, 2023)

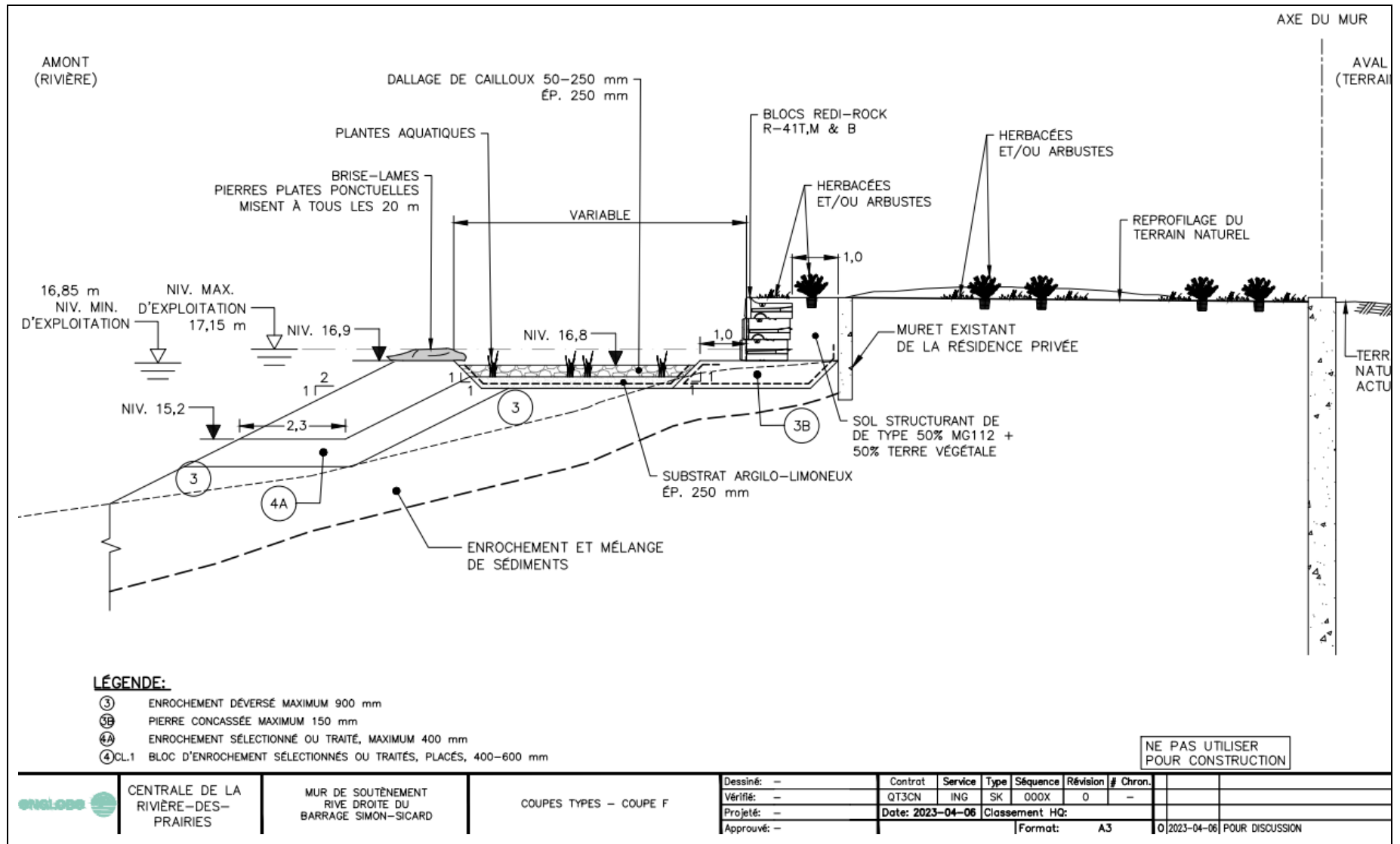


Figure 4 : Coupe F (tirée de SNC-Lavalin, 2023)

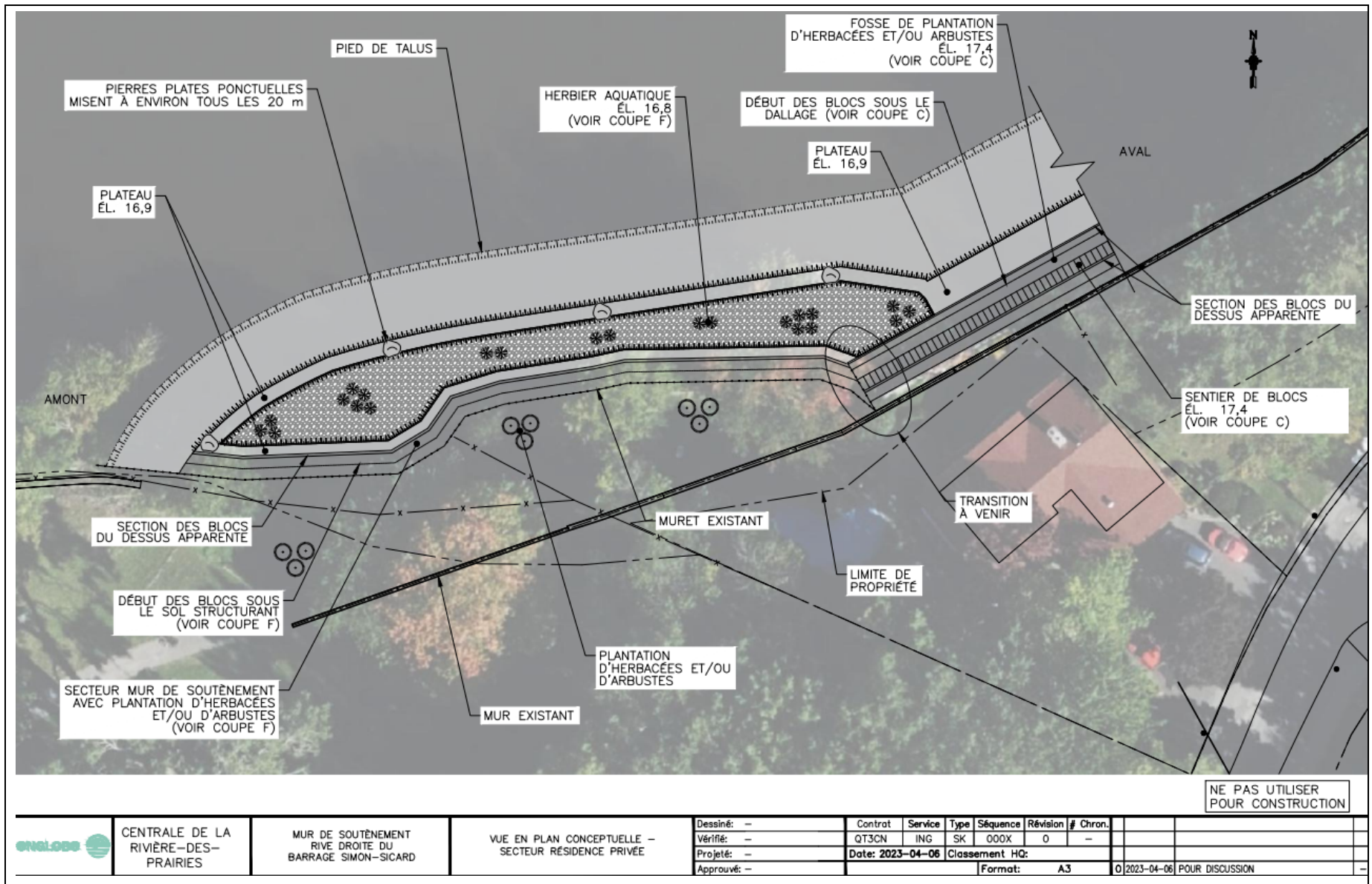


Figure 5 : Vue en plan (tirée de SNC-Lavalin, 2023)

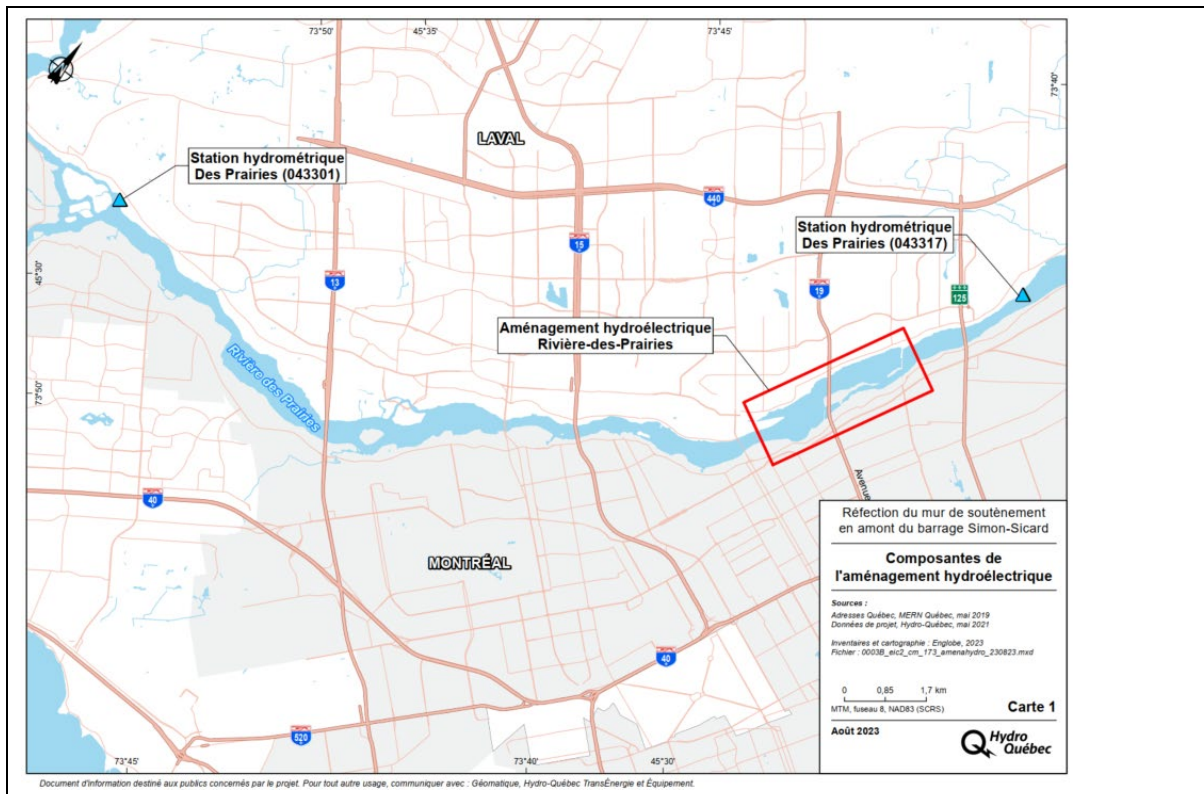
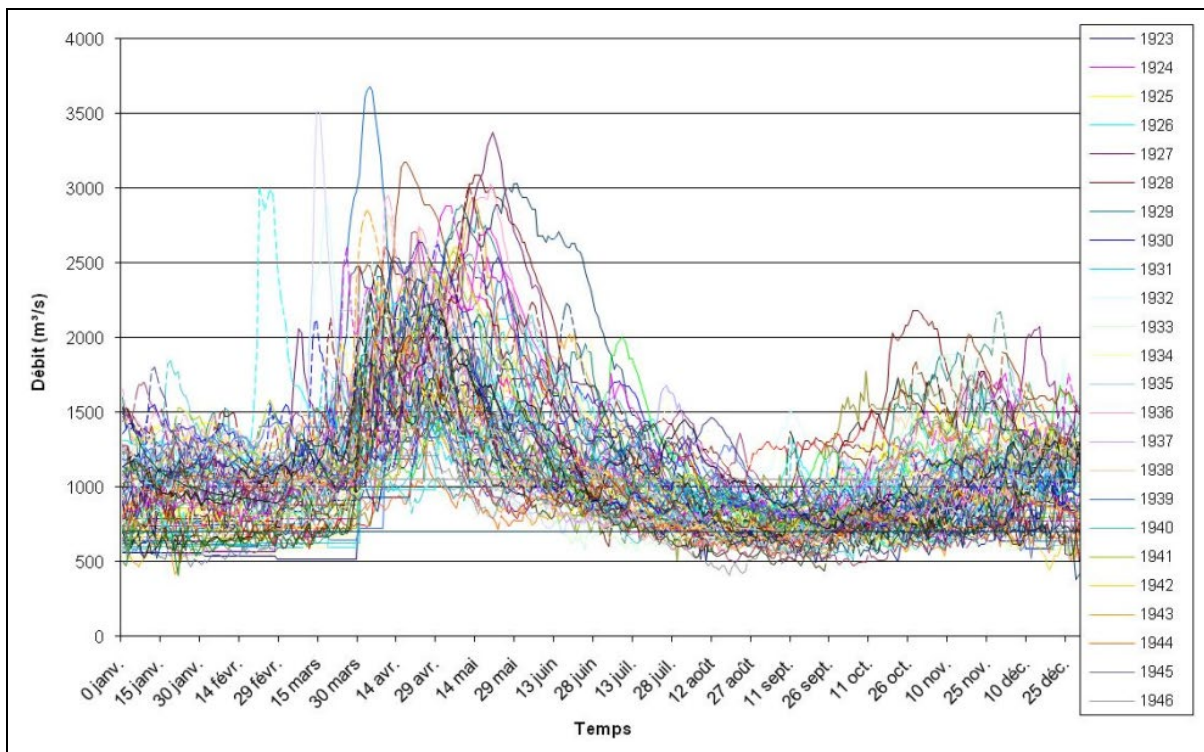


Figure 6 : Station hydrométrique des Prairies (043301)



* La figure couvre toute la période historique 1923-2009, malgré ce que suggère la légende de la figure.

Figure 7 : Hydrogrammes annuels à la station hydrométrique 043301

Selon Hydro-Québec Production (2010), la station 043301 affichait les caractéristiques suivantes pour la période historique 1923-2009 :

- Un débit moyen journalier de 1 905 m³/s ;
- Une durée de crue printanière de l'ordre de 96 jours ;
- Une pointe de crue printanière historique minimale de 1 420 m³/s (atteinte en 1931) ;
- Une pointe de crue printanière historique maximale de 3 680 m³/s (atteinte en 1976) ;
- Une crue décennale (période de retour de 10 000 ans) de 4 990 m³/s (loi log-normale) avec intervalle de confiance s'étendant de 4 370 m³/s à 5 610 m³/s (95 %).

Il est à noter que sur le site du CEHQ (MELCCFP, 2023), la fiche signalétique de la station 043301 indique la particularité suivante : « Le 31 mai 2018, les données historiques de cette station ont été mises à jour pour uniformiser les données en considérant la courbe de tarage la plus récente. L'impact majeur de cette mise à jour est que les débits de crues des années antérieures à 1997 sont diminués. L'effet se fait particulièrement sentir pour les débits supérieurs à 2 000 m³/s. »

À titre illustratif, la pointe de crue printanière de 1931 est demeurée à 1 420 m³/s après ajustement (mise à jour) de la série temporelle, mais celle de 1976 a été ajustée à 3 105 m³/s (soit 575 m³/s ou 16 % de moins que la valeur indiquée dans l'étude d'Hydro-Québec Production [2010]). Avec les données historiques ajustées et disponibles jusqu'en 2022 (les valeurs de 2005 à 2011 sont manquantes), la pointe de crue printanière historique maximale pour la station 043301 est de 3 313 m³/s (atteinte en 2017). De cette mise à jour des données de la station 043301 s'est ensuivie une mise à jour de la crue décennale, nouvellement établie à 4 100 m³/s, avec intervalle de confiance s'étendant de 3 340 m³/s à 4 850 m³/s (Hydro-Québec Production, 2021).

La crue maximale probable (CMP) est un événement différent des crues fréquentielles qui sont basées sur l'analyse statistique des débits de pointe historiques. La CMP « est définie comme étant une crue hypothétique provenant de la combinaison d'événements les plus sévères, pouvant raisonnablement se produire sur un bassin versant à un moment donné » (HQ-DBi, 2011). La CMP est établie par modélisation hydrologique, en considérant des intrants et des hypothèses de calcul susceptibles de révéler la valeur de la plus forte crue possible.

La Note technique hydraulique (HQ-IÉSP, 2018b) établissait la valeur de la CMP à 5 660 m³/s. Cette valeur a été mise à jour à la suite de nouveaux travaux de modélisation hydrologique en 2020, et est maintenant établie à 5 614 m³/s (HQ-P, 2021). Cette valeur a été établie par HQ-P (2021) en considérant la somme de la CMP établie par Thiémonge (2021) pour l'exutoire de la rivière des Outaouais (18 330 m³/s) et une contribution de la rivière du Nord (1 029 m³/s), soit les 2 principaux affluents du lac des Deux Montagnes, puis en considérant qu'une proportion de 29 % de ce débit rejoindrait la rivière des Prairies, si un tel débit devait survenir. Les intrants, les hypothèses et les contraintes techniques du calcul de la CMP de la rivière des Outaouais ne sont pas discutés ici (voir Thiémonge, 2021), mais il convient de mentionner que la CMP retenue pour Carillon (près de l'exutoire) est établie sur la base d'une combinaison entre l'accumulation maximale probable de neige (AMPN) et une pluie printanière de 72 h avec une période de retour de 100 ans. Quant à la CMP d'été-automne à Carillon, estimée à 13 154 m³/s (Thiémonge, 2021), elle est établie sur la base de la pluie maximale probable (PMP) de 72 h précédée d'une pluie permettant de saturer le sol en eau.

Ainsi, le calcul de la CMP à Carillon, et par extension celui de la rivière des Prairies, n'incorpore pas de majoration ou de minoration reflétant les changements climatiques projetés. La possibilité d'une telle incorporation est analysée notamment par Thiémonge (2021, 2022), avec notamment pour constat qu'il est « difficile de statuer sur la transformation de la CMP de printemps dans le futur ». La section 3.1.2.2 discute plus en détail l'approche et les résultats de Thiémonge (2021, 2022) ainsi que d'autres études, et démontre la difficulté qu'il existe à estimer les effets des changements climatiques sur la CMP à partir de l'information actuellement disponible.

Néanmoins, l'évolution encore très incertaine de la CMP représente une donnée primordiale pour l'évaluation de l'adaptation aux changements climatiques du MSRDR du barrage Simon-Sicard, car sa valeur est adoptée comme crue de sécurité pour l'aménagement RDP (HQ-DBi, 2011, annexe B ; HQ-TÉÉ, 2021c).

3.1.2.3 Niveaux d'eau

La gestion des eaux de l'aménagement RDP spécifie des niveaux d'exploitation pour le bief amont, c'est-à-dire pour le tronçon de rivière tout juste en amont de la centrale, et en aval du MSRDR (tableau 4). La contrainte du niveau minimal critique (15,60 m) vise notamment à garantir la stabilité de certains murs de soutènement des propriétés riveraines situées en amont de la centrale (HQ-P, 2016).

Tableau 4 : Niveaux d'exploitation à la centrale de l'aménagement RDP

Variable	Acronyme	Niveau d'exploitation (m)
Niveau maximal critique	N. M. C.	17,20
Niveau maximal d'exploitation	N. M. E.	17,15
Niveau minimal d'exploitation en période de navigation (été)	N. Min. E.	16,85
Niveau minimal d'exploitation en hiver	N. Min. H.	16,50
Niveau minimal critique	N. Min. C	15,60

Source : Hydro-Québec Production (2016)

Il existe une dénivellée entre le niveau d'eau au site de la centrale et le niveau d'eau au site du MSRDR qui est de 5 cm pour près de 80 % des débits (HQ-IÉSP, 2018b). Lors de débits extrêmes, cette dénivellée augmente et un écart de 9 cm a été mesuré le 6 novembre 2017, sous un débit dans la rivière de 1 800 m³/s et de 23 cm le 20 avril 2017, sous un débit de 2800 m³/s. Pour les débits extrêmes, la dénivellée doit être modélisée et des résultats ont indiqué qu'elle est de l'ordre de 70 à 80 cm (HQ-IÉSP, 2018b). Cet exercice de modélisation bidimensionnelle des niveaux d'eau du bief amont a d'ailleurs montré qu'au passage de la CMP (en période libre de glace), la circulation de l'eau dans la baie Walker serait telle qu'un niveau d'eau à peu près constant se maintiendrait entre le point le plus en aval et le point le plus en amont du MSRDR. Ces diverses considérations sur les niveaux d'eau sont intégrées dans les calculs de la revanche.

L'enjeu des niveaux d'eau de l'aménagement RDP revêt une importance particulière pour le MSRDR, puisqu'il comporte actuellement le point de débordement de cet aménagement. L'étude de sécurité (HQ-DBi, 2011) résume la situation en ces termes : « Le point de débordement est l'endroit le plus bas à partir duquel s'écoulerait de façon non contrôlée l'eau d'un réservoir ou d'un bief sur son pourtour, à l'exclusion des ouvrages d'évacuation prévus à cette fin. Dans le cas de l'aménagement RDP, la crête la plus basse des ouvrages de retenue s'élève à 18,30 m (hormis les crêtes libres des barrages RDP et Simon-Sicard qui sont des ouvrages d'évacuation) et concerne principalement les ouvrages du barrage Simon-Sicard. Le MSRDR (long de 1 381 m) de ce barrage constitue l'ouvrage situé le plus en amont du réservoir, et sa partie amont (amont de la baie Walker) serait débordée en premier si le niveau du réservoir était amené à s'élever suffisamment pour qu'un débordement ait lieu. »

Le scénario de conception actuellement retenu prévoit une crête à 18,40 m pour le MSRDR réfectionné (SNC-Lavalin, 2023). Hydro-Québec a fourni la valeur maximale de débit de 5 984 m³/s pouvant être évacué à RDP au niveau maximum critique d'exploitation de 17,2 m et qui correspond à un niveau de 18,20 m au MSRDR (atelier de travail du 29 mai 2023). Un tel débit (5 984 m³/s) serait de 6,7 % supérieur à la CMP actuelle (5 614 m³/s). Dans le cadre de la présente évaluation, le débit de 5 984 m³/s sera considéré comme un seuil en deçà duquel le MSRDR demeurerait stable et contiendrait les inondations (en l'absence de vagues et d'embâcles) et au-delà duquel une inondation se produirait et la crête pourrait être érodée.

3.1.2.4 Glaces et frasil

La directive d'exploitation (HQ-P, 2016) révèle que le frasil, résultant de la cristallisation de minuscules particules de glace en suspension dans les eaux froides et en mouvement des cours d'eau pendant une période prolongée de températures basses (généralement $< 0^{\circ}\text{C}$), ainsi que les glaces constituent des éléments suffisamment perturbateurs pour faire l'objet d'un suivi dans la gestion de l'aménagement. Il peut notamment s'avérer nécessaire d'abaisser le niveau du bief amont au moment de la formation des glaces pour ne pas causer d'inondations, surtout pour la marina du bief amont.

Les principaux moyens de gestion des glaces et du frasil à la disposition d'Hydro-Québec sont :

- Des estacades de glace, dont l'une est installée à l'année dans la baie Walker et sert à stabiliser le couvert de glaces ;
- Un brise-glace permettant de constituer un chenal où l'épaisseur de glace ne peut dépasser 15 cm et qui assure le libre transport des glaces lors de la débâcle printanière ;
- Des stratégies de manœuvre des vannes de l'évacuateur minimisant la possibilité de bris d'équipements de l'aménagement par les glaces et limitant la possibilité de franchissement du talus de protection par les glaces ;
- Des stratégies de gestion des grilles à débris et d'arrêt des groupes (turbine-alternateur) en présence de frasil.

Aucun document portant spécifiquement sur le régime de glaces du bief amont n'a été identifié. La documentation du projet mentionne toutefois que la complexité de la gestion des glaces est une contrainte au projet. La rivière présente une hydrologie propice aux embâcles-débâcles (HQ-TÉÉ, 2021b). Il semble néanmoins établi que les glaces exercent une certaine sollicitation des rives du bief amont et que des embâcles se soient déjà formés dans le secteur du MSRD au moment de la prise des glaces. La formation d'un embâcle peut provoquer l'inondation et l'envahissement d'amas de glaces sur les terrains riverains (HQ-IÉSP, 2020). Selon HQ-IÉSP (2018b), « les événements qui conduisent à la formation d'embâcles sont toujours un débit anormalement élevé au début de l'hiver et un froid qui surgit rapidement avant qu'une couverture de glace lisse ait pu se former. De forts vents qui soufflent au moment de la prise des glaces peuvent amplifier le risque en morcelant la couverture encore mince ». Selon HQ-IÉSP (2018b), il n'y a toutefois aucun risque de formation d'embâcle lorsque la pointe de crue printanière se présente puisque la rivière est déjà libre de glace.

Le frasil semble participer à la formation de certains embâcles. Selon HQ-P (2021), « le 15 janvier 2007, une hausse subite du niveau est survenue entre le pont Papineau et le pont Bordeaux, due à l'accumulation de frasil. Ceci s'est produit après une importante chute de neige, suivie d'un froid intense, à un moment où le débit de la rivière restait important pour cette période de l'année. D'après les observations, l'eau atteignait le niveau du mur Simon-Sicard, soit 18,3 m. Bien que la glace empêche la formation de vagues, une crête de remblai au niveau de 18,3 m n'offrirait aucune revanche si un événement semblable venait à se reproduire ». Il est à noter qu'au moment de réaliser la présente évaluation, la hauteur adoptée pour la crête de remblai des secteurs non prioritaires est de 18,4 m (SNC-Lavalin, 2023).

3.1.3 Considérations climatiques dans les critères de conception

3.1.3.1 Climat actuel

Les critères de conception nécessitant des intrants de nature climatique ou hydroclimatique sont basés sur des données historiques uniquement (aucune projection climatique). Les deux principaux calculs impliquant des intrants de nature climatique concernent :

- La hauteur de la revanche hydraulique ;
- Le dimensionnement du perré.

CALCUL DE LA HAUTEUR DE LA REVANCHE HYDRAULIQUE

L'objectif principal consiste à retenir la majeure partie de l'eau des vagues lors d'un épisode de vents violents, ce qui a rendu essentielle la prise en compte de la revanche pour déterminer la hauteur de la crête du MSRD.

Selon les critères de sélection de la revanche établis par Hydro-Québec Production (2021), une hauteur de crête à 18,4 m est recommandée. Il s'agit du meilleur compromis entre les encadrements internes d'Hydro-Québec³ et les considérations d'acceptabilité sociale liées à l'obstruction visuelle et d'empiétement dans le milieu aquatique engendrées par un rehaussement de la crête. Cette hauteur de crête respecte les recommandations de l'Association canadienne des barrages (ACB), à la condition d'abaisser le niveau à 16,90 m lors du passage de la CMP et implique un niveau de 17,77 m au MSRD (HQ-P, 2021). Les principaux paramètres relatifs à la recommandation sont les suivants :

- Type de crue considéré : CMP et vague 1:2 ans (conforme à l'ACB) ;
- Débit de la CMP : 5 614 m³/s ;
- Niveau à la centrale : 16,90 m ;
- Niveau au site du mur : 17,77 m ;
- Hauteur de la vague de conception : 0,39 m ;
- Remontée de la vague (sur le talus/remblai amont) : 0,56 m. Cette valeur est issue d'un calcul prenant en intrant des données de vent en station météorologique (période non spécifiée, mais plausiblement 1953-2018 [HQ-IÉSP, 2018b]) ;
- Niveau requis de la crête selon les paramètres ci-haut : 18,33 m (= 17,77 m + 0,56 m) ;
- Niveau de crête recommandé : 18,40 m ;
- Niveau de la crête selon l'exigence minimale du *Règlement sur la sécurité des barrages* (RSB) : 17,77 m.

DIMENSIONNEMENT DU PERRÉ

En considération des aléas climatiques, le dimensionnement des éléments du perré de protection du remblai amont a été calculé pour pouvoir remplir sa fonction face à l'action des vagues et au mouvement des glaces (HQ-IÉSP, 2018b). Pour ce faire, un vent de récurrence 1:1 000 ans a été considéré pour le calcul lié à l'action des vagues, sur la base de données de station météorologique couvrant la période 1953-2018.

Une rigueur hivernale, mesurée par l'indicateur « degrés-jours de gel », de récurrence 1:100 ans, a été considérée pour le calcul d'épaisseur de glaces impliquée dans le dimensionnement du perré. La récurrence est établie sur la base de données de station météorologique couvrant les hivers 1954 à 2016-2017.

Par précaution, la plus grande valeur parmi les valeurs de dimensionnement issues de ces deux contraintes est retenue.

3.1.3.2 Climat futur

Les changements climatiques ont été considérés de manière qualitative dans les calculs de conception, en prévoyant une « mince marge de manœuvre par rapport aux incertitudes hydrauliques ou hydrologiques, dont les changements climatiques » (SNC-Lavalin, 2023) pour la durée de vie de l'ouvrage et en jugeant sécuritaire l'hypothèse d'une absence d'impact des changements climatiques sur la rigueur de l'hiver (HQ-IÉSP, 2018b).

³ En se basant sur une hauteur de vague et une remontée associée de récurrence 1:20 ans (plutôt que 1:2 ans), le respect des encadrements internes d'Hydro-Québec requerrait une crête à 18,53 m pour une CMP évacuée à 16,90 m à la centrale et une crête à 18,71 m pour une CMP évacuée à 17,15 m à la centrale (HQ-TÉE, 2021c).

Dans le contexte du projet, la marge de manœuvre est de 7 cm, correspondant à la différence entre le niveau de 18,33 m, requis pour le passage de la CMP et une remontée de vague 1:2 ans, et le niveau de crête sélectionné de 18,40 m (voir : HQ-P, 2021). Aucune élaboration sur des liens entre cette marge de 7 cm et des projections futures de CMP et de vent n'a été identifiée dans la documentation consultée.

3.2 Sélection des interactions composante-aléa

L'objectif de cette section est d'établir une liste d'interactions entre composantes de projet et aléas climatiques. L'établissement de cette liste correspond en pratique au traitement de la notion d'exposition, au sens où l'exercice consiste à effectuer un premier tri entre ce qui est exposé à du risque d'origine climatique et ce qui ne l'est pas. Les listes de composantes et d'aléas sont présentées, suivies de la liste des interactions sélectionnées (sous forme de tableau) et des chaînes d'impact sur lesquelles cette sélection est basée.

3.2.1 Composantes de projet

Les sept composantes de projet impliquées dans l'évaluation sont les suivantes :

- Remblai amont : Cette composante correspond à l'enrochement situé du côté amont (hydrique) du mur de béton et visant à assurer la stabilité du mur de soutènement. Il est composé de remblai de zone 3 (remblai de masse visant à assurer la stabilité du talus amont), de remblai de zone 3B (berme de stabilisation submergée et zone de transition entre les matériaux existants et le nouveau remblai d'enrochement), de remblai de zone 4A (coussin de perré à granulométrie constituée de blocs, de pierre concassée et de gravier grossier, visant à prévenir l'érosion des matériaux) et de remblai de zone 4 (perré de protection pour le talus amont contre les dommages causés principalement par les vagues et le mouvement des glaces) ;
- Mur de béton et crête : Le mur de béton fait partie du système d'étanchéité. Le mur est traité avec la notion de crête, les coupes disponibles indiquant que le mur réfectionné pourrait être aussi haut que les autres éléments formant la crête de l'ouvrage. Selon HQ-P (2021), l'élévation du dessus du mur variera entre 18,27 m et 18,32 m ;
- Remblai aval et milieu habité : Le niveau de conception du MSRD est à 18,4 m (18,27 et 18,32 m pour le mur de béton comme tel), et l'élévation du terrain à l'aval du mur varie entre 16,5 m et 19,5 m. Un quartier habité en aval du mur doit être considéré, car une éventuelle rupture du mur ou son débordement mènerait notamment à l'inondation de deux centres d'hébergement de soins de longue durée (CHSLD), de quatre routes locales et de six résidences ;
- Plantation terrestre (herbacées ou arbustes) : Certains segments de l'infrastructure comporteront des composantes d'aménagement vertes, à savoir des herbacées ou des arbustes indigènes ;
- Herbier aquatique/habitat du poisson : Certains segments de l'infrastructure comporteront des fosses de plantation aquatiques. Ces fosses hébergeront des plantes indigènes et serviront d'habitat pour diverses espèces de poissons. Les sous-composantes minérales comprendront un substrat argilo-limoneux (épaisseur de 250 mm) et un dallage de cailloux 50-250 mm (épaisseur de 250 mm) avec surface au niveau 16,8 m ;
- Pierres plates/habitat de la tortue : Certains segments de l'infrastructure comporteront un plateau d'élévation à 16,9 m avec des pierres plates grises de 250 mm de hauteur disposées à tous les 20 m environ, et serviront de plateforme de lézardage pour les tortues. Une alternative envisagée pour le matériau correspond à des blocs de béton pâles ;
- Usagers du site : Des travailleurs et des passants circuleront sur l'infrastructure ou à proximité.

Il est à noter que l'analyse exclut l'émissaire de l'égout Curotte, une sortie d'égout pluvial de la Ville de Montréal qui traverse le mur au plot 42, puisqu'Hydro-Québec n'effectue pas de dimensionnements de conduites ou d'autres travaux qui impliqueraient, entre autres, d'intégrer des projections liées aux pluies extrêmes. D'autre part, l'accès de mise à l'eau, qui sera situé en amont de l'émissaire Curotte, est également exclu de l'analyse. Cet accès pourrait comprendre des marches ou une rampe pour descendre de petites embarcations récréatives sans moteur. Cette composante a été exclue au motif que les matériaux pour le revêtement ne sont pas encore connus.

3.2.2 Aléas climatiques

Les dix aléas considérés dans la présente évaluation sont les suivants : climat plus chaud, chaleur extrême, crue extrême, étiage sévère, vents forts, glaces dérivantes, embâcle, cycles de gel-dégel, remontée de la nappe phréatique et sécheresse. Pour chacun des aléas retenus, des indicateurs quantitatifs ont été sélectionnés pour l'attribution de cotes de probabilité (section 4.1).

3.2.3 Interactions

La liste des interactions composante-aléa sélectionnées a été établie (tableau 5) sous la forme d'une matrice d'interrelation, où chaque ligne correspond à une composante du projet et où chaque colonne correspond à un aléa climatique. Chaque case marquée d'un « X » indique une interaction, soit une paire composante-aléa (ligne-colonne) sélectionnée pour une analyse subséquente plus approfondie.

Tableau 5 : Interactions composante-aléa sélectionnées pour l'analyse de risque

Composantes de projet	Aléa climatique									
	Climat plus chaud	Chaleur extrême	Crue extrême	Étiage sévère	Vents forts	Glaces dérivantes	Embâcle	Cycles de gel-dégel	Remontée de la nappe phréatique	Sécheresse
Remblai amont				X	X	X		X		
Mur de béton et crête			X	X	X	X	X	X	X	
Remblai aval et milieu habité		X	X			X	X			
Plantation terrestre						X	X			X
Herbier aquatique/habitat du poisson	X	X			X	X				
Pierres plates/habitat de la tortue	X				X	X		X		
Usagers du site		X			X	X				

3.2.4 Chaînes d'impact

Chaque interaction a été sélectionnée sur la base d'une chaîne d'impact reliant des conditions hydrométéorologiques plausibles à des impacts potentiels (tableau 6). En plus de justifier la sélection des interactions composante-aléa, les chaînes d'impact servent de base conceptuelle pour l'attribution des cotes de sensibilité (section 5). Il est à noter qu'à ce stade-ci, les chaînes d'impact n'indiquent pas nécessairement des risques réels. Il s'agit plutôt d'un ensemble d'hypothèses initiales conceptualisées dans le but de tenter de cerner tous les risques possibles.

3.3 Exclusions

Des suppositions sur les niveaux de la nappe phréatique dans les matériaux du côté aval (terrestre) du mur doivent être faites pour calculer le potentiel de liquéfaction en cas de séisme (SNC-Lavalin, 2021). En outre, SNC-Lavalin (2021) mentionne qu'« une nappe phréatique plus faible ferait augmenter les coefficients de sécurité et permettrait de réduire les couches à risque de liquéfaction ». Si l'impact des changements climatiques sur le niveau de la nappe phréatique était connu, cela permettrait en principe d'estimer l'impact sur le potentiel de liquéfaction. Or, le peu de connaissances disponibles par rapport aux niveaux actuels de la nappe phréatique au site et par rapport à l'impact des changements climatiques sur ces niveaux ne permet pas d'établir un lien de causalité entre les changements climatiques et le potentiel de liquéfaction. Dans tous les cas, cet enjeu a été exclu de la présente évaluation.

Tableau 6 : Chaînes d'impact justifiant la sélection des interactions

Composante de projet	Aléa climatique	Chaîne d'impact (hypothèse analysée)
Remblai amont	Étiage sévère	Conditions d'étiage sévère → exposition du remblai amont dans les secteurs où il est normalement immergé + impact des vagues → érosion
	Vents forts	Vents forts → vagues fortes (sans crue) → impact répété des vagues → érosion
	Glaces dérivantes	Glaces dérivantes (avec ou sans embâcle) → effort de cisaillement le long du remblai amont → déstabilisation du remblai amont
		Englacement des roches du remblai suivi d'un mouvement horizontal (induit par le courant ou par les vents) ou d'un mouvement vertical (induit par effet de bouée) → détachement et transport de roches du remblai
	Cycles de gel-dégel	Température oscillant autour du point de congélation → cycle de gel-dégel de l'eau entourant les roches → fracturation de roches
Mur de béton et crête	Crue extrême	Crue extrême (avec ou sans vagues fortes) → dépassement de la capacité des évacuateurs de l'aménagement → hausse du niveau de l'eau au-delà du niveau maximum critique → pression hydraulique accrue depuis la rivière vers l'aval → rupture du mur et du système d'étanchéité
		Crue extrême (avec ou sans vagues fortes) → dépassement de la capacité des évacuateurs de l'aménagement → franchissement de la crête du remblai par l'eau → érosion du matériel de la crête du remblai
	Étiage sévère	Conditions d'étiage (faible débit) → niveau d'eau sous le niveau minimal critique (15,60 m) → pression hydraulique réduite depuis l'amont vers le mur → effet de torque avec poussée du haut du mur vers l'amont → déstabilisation du mur
	Vents forts	Vents forts → vagues fortes (sans crue) → impact répété des vagues sur les blocs → déstabilisation des blocs
	Glaces dérivantes	Glaces dérivantes (avec embâcle) → hausse localisée du niveau de l'eau → franchissement de la crête du remblai par l'eau + transport de glaces → effort de cisaillement contre la crête → dégradation de la partie hors terre du mur de béton et érosion du matériel de la crête (blocs ou autres matériaux)
	Embâcle	Séquence météorologique favorisant la formation de frasil → formation / accumulation de frasil dans la rivière → embâcle → hausse localisée du niveau de l'eau et/ou de la vitesse du courant → franchissement de la crête du remblai par l'eau (avec possible transport de glaces) → dégradation de la partie hors terre du mur de béton et érosion du matériel de la crête (blocs ou autres matériaux)
	Cycles de gel-dégel	Température oscillant autour du point de congélation → cycle de gel-dégel de l'eau ou du sol entourant la partie supérieure du mur de béton → dégradation accélérée du mur
	Remontée de la nappe phréatique	Remontée de la nappe phréatique → pression hydrostatique accrue depuis l'aval vers le mur → effet de torque avec poussée du haut du mur vers l'amont → inclinaison du mur et déstabilisation du matériel du côté amont
Remblai aval et milieu habité	Chaleur extrême	[Impact sur le milieu] Vague de chaleur et forte absorption-réémission de la radiation par les matériaux de l'infrastructure/aménagement → amplification locale de la vague de chaleur (îlot de chaleur)
	Crue extrême	Crue extrême (avec ou sans vagues fortes) → dépassement de la capacité des évacuateurs de l'aménagement → franchissement de la crête du remblai par l'eau (avec possible transport de glaces) → inondation des terrains en aval (avec possible empilement de glaces sur les terrains en hiver)
	Glaces dérivantes	Glaces dérivantes (avec ou sans embâcle) → hausse localisée du niveau de l'eau → franchissement de la crête du remblai par l'eau + transport de glaces → effort de cisaillement contre la crête → dégradation de la partie hors terre du mur de béton et érosion du matériel de la crête (blocs ou autres matériaux)

Composante de projet	Aléa climatique	Chaîne d'impact (hypothèse analysée)
	Embâcle	Séquence météorologique favorisant la formation de frasil → formation / accumulation de frasil dans la rivière → embâcle → hausse localisée du niveau de l'eau et/ou de la vitesse du courant → franchissement de la crête du remblai par l'eau (avec possible transport de glaces) → inondation des terrains en aval (avec possible empilement de glaces sur les terrains)
Plantation terrestre	Glaces dérivantes	Glaces dérivantes (avec ou sans embâcle) → hausse localisée du niveau de l'eau → franchissement de la crête du remblai par l'eau + transport de glaces → érosion des sous-composantes de la plantation terrestre
	Embâcle	Séquence météorologique favorisant la formation de frasil → formation / accumulation de frasil dans la rivière → embâcle → hausse localisée du niveau de l'eau et/ou de la vitesse du courant → franchissement de la crête du remblai par l'eau (avec possible transport de glaces) → érosion des sous-composantes de la plantation terrestre
	Sécheresse	Précipitations faibles et/ou évapotranspiration potentielle (ETP) élevée (localement) → manque d'eau → déshydratation des plantes → mortalité des plantes
Herbier aquatique / habitat du poisson	Climat plus chaud	Conditions estivales en moyenne plus chaudes → eaux de surface en moyenne plus chaudes → désertion de l'habitat par les poissons (si espèces mal adaptées à la chaleur)
	Chaleur extrême	Canicule → eaux peu profondes très chaudes → mortalité des poissons (si espèces mal adaptées à la chaleur)
	Vents forts	Vents forts → vagues fortes (sans crue) → impact répété des vagues sur les sous-composantes de l'herbier → érosion des sous-composantes de l'herbier
	Glaces dérivantes	Glaces dérivantes (avec ou sans embâcle) → érosion des sous-composantes de l'herbier Englacement des sous-composantes de l'herbier suivi d'un mouvement horizontal (induit par le courant ou par les vents) ou d'un mouvement vertical (induit par effet de bouée) → arrachement et transport du matériel de l'herbier
Pierres plates ponctuelles / habitat de la tortue	Climat plus chaud	Conditions estivales en moyenne plus chaudes → eaux de surface en moyenne plus chaudes → désertion de l'habitat par les tortues (si espèces mal adaptées à la chaleur)
	Vents forts	Vents forts → vagues fortes (sans crue) → impact répété des vagues sur les pierres → déplacement des pierres
	Glaces dérivantes	Glaces dérivantes (avec ou sans embâcle) → poussée sur les pierres → déplacement des pierres Englacement des pierres suivi d'un mouvement horizontal (induit par le courant ou par les vents) ou d'un mouvement vertical (induit par effet de bouée) → déplacement et transport de pierres
	Cycle de gel-dégel	Température oscillant autour du point de congélation → cycle de gel-dégel de l'eau entourant les pierres → fracturation de pierres
Usagers du site	Chaleur extrême	Canicule → coup de chaleur + déshydratation + inconfort + baisse de productivité des employés (en cas de journée de maintenance)
	Vents forts	Vents forts + trop grande proximité à la rivière → risque d'être poussé dans la rivière
		Vents forts → vagues fortes (avec ou sans crue) → risque d'être happé par une vague
Glaces dérivantes	Embâcle → hausse localisée du niveau de l'eau → franchissement de la crête du remblai par l'eau + transport de glaces → risque d'être poussé par des blocs de glace	

4

4 Évolution des aléas climatiques

4.1 Choix des indicateurs climatiques

On réfère généralement à un aléa climatique en tant que phénomène. Or, afin de pouvoir attribuer une probabilité d'occurrence à un aléa, il faut le réexprimer sous forme d'indicateur quantitatif. Une forme générale d'indicateur appropriée pour cet objectif est « Journées dont la variable « X » possède une valeur excédant le seuil S ». Dans un tel cas, il est possible d'établir la fréquence d'occurrence de dépassement du seuil pendant une longue période, puis d'utiliser cette fréquence comme probabilité.

Des indicateurs quantitatifs ont été choisis pour représenter les aléas et leurs scores de probabilité (tableau 7). Les détails techniques justifiant les cotes sont présentés à la section 4.2. Enfin, la mention « Indications limitées » est utilisée dans les cas où le score de probabilité n'est pas établi sur un ou plusieurs indicateur(s) quantitatif(s), mais plutôt sur un ensemble d'informations diverses. Certaines cotes pour lesquelles trop peu d'information scientifique existe peuvent demeurer non déterminées (n. d.). Enfin, il peut arriver qu'il soit impossible d'attribuer des cotes de probabilité pour les périodes, mais possible d'indiquer un sens de changement futur (à la baisse ou à la hausse).

Tableau 7 : Indicateurs quantitatifs pour les aléas climatiques et cotes de probabilité (ou intensité)

Aléa	Indicateur	Cote de probabilité pour 1991-2020	Cote de probabilité pour 2051-2080
Climat plus chaud	Années dont la température estivale moyenne est supérieure au maximum historique	P0 (par définition)	P4 - P5
Chaleur extrême	Jours extrêmement chauds ($T_{max} > 34$ °C)	P5	P6 - P7
Crue extrême	Pointe de crue supérieure à 5 984 m ³ /s	P0	n. d. (P0 plausible)
Étiage sévère	Niveau d'eau inférieur à 15,60 m	n. d. (P0 plausible)	À la hausse

Aléa	Indicateur	Cote de probabilité pour 1991-2020	Cote de probabilité pour 2051-2080
Vents forts	Occurrence d'une moyenne horaire de vent supérieure ou égale à la valeur de période de retour 1 000 ans de la période de référence	P0 (par définition)	n. d.
Glaces dérivantes	Hiver avec cumul de degrés-jours de gel supérieur ou égal à la valeur de période de retour 100 ans de la période de référence	P1 (par définition)	P0
Embâcle	Événements d'embâcle marquant ou d'inondation par embâcle marquant (information limitée)	n. d.	n. d.
Cycles de gel-dégel	Année avec nombre de cycles de gel-dégel supérieur ou égal à 1,25 fois la moyenne annuelle de la période de référence	P0 - P4	P0 - P3
Remontée de la nappe phréatique	Information limitée	n. d.	n. d.
Sécheresse	Indice normalisé d'évapotranspiration des précipitations sur 3 mois (SPEI-3) pour juin, juillet et août	n. d.	À la hausse

4.2 Attribution des scores de probabilité

4.2.1 Climat plus chaud

Par « climat plus chaud », on entend le fait que l'air extérieur soit en moyenne plus chaud sur une période de 30 ans. Il ne s'agit pas d'un aléa de nature épisodique (c'est-à-dire d'un aléa soudain ou d'une durée relativement courte à l'échelle humaine) comme c'est le cas pour les autres aléas couverts dans cette étude. En particulier, l'aléa « climat plus chaud » n'est pas ici utilisé pour représenter la chaleur extrême survenant sous forme de vagues de chaleur épisodiques (qui est traitée comme un aléa distinct [section 4.2.2]). Il est plutôt utilisé pour son impact potentiel sur les habitats (poisson et tortue). Il est représenté par l'indicateur « années dont la température estivale moyenne est supérieure au maximum historique », construit à partir des données pour l'indicateur « température moyenne (été) » de l'Atlas climatique du Canada pour le point de grille « Laval ». L'intérêt d'utiliser un tel indicateur est d'évaluer la proportion des années où les espèces vivront un été (juin, juillet et août) plus chaud que ce qui a été vécu auparavant.

Par définition, **le nombre d'années du passé récent dépassant le maximum historique dans la température estivale moyenne est zéro, pour une cote de probabilité P0**. À titre indicatif, le fichier de données historiques provenant de l'Atlas climatique du Canada couvre la période allant de 1950 à 2013, et la plus haute valeur de température estivale moyenne y est de 21,5 °C pour l'été 2005.

En se basant sur les projections climatiques établies pour le scénario de GES RCP4.5, il est possible de déterminer combien d'années de **la période 2051-2080** ont une température estivale moyenne dépassant le maximum historique (période 1950-2020 de la simulation correspondante). L'intervalle de valeurs obtenues s'étend de 4,6 années sur 30 (pour le 10^e centile parmi les 24 projections) à 28,0 années sur 30 (90^e centile), ce qui donne **un intervalle de cotes de probabilité allant de P4 à P5**.

En considérant le scénario de GES RCP8.5, l'intervalle de valeurs est plutôt de 22,3 années sur 30 (pour le 10^e centile parmi les 24 projections) à 30 années sur 30 (90^e centile), ce qui donne **une cote de probabilité P5**.

4.2.2 Chaleur extrême

L'aléa « chaleur extrême » est représenté par l'indicateur « jours extrêmement chauds ($T_{\max} > 34 \text{ °C}$) », obtenu de l'Atlas climatique du Canada pour le point de grille « Laval », et où T_{\max} correspond à la température maximale du jour.

Les données disponibles pour la période historique ne couvrent que la période 1950-2013. Conséquemment, le nombre d'occurrences pour 1991-2020 est estimé à partir des fichiers de simulations (ensemble des 24 simulations RCP4.5 et des 24 simulations RCP8.5). La moyenne parmi les 48 simulations et les années 1991-2020 est de 0,99 jour extrêmement chaud par an, pour **une cote de probabilité P5 (à la limite de la cote P6)**.

Pour la période 2051-2080, le fichier de projections climatiques pour le scénario de GES RCP4.5 donne un intervalle de valeurs qui s'étend de 3,0 jours par an (pour le 10^e centile parmi les 24 projections) à 12,7 jours par an (90^e centile), pour un intervalle **de cotes de probabilité allant de P6 à P7**.

Pour la période 2051-2080, le fichier de projections climatiques pour le scénario de GES RCP8.5 donne un intervalle de valeurs qui s'étend de 7,5 jours par an (pour le 10^e centile parmi les 24 projections) à 27,8 jours par an (90^e centile), pour **une cote de probabilité P7**.

4.2.3 Crue extrême

La CMP est un paramètre essentiel dans la conception des barrages, représentant le débit théorique maximal susceptible de se produire en raison des processus météorologiques et hydrologiques. Toutefois, son estimation reste complexe, notamment pour les bassins partiellement régulés. Au sein du projet d'aménagement hydroélectrique RDP d'Hydro-Québec, la CMP de 5 614 m³/s est spécifique à la saison printanière, influencée par les précipitations et la fonte de la neige, et est calculée à partir de données historiques, sans prendre en compte les changements climatiques.

La CMP de la rivière des Prairies revêt une importance cruciale pour le projet de réfection du MSRD du barrage Simon-Sicard. Elle sert de référence pour établir la crue de sécurité de l'aménagement RDP, en particulier en raison de la présence de deux CHSLD situés dans une zone protégée par le MSRD. De plus, le MSRD représente le point où le débordement se produirait dans l'aménagement RDP, étant l'ouvrage avec la crête la plus basse, à l'exception du déversoir et des évacuateurs. Il est généralement considéré qu'il n'y a pas de marge de manœuvre dans le réservoir amont pour gérer les crues.

Dans le contexte de l'adaptation aux changements climatiques, il est souhaitable de prévoir les tendances futures de la CMP. Le déclin anticipé du couvert de neige dans la région pourrait initialement suggérer une baisse de la CMP au printemps. Cependant, cette réduction moyenne ne garantit pas nécessairement une diminution des événements extrêmes en raison de la variabilité accrue des processus influençant le couvert de neige. Pour une évaluation précise de l'évolution potentielle de la CMP, l'utilisation d'une méthodologie basée sur des projections concernant les événements extrêmes liés à la pluie et à la neige dans le bassin de la rivière des Outaouais est donc nécessaire.

Une autre possibilité à considérer est que le seuil de 5 984 m³/s pour la CMP, soit une augmentation de 6,6 % par rapport à la CMP actuelle de 5 614 m³/s, puisse être dépassé en raison de l'augmentation attendue de la CMP pendant la période estivale et automnale. Étant donné que l'évolution future de la CMP pendant cette saison dépend principalement des précipitations et qu'il n'y a pas de fonte de neige en automne, il est fort probable que sa valeur augmente. Cependant, des données préliminaires d'Hydro-Québec indiquent qu'une augmentation de 35 % de la PMP pendant l'été et l'automne dans le bassin de la rivière des Outaouais entraînerait une CMP estivale-automnale équivalente à la CMP printanière actuelle. De plus, des analyses sommaires basées sur une augmentation des précipitations extrêmes de 7 % par degré Celsius de réchauffement local suggèrent que cet événement est peu probable d'ici 2041-2070. Par conséquent, il semble que l'augmentation de

la CMP pendant la saison estivale et automnale représente un risque moindre par rapport à l'augmentation de la CMP au printemps au cours des 35 prochaines années.

Bien qu'il existe des méthodes pour estimer ces tendances en se basant sur des séries temporelles de projections futures de pluie et de couvert de neige, leur intégration structurée dans l'ingénierie n'est pas encore courante. Hydro-Québec travaille actuellement sur un guide (*Hydro-Québec's first technical guide to developing hydroclimatic design criteria for hydropower facilities in a changing climate*, 2023) pour inclure les projections climatiques dans les aménagements hydrauliques, mais ces résultats ne sont pas encore disponibles pour le bassin versant de la rivière des Outaouais.

En conclusion, pour évaluer le risque lié aux crues extrêmes, l'indicateur « pointe de crue supérieure à 5 984 m³/s » a été utilisé. Le seuil de risque de 5 984 m³/s a été adopté à la demande d'Hydro-Québec, des calculs préliminaires (effectués par Hydro-Québec) ayant démontré qu'il s'agit du débit maximal pouvant être évacué au niveau maximal critique de l'aménagement RDP, c'est-à-dire au niveau de 17,20 m à la centrale. Considérant la dénivelée, le niveau au MSRDR serait dans un tel cas d'environ 18,20 m. La raison pour laquelle le niveau de 18,20 m est considéré comme pertinent pour la présente évaluation est que la stabilité du MSRDR est incertaine au-delà de ce niveau et que la présence de vagues fortes à ce niveau pourrait conduire à des débordements, puisque la remontée des vagues utilisée est +0,56 m.

La pointe de crue printanière historique maximale enregistrée à la station 043301 étant de 3 313 m³/s (atteinte en 2017), il est considéré que le seuil de 5 984 m³/s n'a jamais été atteint et que **la cote de probabilité appropriée pour la période historique est P0**.

Pour la période future, il n'est pas possible d'affirmer avec certitude que le seuil de risque ne pourrait pas être franchi, car aucune étude portant sur l'évolution future de la CMP pour la rivière des Prairies (ou la rivière des Outaouais) n'a pu être identifiée. Considérant que le seuil de risque est de 6,6 % supérieur à la CMP actuelle (5 614 m³/s) et de 23 % supérieur à la borne supérieure de l'intervalle de confiance de la crue décennale actuelle (4 850 m³/s), **il est raisonnable de considérer que la période de retour demeurera plus grande que 100 ans jusqu'en 2051-2080, ce qui correspondait à une cote de probabilité P0**. En l'absence d'indication directe (ex. : article scientifique qui présenterait un ensemble probabiliste pour l'évolution future de la crue décennale ou de la CMP), la cote demeure non déterminée (n. d.).

Il est à noter que l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional ne présente pas de projections pour les changements futurs plausibles de crue pour les cours d'eau de l'archipel d'Hochelaga (qui incluent la rivière des Prairies) et pour les grandes rivières dont le débit dépend de la régulation (comme la rivière des Outaouais).

Il est aussi à noter que des approches existent dans la documentation scientifique pour projeter la CMP future. Une telle approche (Clavet-Gaumont et coll., 2017) a été appliquée à cinq bassins versants canadiens (Lower Nelson, Manic-5, Matagami, Saguenay et Kénogami, tous plus petits et situés plus au nord que celui de la rivière des Outaouais) et a résulté en des projections de changement entre 1971-2000 et 2041-2070 allant de 0 % à +18 %. Ces changements sont basés sur les valeurs médianes des déterminants principaux (PMP et équivalent en eau de la neige de période de retour 100 ans), si bien que des scénarios d'augmentation plus élevée sont aussi possibles. Pour les deux bassins versants de l'étude de Clavet-Gaumont et coll. (2017) qui sont les plus proches du bassin versant de la rivière des Outaouais, les changements projetés pour la CMP sont de +3,8 % (Saguenay) et de +5,6 % (Matagami), toujours sur la base de scénarios médians pour la PMP et le couvert de neige.

4.2.4 Étiage sévère

Pour évaluer le risque lié aux étiages sévères, l'indicateur « niveau d'eau inférieur à 15,60 m » est utilisé. Ce seuil de risque correspond au niveau minimal critique de l'aménagement RDP, établi comme limite inférieure pour garantir la stabilité de certains murs de soutènement des propriétés riveraines situées en amont de la centrale (HQ-P, 2016). Les problématiques potentielles pour le

projet seraient qu'un niveau d'eau sous 15,60 m réduise la pression hydraulique depuis l'amont, ce qui déstabiliserait le mur (surtout s'il y a simultanément une remontée de la nappe phréatique du côté aval du mur) ou permette aux vagues de frapper sur certaines composantes se retrouvant alors exondées.

Il est difficile d'établir la fréquence d'occurrence pour le niveau d'eau inférieur à 15,60 m en période historique, car la notion d'étiage est très peu mise de l'avant dans la documentation du projet, la plupart des documents se limitant à mentionner que « la centrale de la RDP est une centrale au fil de l'eau, ce qui signifie qu'elle ne possède pas de réservoir lui permettant d'emmagasiner les crues ou de soutenir les étiages » (d'autres documents présentent le bief amont comme un réservoir de faible volume). Cette situation reflète peut-être le fait que les étiages dans la rivière des Prairies n'ont jamais représenté un problème du point de vue de la stabilité du MSR. Aucune évidence d'une transgression du niveau minimal critique (15,60 m) n'a d'ailleurs été identifiée dans la documentation. Puisqu'une absence d'évidence ne peut pas être utilisée comme preuve définitive de la non-occurrence de l'aléa en cause, **la cote est laissée non déterminée (n. d.), tout en reconnaissant qu'il soit possible que le niveau ne soit jamais descendu sous le niveau minimal critique durant la période 1991-2020 (ce qui donnerait une cote P0).**

Concernant les étiages sévères en période future, on ne peut non plus attribuer de cote de probabilité. On peut toutefois raisonnablement s'attendre à une probabilité à la hausse pour l'aléa, sur la base du guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (MELCCFP et Ouranos, 2021). Cet atlas, qui représente la principale source de données pour les projections d'étiages au Québec, ne couvre pas les cours d'eau de l'archipel d'Hochelaga (incluant la rivière des Prairies) et ne présente pas de projections de l'effet intégré des affluents du bassin de la rivière des Outaouais sur cette rivière elle-même. Cependant, les données de l'Atlas pour les affluents ainsi que le constat général issu des données de l'Atlas pointent vers une probabilité d'occurrence accrue pour les étiages sévères.

Deux des principaux faits saillants du Sommaire pour décideurs du Guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (MELCCFP et Ouranos, 2021) pour le 21^e siècle sont les suivants :

- Les étiages seront plus sévères et plus longs en été et en automne ;
- Les étiages seront moins sévères en hiver.

Par ailleurs, la Synthèse d'Ouranos (2015) ne contient pas d'information spécifique aux étiages dans la rivière des Outaouais ou la rivière des Prairies, et aucun article scientifique couvrant le sujet n'a pu être identifié.

4.2.5 Vents forts

L'aléa « vents forts » est impliqué dans l'évaluation surtout pour son action sur les vagues. L'une des composantes y étant sensibles est le perré de protection du remblai amont, qui doit avoir un dimensionnement lui permettant de résister à des vagues liées au vent de récurrence 1:1 000 ans, ce qui définit l'indicateur pertinent pour cet aléa. Sur la base de données de station météorologique couvrant la période 1953-2018, HQ-IÉSP (2018b) a calculé les vents de récurrence 1:1 000 ans sur l'eau, pour une durée d'une heure et une rose des vents à 16 directions, et obtenu des valeurs allant de 80,4 km/h (direction ESE) à 106,3 km/h (direction NE). **De façon triviale (par définition), les vents de récurrence 1:1 000 ans correspondent à une cote P0 pour la période historique**, si l'on suppose que les statistiques pour 1991-2020 sont similaires aux statistiques pour 1953-2018.

Le degré de confiance des climatologues à l'égard des projections pour les vents forts est généralement très limité. La raison générale en est que les vents forts sont souvent liés à des phénomènes météorologiques difficiles à modéliser, et ce, même pour le climat historique. En particulier, plusieurs aspects du cycle de vie des tempêtes (formation, intensification et déclin) ne sont pas complètement compris par les climatologues et les modèles numériques du climat présentent des difficultés avec le positionnement des trajectoires de tempêtes (Ouranos, 2015).

Les portails web de données climatiques (*Atlas climatique du Canada* ; Donneesclimatiques.ca ; *Portraits climatiques* d'Ouranos) ne contiennent aucun indicateur correspondant à des projections

pour les vents. Conséquemment, et considérant qu'aucun article scientifique n'a pu être identifié concernant l'évolution future des vents extrêmes de durée de 1 h, **la cote de probabilité pour la période 2051-2080 est laissée non déterminée (n. d.). Il n'est pas non plus possible de se prononcer sur un sens du changement futur.**

4.2.6 Glaces dérivantes

Les glaces dérivantes dans le bief amont peuvent avoir principalement deux types d'impact sur les structures en rive, soit de créer des embâcles pouvant faire monter l'eau à un niveau problématique et d'exercer des pressions directes sur certaines composantes du projet (effet de cisaillement le long du mur). La présente section concerne les glaces pour leur effet de cisaillement et leur implication au niveau du dimensionnement des enrochements. La Note technique hydraulique (HQ-IÉSP, 2018b) a évalué que la taille des enrochements doit être déterminée sur la base du cumul de degrés-jours de gel correspondant à une rigueur hivernale de récurrence 1:100 ans en période historique, valeur qui a été calculée à 1 270 degrés-jours avec les données de température de l'Aéroport Montréal-Trudeau pour la période s'étendant de l'hiver 1954-1955 à l'hiver 2016-2017, en supposant une loi normale pour les cumuls annuels.

Pour l'attribution de cotes de probabilité, l'indicateur « degré-jours de gel » de l'Atlas climatique du Canada pour le point de grille « Laval » est utilisé. Pour chaque simulation, les 30 valeurs de la période 1991-2020 sont utilisées pour déterminer la valeur de récurrence 1:100 ans, en supposant une loi normale. Le résultat diffère d'une simulation à l'autre et n'est pas nécessairement égal à 1 270 degrés-jours, ce qui s'explique par la désynchronisation des séquences météorologiques simulées ainsi que par des différences méthodologiques (localisation et représentativité spatiale, période et méthode d'agrégation des jours). Ensuite, le résultat est utilisé pour identifier la récurrence correspondante pour la période 2051-2080.

En appliquant cette méthode autant aux données du scénario de GES RCP4.5 qu'aux données de simulation RCP8.5, les périodes de retour obtenues deviennent très longues, ce qui s'explique par le fait que les valeurs de degrés-jours de gel décroissent rapidement dans les simulations. Pour les simulations RCP4.5, les valeurs de récurrence 1:100 ans de 1991-2020 deviennent associées à des périodes de retour s'étendant de 4 400 ans (10^e centile parmi les simulations) à pratiquement l'infini (90^e centile) en 2051-2080, alors que pour les simulations RCP8.5, les périodes de retour correspondantes tendent toutes vers l'infini en 2051-2080, les distributions futures de degrés-jours de gel étant dissociées de leur distribution passée correspondante. **En termes de cote de probabilité, l'on passe donc de P1 pour la période 1991-2020 (soit une période de retour de précisément 100 ans, par définition) à P0 pour la période 2051-2080 (soit une période de retour bien au-delà de 100 ans).**

4.2.7 Embâcle

Les embâcles peuvent être causés par l'accumulation de frasil ou par un blocage de l'écoulement des plaques de glaces.

Pour la période historique (1991-2020), la documentation du projet procure peu d'information permettant d'attribuer une cote de probabilité. La Note technique hydraulique (HQ-IÉSP, 2018b) rapporte en ces termes un embâcle survenu en 2007 à l'amont de la centrale RDP. L'embâcle le plus récent rapporté s'est formé à la prise des glaces à partir du 15 janvier 2007, alors que le débit s'écoulant dans la rivière était de l'ordre de 1 350 m³/s. Malgré l'intervention du brise-glace, l'embâcle aurait pris place au pont Papineau, se serait appuyé sur le barrage Simon-Sicard et étendu vers l'amont sur une distance de près de 4 km. On rapporte que le niveau d'eau aurait presque atteint la cote de la crête du mur Simon-Sicard, soit 18,30 m. Toutefois, ce niveau maximum atteint n'a jamais été mesuré par instrumentation ni par arpentage par Hydro-Québec ou par une autre source fiable. Il aurait provoqué l'inondation du stationnement de la marina du Commodore, située sur la rive de Laval. Selon les propriétaires de la marina, il s'agirait du niveau le plus élevé depuis 30 à 40 ans. HQ-IÉSP

(2018b) rapporte un autre embâcle en 2004, mais dont les impacts (inondations) n'auraient été ressentis qu'en amont du secteur du MSR.D.

Une brève recherche d'archives n'a pas permis d'identifier des événements d'inondations par embâcles dans le secteur de l'aménagement RDP, à l'exception de l'événement d'inondation par embâcle de 1932 (Dagenais, 2011). Ainsi, il semble que les embâcles marquants dans le secteur soient rares, ce qui est sans doute une conséquence normale du recours à un brise-glace en amont de la centrale. Cependant, considérant le manque d'information, la cote de probabilité est laissée non déterminée (n. d.).

Concernant la période future, les portails web de données climatiques (*Atlas climatique du Canada* ; *Donneesclimatiques.ca* ; *Portraits climatiques* d'Ouranos) ne contiennent aucun indicateur correspondant à des projections pour les embâcles.

Les documents de synthèse des connaissances des centres de services climatiques (Ouranos, 2015 ; Bush et Lemmen, 2019) ne procurent pas de recommandations pouvant guider la prise en compte de l'évolution future des statistiques liées aux embâcles dans les évaluations de résilience aux changements climatiques. La Synthèse d'Ouranos (2015) souligne par ailleurs la nécessité de développer une meilleure connaissance de cet aléa :

- Les impacts des changements climatiques sur les inondations associées aux embâcles de glace, aux embâcles de frasil, [...] sont peu documentés [...] et les conséquences sur les territoires sont encore mal connues [...]. Dans ce contexte, il apparaît essentiel de développer une meilleure connaissance des aléas associés aux inondations, notamment en ce qui a trait aux phénomènes de crues éclair et d'embâcles.
- La formation de frasil est une préoccupation importante pour la gestion hivernale des cours d'eau. Le frasil est un facteur déterminant dans la formation d'embâcles, mais il peut aussi obstruer les prises d'eau municipales ainsi que les turbines des barrages. Malheureusement, l'état actuel des connaissances ne permet pas encore de modéliser ce phénomène avec suffisamment de confiance pour le projeter à l'horizon 2041-2070.

Dans ce contexte, la cote de probabilité de la période 2051-2080 pour les embâcles est considérée comme non déterminée (n. d.) et il n'est pas non plus possible de se prononcer sur un sens du changement futur.

4.2.8 Cycles de gel-dégel

Le rapport d'Hydro-Québec et de Stantec (2021) associe le phénomène de gel-dégel à un risque élevé pour la division IHQP (Production), en référant aux problématiques potentielles suivantes :

- Les impacts élevés sur les ressources/contraintes opérationnelles pour des barrages en enrochement, enrochement zoné et terre, car les fissurations possibles requièrent un suivi additionnel ou des travaux de maintenance ;
- La fissuration de la crête, ainsi que la dégradation des blocs de perré des ouvrages en remblai ;
- Les besoins supplémentaires de maintenance en cas de dégradation des ouvrages et de leur instrumentation ainsi qu'à l'inspection et l'entretien des bâtiments.

IHQP a également évalué l'impact de la rupture du couvert de glace de même que la création d'embâcles, ainsi que l'effet sur les composantes des évacuateurs sur l'élaboration de son plan de mesures temporaires et l'établissement des relations de tarage. Le seuil problématique identifié par Hydro-Québec et Stantec (2021) pour la division IHQP (Production) est le suivant : variation de +25 % du nombre de cycles par rapport au climat de référence, qui est interprété ici comme une « année avec nombre de cycles de gel-dégel supérieur ou égal à 1,25 fois la moyenne annuelle de la période de référence ».

Les données pour l'indicateur « cycles de gel/dégel » (décompte des jours où la température de l'air fluctue entre les températures avec ou sans gel) de l'Atlas climatique du Canada pour le point de grille « Laval » sont utilisées pour l'attribution des cotes de probabilité.

Les projections climatiques de cet indicateur pour le scénario de GES RCP4.5 sont utilisées afin de déterminer combien d'années de chacune des périodes 1991-2020 et 2051-2080 présentent un nombre de cycles de gel-dégel supérieur ou égal à 1,25 fois la moyenne sur la période 1991-2020. Pour la période 1991-2020 elle-même, l'intervalle de valeurs obtenues s'étend de 1 année sur 30 (pour le 10^e centile parmi les 24 projections) à 4 années sur 30 (90^e centile), ce qui donne un intervalle de cotes de probabilité allant de P2 à P4. Pour la période 2051-2080, l'intervalle de valeurs obtenues s'étend de 0 année sur 30 (pour le 10^e centile parmi les 24 projections) à 2 années sur 30 (90^e centile), ce qui donne **un intervalle de cotes de probabilité allant de P0 à P3**.

L'exercice correspondant a été effectué pour le scénario de GES RCP8.5. Pour la période 1991-2020, l'intervalle de valeurs obtenues s'étend de 0 année sur 30 (pour le 10^e centile parmi les 24 projections) à 3 années sur 30 (90^e centile), ce qui donne un intervalle de cotes de probabilité allant de P0 à P4. Pour la période 2051-2080, l'intervalle de valeurs obtenues s'étend de 0 année sur 30 (pour le 10^e centile parmi les 24 projections) à 1 année sur 30 (90^e centile), ce qui donne **un intervalle de cotes de probabilité allant de P0 à P2**.

Les résultats pour les deux ensembles sont intégrés en attribuant une cote P0 - P4 à la période 1991-2020 et une cote P0 - P3 à la période 2051-2080.

4.2.9 Remontée de la nappe phréatique

Le rapport de gel de concept (HQ-IÉSP, 2018a) mentionne que « le contexte hydrostratigraphique du site à l'étude est caractérisé par la présence d'une nappe libre au niveau du remblai, d'une nappe semi-captive ou captive au niveau du dépôt naturel ainsi qu'un aquifère au niveau du roc. Lorsque le niveau d'eau de la rivière est haut et qu'il y a peu d'infiltration dans les sols (par exemple en hiver et au début du printemps), l'eau de la rivière se décharge probablement dans la nappe libre alors que lorsque le niveau d'eau de la rivière est bas et qu'il y a beaucoup de précipitations, ce sera plutôt probablement la nappe libre qui se déchargera dans la rivière ».

Le niveau de la nappe phréatique des terres situées en aval tout le long de sections de mur constitue une variable déterminante pour le calcul de stabilité de ces ouvrages. Le rapport d'évaluation de la sécurité de l'aménagement RDP (HQ-DBi, 2011) mentionnait que ce niveau faisait à ce moment partie des données manquantes pour le calcul et recommandait de « déterminer le niveau de la nappe phréatique dans les terres aval tout le long du mur et s'il y a lieu, la présence du couvert de glace ». Quant au rapport HQ-TÉÉ (2021a), il révèle que les études recommandées ont subséquentement été effectuées et que les dernières études incluent la révision de l'élévation de la nappe phréatique à 15,30 m comparativement à 16,40 m dans les études précédentes. Dans le contexte des analyses de stabilité du mur, SNC-Lavalin (2023) mentionne que toutes les analyses ont été réalisées avec une nappe phréatique au niveau minimal d'exploitation de 16,85 m.

En somme, la documentation révèle que la nappe phréatique constitue un élément influençant la stabilité du MSR, mais les données disponibles ne permettent pas de cerner de manière détaillée les niveaux ou le cycle annuel des échanges d'eau avec la rivière, ou encore de fixer un seuil critique.

Concernant la période future, les portails web de données climatiques (*Atlas climatique du Canada* ; *Donneesclimatiques.ca* ; *Portraits climatiques* d'Ouranos) ne contiennent aucun indicateur correspondant à des projections pour la nappe phréatique.

La Synthèse d'Ouranos (2015) souligne brièvement le rôle de la nappe phréatique dans l'évolution d'autres éléments du système (débits des cours d'eau incluant les crues extrêmes, affaissement des sols, affaiblissement des couches structurales des chaussées). Cette synthèse stipule par ailleurs que la connaissance de l'impact des changements climatiques sur la recharge et l'évolution des nappes d'eau souterraine est à développer.

Dans ce contexte, la cote de probabilité pour la remontée de la nappe phréatique est considérée comme non déterminée (n. d.), et il n'est pas non plus possible de se prononcer sur un sens du changement futur.

4.2.10 Sécheresse

Le potentiel de sécheresse est évalué pour son impact appréhendé sur les plantes en milieu terrestre. Il s'agit donc de sécheresse de type agricole, qui concerne le déficit d'humidité dans la zone racinaire proche de la surface et combine normalement l'effet des précipitations et celui de l'évapotranspiration (Ouranos, 2015).

Le seul indicateur des portails web de données climatiques (*Atlas climatique du Canada* ; *Donneesclimatiques.ca* ; *Portraits climatiques* d'Ouranos) correspondant à ce type de sécheresse est l'« indice normalisé d'évapotranspiration des précipitations (3 mois) » (SPEI-3) du portail *Donneesclimatiques.ca*. Cet indicateur de sécheresse est basé sur la différence entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP), et présente des valeurs négatives pour un déficit en eau et des valeurs positives pour un excédent d'eau (par rapport à la période de référence). L'indice SPEI-3 de l'été (juin, juillet et août) a été utilisé.

Cet indicateur est disponible seulement sous forme de séries temporelles, c'est-à-dire des ensembles de données enregistrées sur une période prolongée, ne se prêtant pas à un calcul en termes de probabilités basé sur des données annuelles individuelles. Sur la base des données provenant du portail *Donneesclimatiques.ca* (figure 8), il est raisonnable de conclure à une hausse de la problématique de sécheresse, les valeurs de l'indice devenant progressivement de plus en plus négatives avec le temps. **Les cotes de probabilité sont donc laissées non déterminées (n. d.) pour chacune des deux périodes, mais un changement futur à la hausse est noté.**

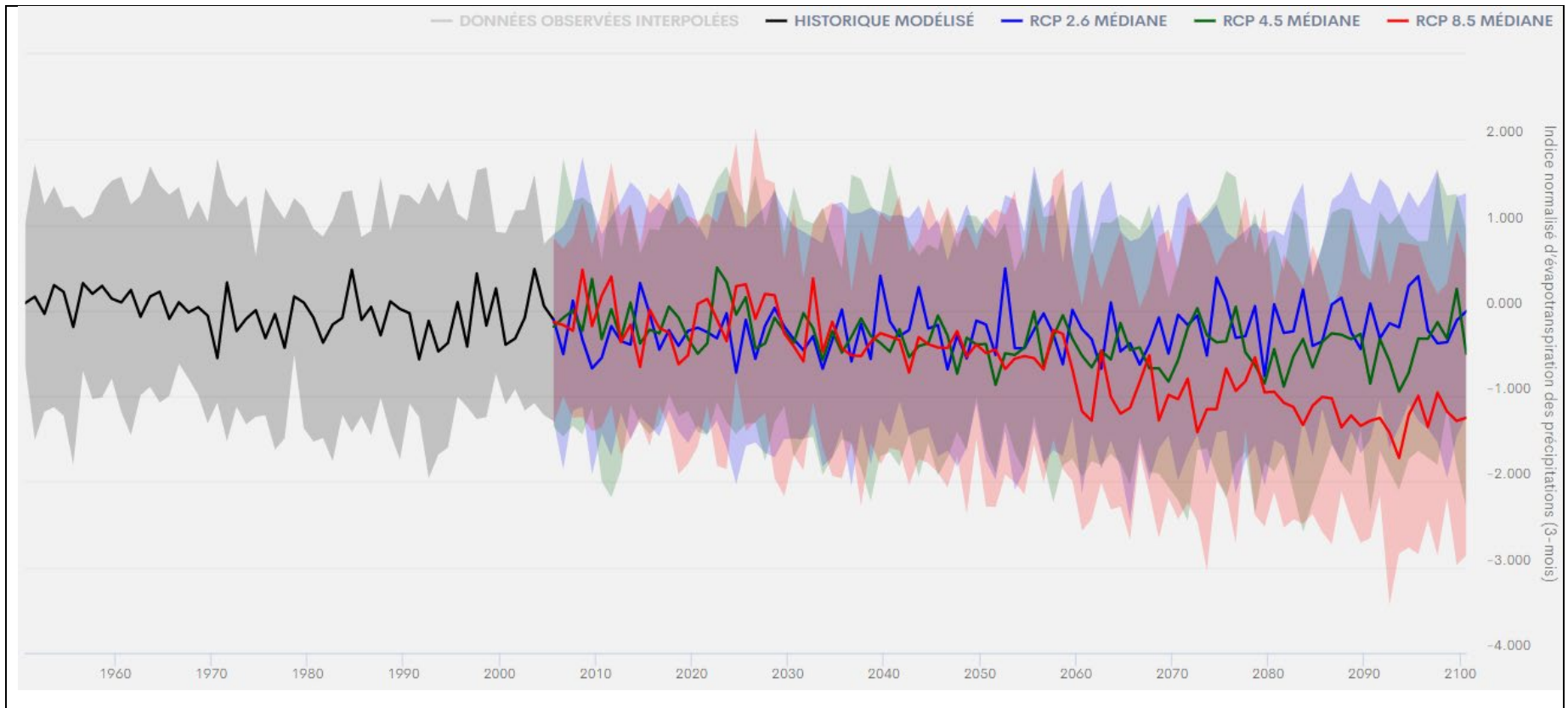


Figure 8 : Évolution de l'indice SPEI-3 pour juin, juillet et août

5

5 Sensibilité aux aléas climatiques

Une fiche de sensibilité a été produite spécifiquement pour chaque composante de projet retenue à la section 3.2.1 et contient les scores de sensibilité face aux aléas correspondants (suivant la sélection de la section 3.2) (tableaux 8 à 14). Chaque fiche contient une description de la composante ainsi qu'une ou plusieurs images permettant d'illustrer celle-ci. Sous ces éléments se trouve le résultat de l'évaluation. Pour chaque composante, la colonne de gauche contient le nom de l'aléa pouvant interagir avec la composante (voir tableau 5), la colonne du centre contient le score de sensibilité attribué à la paire composante-aléa et la colonne de droite contient les éléments de justification pour le score. Le score attribué correspond au score le plus élevé entre celui pour « dommages physiques » (DP) et celui pour « contraintes opérationnelles » (CO).

Il est à noter que les scores de sensibilité sont attribués en considérant la situation *a priori*, c'est-à-dire en considérant les données disponibles et les choix de conception envisagés au moment de l'évaluation. Certaines mentions, apparaissant en vert, correspondent à des éléments de conception déjà envisagés et permettant de limiter la sensibilité. À titre d'exemple, Hydro-Québec a stipulé qu'environ tous les dix ans, une évaluation de la sécurité des ouvrages d'un aménagement est confiée à une ressource indépendante des activités de suivi annuel de ces ouvrages. Lors de l'évaluation de la sécurité d'un ouvrage, si des enjeux de sécurité sont observés ou anticipés, un exposé des correctifs est alors rédigé et envoyé à la Direction de la sécurité des barrages pour approbation. Ce document présente notamment un échéancier des travaux requis pour solutionner le ou les enjeux de sécurité signalés. D'autres mentions, apparaissant en violet, soulignent des vulnérabilités assumées ou des conséquences connues sur le milieu (aléas amplifiés).

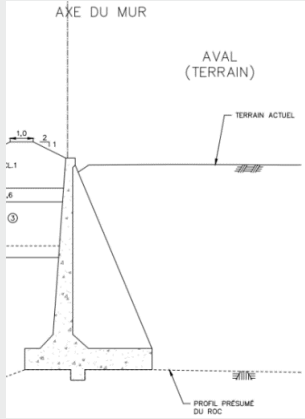
5.1 Remblai amont

Tableau 8 : Fiche de sensibilité pour le remblai amont

Description de la composante de projet		Image
<p>SNC-Lavalin (2023) : « L'encochement a comme objectif d'assurer la stabilité du mur de soutènement. »</p> <p>Matériaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Remblai de zone 3 (remblai de masse visant à assurer la stabilité du talus amont) ; – Remblai de zone 3B (berme de stabilisation submergée et zone de transition entre les matériaux existants et le nouveau remblai d'encochement) ; – Remblai de zone 4A (coussin de perré à granulométrie constituée de blocs, de pierre concassée et de gravier grossier, visant à prévenir l'érosion des matériaux) ; – Remblai de zone 4 (perré de protection pour le talus amont contre les dommages causés principalement par les vagues et le mouvement des glaces). 		<p>Image (ci-haut) : Coupe E tirée de SNC-Lavalin (2023)</p>
Aléa/indicateur	Cote	Justification
Étiage sévère	S1	<p>DP : S1 [Perré de protection descendant jusqu'à 15,2 m, soit 40 cm sous le niveau minimum critique (N. Min. C. = 15,60 m)] [Résistance aux vagues du remblai de zone 4A (sous 15,2 m) non discutée dans la documentation] [Problématique secondaire en cas d'étiage sévère, relativement à l'enjeu de la stabilité du mur face au changement de pression hydrodynamique]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>
Vents forts	S0	<p>DP : S0 [Couche de perré protégeant le reste du remblai amont de l'action des vagues induites par les vents forts] [Conception : dimensionnement des perrés permettant une résistance à l'action des vagues provoquées par un vent de récurrence 1:1 000 ans]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>
Glaces dérivantes	S2	<p>DP : S2 [Rives connues pour être « sollicitées à l'occasion par le mouvement des glaces » ; type de sollicitation inhabituel pour les barrages d'HQ, et conséquemment non couvert par le cadre usuel (HQ-IÉSP, 2018b)] [Couche de perré protégeant le reste du remblai amont du mouvement des glaces] [Conception : dimensionnement des perrés permettant une résistance au mouvement de glace d'un hiver de rigueur 1:100 ans]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>
Cycle de gel-dégel	S1	<p>DP : S1 [Présomption d'une sélection de matériaux les plus résistants possibles au gel-dégel, considérant qu'il s'agit d'une problématique bien connue au Québec]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>

5.2 Mur de béton et crête

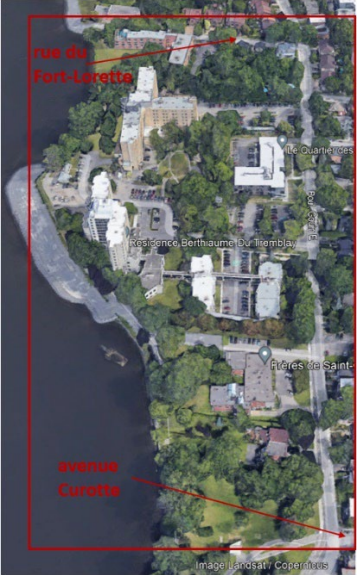
Tableau 9 : Fiche de sensibilité pour le mur de béton et la crête

Description de la composante de projet		Image
<p>Pour la plupart des secteurs, le mur actuel est un mur en T inversé d'une hauteur de 5,79 m fondé à l'élévation 12,80 m avec un rideau de palplanches jusqu'au roc. L'élévation minimale de sa partie étanche est de 17,95 m. Le rideau de palplanches assure l'étanchéité entre la semelle du mur et le rocher (SNC-Lavalin, 2021).</p> <p>Le mur de béton fait partie du système d'étanchéité. Il est traité avec la notion de crête, les coupes disponibles indiquent que le mur réfectionné pourrait être aussi haut que les autres éléments formant la crête de l'ouvrage. Selon HQ-P (2021), l'élévation du dessus du mur variera entre 18,27 m et 18,32 m.</p> <p>HQ-DBi (2011) à propos de l'évacuateur de crue et du MSRD : « On observe l'écaillage du béton sur le tablier du pont soumis aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants. » [...] « L'utilisation du sel fondant pour déglacer le tablier du pont est à proscrire afin d'empêcher sa dégradation prématurée. »</p> <p>SNC-Lavalin (2023), à propos des analyses de stabilité du mur conçu : « Toutes les analyses ont été réalisées avec une nappe phréatique au niveau minimal d'exploitation de 16,85 m. Les autres niveaux seront validés avec la géométrie finale retenue. »</p>		 <p>Image (ci-haut) : Coupe type dans le secteur du parc Louis-Hébert tirée de SNC-Lavalin (2023)</p>
Aléa/indicateur	Cote	Justification
Crue extrême	S4	<p>DP : S4 [Matériel de la crête érodable en cas de franchissement par l'eau] [Avec crête à 18,2 m : « Advenant l'avènement simultané de la pointe de CMP et du vent 1:20 ans, des dommages plus importants qu'habituellement acceptés par Hydro-Québec pourront être observés sur la crête, mais le MSRD demeurera sécuritaire. » (HQ-P, 2021)] [Mur jugé stable jusqu'à un débit d'au moins 5984 m³/s, soit 6,6 % plus élevé que la CMP actuelle (5 614 m³/s), mais étude de stabilité nécessaire pour confirmer la stabilité au-delà de 5 984 m³/s et en cas d'érosion de la crête par une forte crue] [Opérations : périodicité des études de sécurité de 12 ans, ce qui offre la possibilité d'un suivi serré] [Conception : construction en remblai offrant la possibilité de réintervenir sur l'ouvrage si de futures études suggéraient une CMP accrue]</p> <p>CO : S2 [Nécessité de réparer les dommages au matériel de la crête]</p>
Étiage sévère	S3	<p>DP : S3 [Centrale au fil de l'eau, qui ne peut soutenir les étiages] [Problématique des étiages peu développée dans la documentation] [Évocation de problème potentiel de stabilité pour certains murs de soutènement de propriétés riveraines en cas d'abaissement du niveau sous le niveau minimal critique (15,60 m) (HQ-DBi, 2011)]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>
Vents forts	S1	<p>DP : S1 [Accroissement des événements de vents forts susceptibles de mener à davantage de franchissement par les vagues, générant des dommages superficiels]</p> <p>CO : S1 [Nécessité de réparer les dommages superficiels au matériel de la crête]</p>
Glaces dérivantes	S1	<p>DP : S1 [Mention d'un « amoncellement de glaçons poussés sur les rives » dans la documentation] [Potentiel d'érosion par les glaces de la partie hors terre du mur de béton et du matériel de la crête, en cas de forte hausse du niveau de l'eau en raison d'un embâcle] [Opérations : capacité de prévention et de gestion des embâcles]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>
Embâcle	S1	<p>DP : S1 [Potentiel d'érosion par les glaces de la partie hors terre du mur de béton et du matériel de la crête, en cas de forte hausse du niveau de l'eau en raison du frasil] [Opérations : capacité de prévention et de gestion du frasil]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>

Aléa/indicateur	Cote	Justification
Cycle de gel-dégel	S2	<p>DP : S2 [Degré inconnu de susceptibilité du béton envisagé au gel-dégel, mais matériau sans doute modérément sensible au gel-dégel (microfissuration et écaillage)] [Aucune problématique identifiée] [Opérations : utilisation proscrite du sel fondant pour déglacer les sentiers ou chemins environnants, limitant la dégradation prématurée du béton]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>
Remontée de la nappe phréatique	S2	<p>DP : S2 [Déséquilibre de la pression hydrostatique en raison d'un niveau de sol plus élevé que le niveau du réservoir et instabilité du mur] [Inquiétudes exprimées lors d'échanges ou d'atelier de travail à l'égard d'une éventuelle remontée de la nappe phréatique] [État de la nappe phréatique peu connu à l'aval du mur] [Conception : hypothèses « conservatrices » pour les calculs de pression hydrostatique favorisant la stabilité du mur conçu, comme le fait de supposer des niveaux d'eau bas (16,85 m), une pression hydrodynamique nulle ou la charge de glaces nulle (les augmentations de charge provenant du réservoir stabilisent davantage le mur, jusqu'à un certain point) (HQ-TÉE, 2021a)]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>

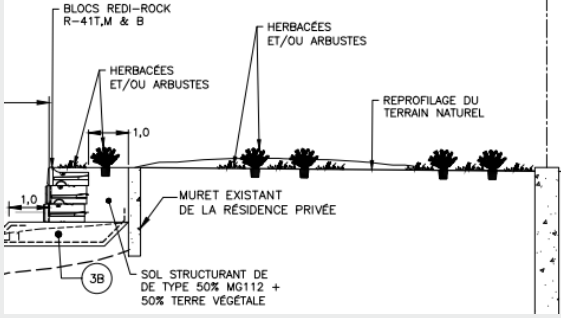
5.3 Remblai aval et milieu habité

Tableau 10 : Fiche de sensibilité pour le remblai aval et le milieu habité

Description de la composante		Image
<p>Le niveau de conception du MSRD est à 18,4 m (18,27 et 18,32 m pour le mur de béton comme tel). L'élévation du terrain à l'aval du mur varie entre 16,5 m et 19,5 m (HQ-P, 2021).</p> <p>Une inondation de la partie aval peut résulter, soit d'une brèche dans le mur, soit d'un déversement par-dessus le mur.</p> <p>HQ-DBi (2011) : « La formation d'un embâcle peut provoquer l'inondation et ravager les habitations riveraines. Afin d'éviter les embâcles et l'inondation, Hydro-Québec opère un brise-glace à l'amont de l'évacuateur pour évacuer les glaces avant la formation des embâcles. »</p> <p>HQ-DBi (2011) : La crue de sécurité de l'aménagement RDP est la CMP, et le niveau des conséquences d'une rupture du MSRD du barrage Simon-Sicard est « considérable ». La prochaine évaluation de la sécurité planifiée pour 2024 se penchera sur la révision du niveau des conséquences de rupture et de la crue de sécurité de l'aménagement RDP.</p> <p>HQ-DBi (2011) à propos d'une rupture en temps de crue extrême (TCE) du MSRD : « La rupture du mur de soutènement du barrage Simon-Sicard, avec une brèche située à l'amont de la pointe des Pères, provoquerait l'inondation de la cuvette délimitée par la rue Curotte au sud-ouest, le boulevard Gouin au sud-est et la rue du Fort-Lorette au nord-est ainsi que par le mur de soutènement au nord-ouest. » Cette cuvette contient les CHSLD mentionnés précédemment, dont les terrains possèdent une élévation en dessous du niveau de la rivière. La cuvette n'aurait pas d'autre exutoire que le site de la brèche. Une rupture en crue extrême inonderait aussi : quatre routes locales (boulevard Gouin, rue du Fort-Lorette, rue Francis, 4^e non spécifiée) ainsi que six résidences.</p>		 <p>Image (adaptée de <i>Google Earth Pro</i>, 2023) : délimitation approximative de la cuvette mentionnée en description.</p>
Aléa/indicateur	Cote	Justification
Chaleur extrême	S1	<p>DP : S1 [Possibilité d'amplification locale des vagues de chaleur (effet d'îlot de chaleur) par l'absorption ou la réémission de la radiation par les matériaux minéraux de l'infrastructure/aménagement] [Conception : choix de matériaux pâles, mais non éblouissants] [Conception : présence d'herbages et d'arbustes]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>
Crue extrême	S4	<p>DP : S4 [Cuvette derrière le MSRD, dont l'élévation des terrains est plus basse que le niveau de la rivière, délimitée par l'avenue Curotte au sud-ouest, le boulevard Gouin au sud-est, la rue du Fort-Lorette au nord-est, et par le MSRD au nord-ouest] [Conséquences considérables pour un dépassement du niveau de la crête à 18,2 m au MSRD, atteint 5 984 m³/s, soit 6,6 % de plus que la CMP actuelle (5 614 m³/s)] [Conséquences d'une brèche ou d'un débordement : inondation de deux CHSLD (Laurendeau et Berthiaume Du-Tremblay), de quatre routes locales et de six résidences (HQ-DBi, 2011)]. [Opérations : périodicité des études de sécurité de 12 ans, ce qui offre la possibilité d'un suivi serré] [Conception : construction en remblai offrant la possibilité de réintervenir sur l'ouvrage si de futures études suggéraient une CMP accrue]</p> <p>CO : S4 [Situation de crise en cas de rupture ou de débordement du MSRD menant à l'inondation de la cuvette]</p>
Glaces dérivantes	S2	<p>DP : S2 [Mention d'un « amoncellement de glaçons poussés sur les rives » dans la documentation] [Potentiel d'érosion des sous-composantes de surface du remblai aval] [Opérations : capacité de prévention et de gestion des embâcles (brise-glaces, estacades)]</p> <p>CO : S1 [Nécessité de gérer les glaces amoncelées sur la servitude ou les terrains]</p>
Embâcle	S2	<p>DP : S2 [Débordement d'eau possible (avec ou sans glaces)] [Potentiel d'érosion des sous-composantes de surface du remblai aval, en cas de débordement d'eau] [Opérations : capacité de prévention et de gestion du frasil (action de régulation des vannes)]</p> <p>CO : S1 [Nécessité de gérer les glaces amoncelées sur la servitude ou les terrains]</p>

5.4 Plantation terrestre

Tableau 11 : Fiche de sensibilité pour la plantation terrestre

Description de la composante de projet		Image
<p>Certains segments de l'infrastructure comporteront des composantes d'aménagement vertes, à savoir des herbacées et/ou des arbustes. Ces végétaux contribueront à réduire l'effet d'îlot de chaleur et le ruissellement excessif (vers l'aval) qu'engendreraient des surfaces minéralisées en l'absence de ces composantes vertes, en plus d'avoir un impact esthétique positif et un avantage sur la biodiversité.</p> <p>Genres/espèces d'herbacées envisagées : à déterminer (les espèces indigènes seront privilégiées).</p> <p>Genres/espèces d'arbustes envisagés : à déterminer (les espèces indigènes seront privilégiées).</p> <p>Hauteur des herbacées et arbustes à maturité : à déterminer.</p>		 <p>Image (ci-haut) : Partie de la figure 6 (Coupe F). Détails de conception sujets à changements.</p>
Aléa / indicateur	Cote	Justification
Glaces dérivantes	S1	DP : S1 [Possibilité d'érosion des sous-composantes pendant l'hiver] [Protection des racines par le couvert de neige] CO : S1 [Suivi envisagé pour au moins deux ans après l'implantation]
Embâcle	S1	DP : S1 [Possibilité d'érosion des sous-composantes pendant l'hiver, si embâcle créé] [Protection des racines par le couvert de neige] CO : S1 [Suivi envisagé pour au moins deux ans après l'implantation]
Sécheresse	S2	DP : S2 [Résistance à la sécheresse incluse dans les critères de sélection des espèces] CO : S2 [Nécessité de replanter les végétaux en cas de dessèchement menant à la mortalité des plantes]

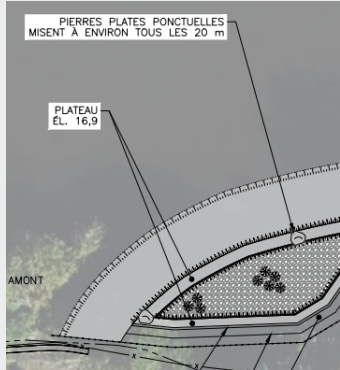
5.5 Herbier aquatique/habitat du poisson

Tableau 12 : Fiche de sensibilité pour l'herbier aquatique/habitat du poisson

Description de la composante		Image
<p>Certains segments de l'infrastructure comporteront des fosses de plantation. Ces fosses hébergeront des plantes indigènes et serviront d'habitat pour diverses espèces de poissons.</p> <p>Genres/espèces de plantes envisagées (liste non exhaustive) : vallisnéries, élodées, potamots.</p> <p>Espèces de poissons visés par l'habitat (liste non exhaustive) : espèces d'eau chaude, cyprins, espèces phyto-lithophiles.</p> <p>Sous-composantes minérales : substrat argilo-limoneux (épaisseur : 250 mm) ; dallage de cailloux 50-250 mm (épaisseur : 250 mm), avec surface au niveau 16,8 m.</p>		<p>Image (ci-haut) : Partie de la figure 6 (Coupe F). Détails de conception sujets à changements.</p>
Aléa / indicateur	Cote	Justification
Climat plus chaud	S1	<p>DP : S1 [Espèces de plantes (vallisnéries, élodées et potamots) jugées non sensibles] [Espèces de poissons généralistes, adaptées aux eaux chaudes] [Températures potentiellement plus élevées qu'ailleurs dans la rivière provenant des sous-composantes minérales, à la contrainte sur la profondeur (en raison de la turbidité de l'eau jumelée au besoin de lumière pour les plantes) ainsi qu'aux vitesses de courant faibles à nulles] [Possibilité de quitter les herbiers si les eaux y devenaient thermiquement inconfortables, sauf pour les stades œuf et larve (avril à juin)]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>
Chaleur extrême	S2	<p>DP : S2 [Mortalité massive possible, surtout pour les stades œuf et larve] [Conception : plantations terrestres adjacentes comprenant des arbustes susceptibles de faire de l'ombre sur les herbiers aquatiques]</p> <p>CO : S0 [Recolonisation spontanée depuis les habitats naturels environnants advenant une mortalité massive des œufs, des larves ou des poissons]</p>
Vents forts	S1	<p>DP : S1 [Érosion jugée basse] [Conception : Effet limité de la réflexion des vagues sur les blocs en raison de la séparation horizontale de 1 m] [Conception : léger effet brise-lame par les pierres plates, limitant l'effet des vagues par endroits]</p> <p>CO : S1 [Nécessité d'un suivi régulier durant les cinq ans suivant l'implantation (fréquence à déterminer)]</p>
Glaces dérivantes	S2	<p>DP : S2 [Possibilité d'érosion des sous-composantes pendant l'hiver] [Possibilité d'arrachement et de transport du matériel causés par un englacement des sous-composantes de l'herbier suivi d'un mouvement horizontal (induit par le courant ou par les vents) ou d'un mouvement vertical (induit par effet de bouée)]</p> <p>CO : S2 [Nécessité d'un suivi régulier durant les cinq ans suivant l'implantation (fréquence à déterminer)] [Opérations : Un suivi est prévu sur cinq ans après l'implantation (fréquence à définir par la suite en fonction des crues et événements (glaces, vents, etc.))]</p>

5.6 Pierres plates/habitat de la tortue

Tableau 13 : Fiche de sensibilité pour les pierres plates/habitat de la tortue

Description de la composante		Image
<p>Certains segments de l'infrastructure comporteront un plateau d'élévation (16,9 m), avec pierres plates de 250 mm de hauteur disposées à tous les 20 m environ. Ces pierres plates serviront de plateforme de lézardage pour les tortues.</p> <p>Espèces de tortues visées par l'habitat : tortue géographique, tortue serpentine, tortue peinte.</p> <p>Type de pierres envisagé : pierres plates (grises) ou bloc de béton (pâles)</p>		 <p>Image (ci-haut) : Vue en plan</p>
Aléa / indicateur	Cote	Justification
Climat plus chaud	S0	DP : S0 [Type de pierres choisi de manière à imiter les plateformes naturelles] [Réchauffement limité par les vagues mouillant fréquemment le dessus des pierres] CO : S0 [Aucune problématique identifiée]
Vents forts	S1	DP : S1 [Méthode pour prévenir le déplacement des pierres sous l'impact des vagues ou encore de la glace encore à l'étude (plateau adapté, ancrages, etc.)] CO : S0 [Aucune problématique identifiée]
Glaces dérivantes	S2	DP : S2 [Zone de faibles courants (baie de Walker)] [Pierres isolées pouvant offrir une bonne prise aux glaces et méthode pour limiter l'effet des glaces sur des pierres isolées encore à l'étude (recours à des ancrages considéré)] [Effet de bouée limité par le niveau maximum d'exploitation, mais transgressions possibles de ce niveau] CO : S0 [Aucune problématique identifiée]
Cycle de gel-dégel	S1	DP : S1 [Degré inconnu de susceptibilité des pierres envisagées au gel-dégel] [option « bloc de béton » possiblement plus sensible au gel-dégel (microfissuration et écaillage)] CO : S0 [Aucune problématique identifiée]

5.7 Usagers du site

Tableau 14 : Fiche de sensibilité pour les usagers du site

Description de la composante		Image
<p>Des travailleurs et des passants circuleront sur l'infrastructure ou à proximité.</p> <p>Image (ci-contre) : Diapositive 22 du document de présentation publique du 15 septembre 2022 (Hydro-Québec, 2022).</p>		
Aléa / indicateur	Cote	Justification
Chaleur extrême	S1	<p>DP : S1 [Coup de chaleur ; déshydratation ; inconfort ; baisse de productivité des employés] [Opérations : pour la phase de construction, l'analyse de santé & sécurité au travail (SST) détaillée, qui sera réalisée dans la phase projet, prendra en compte les canicules pour les travailleurs en phase de construction]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>
Vents forts	S0	<p>DP : S0 [Pose de barrières de sécurité, si requis en fonction de la réglementation] [Aucune évidence de problème de sécurité pour les humains par le passé]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>
Glaces dérivantes	S0	<p>DP : S0 [Transport de glace par-dessus la crête possible] [Aucune évidence de problème de sécurité pour les humains par le passé]</p> <p>CO : S0 [Aucune problématique identifiée]</p>

6

6 Constats et recommandations d'adaptation

6.1 Synthèse

Au total, l'analyse de risque de la présente évaluation de l'adaptation aux changements climatiques s'est penchée sur 29 interactions entre composantes de projet et aléas climatiques. Rappelons que les scores de risque du CVIIP (2021) sont déterminés par la multiplication des scores d'exposition (0 ou 1), de probabilité (variant de 0 à 7) et de sensibilité (variant de 0 à 4). Il en résulte donc la grille de détermination pour les interactions composante-aléa sélectionnées à l'étape du traitement de l'exposition (c'est-à-dire pour lesquelles $E = 1$) (tableau 15). Dans le cadre de la présente évaluation, le score de risque découlant d'un intervalle de scores de probabilité est déterminé en considérant le plus haut score de probabilité (l'incertitude est donc réduite à cette étape, en appliquant une certaine forme du principe de précaution). Par exemple, une interaction composante-aléa caractérisée par les scores P2-P3 et S4 serait caractérisée par un score de risque de 12. Les risques sont traités selon trois grandes catégories de scores (tableau 16) : les risques élevés (en rouge) avec des scores de 15 ou plus, les risques modérés (en jaune) avec des scores de 8 à 14 et les risques faibles ou nuls (en bleu) pour les scores inférieurs à 8.

Certains risques peuvent être catégorisés en tant que cas particuliers, en raison de leur probabilité d'occurrence très fréquente (P7)⁴, mais de leur basse sensibilité (sensibilité S1), identifiés en rose, ou inversement, en raison d'une probabilité très rare (P1), mais d'une sensibilité très élevée (sensibilité S4), identifiés en violet. Lorsqu'un score de probabilité ou de sensibilité est non déterminé (n. d.), la situation correspondante pour le score de risque reste inchangée (les cases en gris), mais peut également être considérée comme un cas particulier lorsque la sensibilité est élevée ou très élevée,

⁴ Ou P5 lorsque la cote P7 ne s'applique pas aux aléas qui, par définition, ne peuvent pas dépasser la fréquence de 1 fois par année.

c'est-à-dire avec de graves conséquences même avec une rare probabilité d'occurrence (cases violettes).

Tableau 15 : Interactions composante-aléa sélectionnées pour l'analyse de risque

Composantes de projet	Aléa climatique									
	Climat plus chaud	Chaleur extrême	Crue extrême	Étiage sévère	Vents forts	Glaces dérivantes	Embâcle	Cycles de gel-dégel	Remontée de la nappe phréatique	Sécheresse
Remblai amont				n. d. S1 n. d.	n. d. S0 n. d.	P0 S2 R0		P0-P3 S1 R3		
Mur de béton et crête			n. d. S4 n. d.	n. d. S3 n. d.	n. d. S1 n. d.	P0 S1 R0	n. d. S1 n. d.	P0-P3 S2 R6	n. d. S2 n. d.	
Remblai aval et milieu habité		P6-P7 S1 R7	n. d. S4 n. d.			P0 S2 R0	n. d. S2 n. d.			
Plantation terrestre						P0 S1 R0	n. d. S1 n. d.			n. d. S2 n. d.
Herbier aquatique/habitat du poisson	P4-P5 S1 R5	P6-P7 S2 R14			n. d. S1 n. d.	P0 S2 R0				
Pierres plates/habitat de la tortue	P4-P5 S0 R0				n. d. S1 n. d.	P0 S2 R0		P0-P3 S1 R3		
Usagers du site		P6-P7 S1 R7			n. d. S0 n. d.	P0 S0 R0				

Tableau 16 : Grille de détermination des scores de risque

S4	Sensibilité	0	4	8	12	16	20	24	28
S3		0	3	6	9	12	15	18	21
S2		0	2	4	6	8	10	12	14
S1		0	1	2	3	4	5	6	7
S0		0	0	0	0	0	0	0	0
		Probabilité							
		P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6*	P7*

*Il est à noter que les cotes P6 et P7 ne s'appliquent pas aux aléas qui, par définition, ne peuvent pas dépasser la fréquence de une fois par année.

6.2 Risques limités

Certains risques tirés de l'analyse du tableau 16 présentent une basse cote de probabilité. C'est notamment le cas de l'aléa « glaces dérivantes », défini par le cumul de degrés-jour de gel supérieur ou égal à la valeur de la période de retour de 100 ans de la période de référence (P1 par définition), lequel a été jugé avec une cote P0 pour la période 2051-2080. De manière générale, les risques liés

au froid devraient décroître au fil du temps, et ce, bien que les épisodes de froid intense demeurent plausibles. Cette tendance, bien que moins linéaire et abrupte, s'applique également aux aléas associés aux cycles de gel-dégel, mais leur sensibilité relative aux interactions composante-aléa persiste à un niveau modéré.

En revanche, certains risques liés à la chaleur devraient connaître une probabilité croissante d'ici 2080. Toutefois, la situation demeure peu préoccupante à leur égard, en raison d'une basse cote de sensibilité. C'est notamment le cas pour l'aléa « climat plus chaud », dont les conséquences directes liées à l'habitat de la tortue et du poisson sont jugées limitées (cotes de sensibilité S0 et S1 respectivement), et ce, malgré les projections indiquant que les températures estivales maximales historiques seront atteintes ou dépassées presque chaque année d'ici la fin du 21^e siècle (cote P4-P5). Il en va de même pour l'aléa « chaleur extrême », défini par le nombre de jours extrêmement chauds [$T_{\max} > 34$ °C]. Bien qu'il soit en augmentation significative, il suscite peu de préoccupations pour le remblai aval et le milieu habité (S1). Cette faible sensibilité s'explique en partie par le choix d'espèces de poissons et de tortues considérées, le choix des matériaux ainsi que la présence d'arbustes et les conséquences directes n'en sont que la nécessité d'un suivi et entretien accrus.

Pour d'autres aléas, les connaissances scientifiques actuelles ne fournissent pas d'indication claire sur l'évolution future de la probabilité d'occurrence, si bien que tous les cas de figure demeurent plausibles (baisse, stationnarité approximative ou hausse). C'est le cas par exemple des aléas liés aux « vents forts » et aux « embâcles », mais pour qui la sensibilité demeure faible. Dans ce contexte d'incertitude sur la direction (et l'ampleur) du changement, il est raisonnable de supposer que toutes conditions météorologiques adverses s'étant déjà produites par le passé pourraient se reproduire dans le futur.

6.3 Risques croissants

Dans l'ensemble, les risques préoccupants sont ceux auxquels des composantes sont sensibles et qui présentent une faible probabilité historique projetée pour croître dans le futur. C'est le cas par exemple de l'aléa climatique lié à la « chaleur extrême » (aléa épisodique), défini par le nombre de jours extrêmement chauds [$T_{\max} > 34$ °C] et dont les impacts sur l'herbier aquatique et l'habitat du poisson sont jugés modérés, contrairement à l'aléa « climat plus chaud », qui est graduel. Bien que les espèces de poissons visées par le projet soient adaptées aux eaux chaudes, elles pourraient connaître une mortalité massive en cas de chaleur extrême. Cependant, elles ne sont pas menacées, ce qui signifie qu'une éventuelle mortalité massive n'entraînerait pas leur extinction. Si une telle mortalité devait se produire, les habitats construits pourraient potentiellement être repeuplés par des populations d'habitats naturels, bien que leur emplacement exact ne soit pas encore identifié.

Dans le contexte de cette étude, c'est aussi le cas des composantes sensibles aux aléas pour lesquels les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas de dégager de tendance claire sur le changement futur dans la probabilité d'occurrence, mais pour qui une hausse peut être tout de même envisagée bien que non quantifiable. Par exemple l'aléa « sécheresse » (section 4.2.10) suscite un risque modéré face aux plantations terrestres.

6.4 Risques de très faibles probabilités et de très hautes conséquences

Dans le cadre de cette étude, les risques les plus préoccupants sont associés à des situations où des éléments pourraient subir des conséquences graves, nécessitant ainsi des actions d'urgence. Cependant, la projection de la probabilité future de ces événements est entourée d'incertitudes en raison du manque de données scientifiques pour établir une tendance claire.

Un exemple illustrant cette préoccupation est celui de la crue extrême, où les conséquences potentielles d'une rupture du MSRD ont été qualifiées de considérables en raison de la présence de deux CHSLD et d'autres infrastructures vulnérables dans la zone inondable. L'évaluation du risque repose sur un débit de 5 984 m³/s, qui dépasse de 6,6 % la capacité de débit maximal actuelle (5 614 m³/s) déterminée par la CMP. La CMP est un indicateur crucial pour le dimensionnement des barrages, mais son évaluation est complexe, particulièrement pour les bassins versants partiellement régulés.

De même, les risques liés aux étiages sévères et à la remontée de la nappe phréatique sont également préoccupants. La stabilité du MSRD dépend de la pression exercée par la nappe phréatique côté aval et du niveau de la rivière côté amont, des facteurs potentiellement sujets à des variations en raison des changements climatiques. Bien que les étiages passés n'aient pas posé de problème de stabilité, les projections suggèrent que des étiages plus sévères en été et en automne pourraient se produire à l'avenir. Cependant, la conception actuelle du MSRD n'a pas pris en compte la possibilité d'une sécheresse et d'étiages sévères coïncidant avec une nappe phréatique élevée. Il convient de noter que les informations concernant l'évolution future de la nappe phréatique sont très limitées.

6.5 Mesures d'adaptation proposées

Afin de réduire les risques identifiés dans la présente évaluation de l'adaptation aux changements climatiques du projet de réfection du MSRD du barrage Simon-Sicard, plusieurs mesures d'adaptation sont proposées (tableau 17). Ces mesures ne résument pas nécessairement tout ce qui est entrepris pour favoriser l'adaptation aux changements climatiques ; certaines mesures d'adaptation sont implicites dans la conception (normes de construction et habitudes de travail tenant compte des événements météorologiques marquants), alors que d'autres ont été intégrées à l'étape de l'évaluation des codes sensibilité. Il est donc ici question de mesures additionnelles.

Enfin, il est à noter que les mesures sont formulées du point de vue de l'adaptation aux changements climatiques et ne constituent que des propositions à l'intention du promoteur (Hydro-Québec). Les mesures n'ont pas été formulées du point de vue réglementaire et il revient au promoteur de vérifier leur adéquation avec les lois et règlements municipaux, provinciaux et fédéraux.

Tableau 17 : Mesures d'adaptation proposées pour le projet de réfection du MSRD du barrage Simon-Sicard

Composante	Aléa	Mesure d'adaptation proposée
Mur de béton et crête Remblai aval et milieu habité	Crue extrême	<ul style="list-style-type: none"> – Effectuer un exercice de modélisation hydrologique sur la base d'un ensemble de projections climatiques pour le bassin versant de la rivière des Outaouais (température, précipitations, neige, humidité des sols, etc.), afin de pouvoir cerner un ensemble de possibilités pour la future CMP de printemps et la future CMP d'été-automne de la rivière des Outaouais, et par extension de la rivière des Prairies. Il s'agit d'une façon de déterminer une probabilité de franchissement de seuil pour la future CMP. – Considérant que les résultats d'un tel exercice de modélisation hydrologique pourraient ne pas être générés à temps pour le début des travaux de réfection du mur (secteurs non prioritaires), s'assurer qu'une réélévation de la crête soit possible, dans l'éventualité où les résultats de modélisation montreraient que la CMP a des chances significatives d'augmenter au-delà d'un seuil critique au cours des 35 prochaines années. – Continuer le processus d'évaluation de la sécurité des aménagements hydrauliques en place à Hydro-Québec avec une périodicité de 12 ans qui permettra 3 cycles de vérification durant la durée de vie utile du MSRD de 35 ans. La prochaine évaluation de l'aménagement RDP est planifiée pour 2024. Ces évaluations comprendront une mise à jour des données observées pour le calcul des événements extrêmes ainsi qu'une opportunité d'intégrer les avancements de la science des changements climatiques sur les crues extrêmes. Hydro-Québec développe actuellement des méthodes pour inclure les projections climatiques dans la conception des aménagements hydrauliques. Ces évaluations sont des points de décision pour l'adaptation de l'ouvrage.
Mur de béton et crête	Étiage sévère et remontée de la nappe phréatique	<ul style="list-style-type: none"> – Mieux documenter les étiages passés dans le bief amont et effectuer un exercice de modélisation hydrologique visant à cerner les possibilités futures pour les étiages d'été-automne. – Analyser la stabilité du mur pour des niveaux d'eau de la rivière sous le niveau minimum critique (15,60 m), permettant de simuler l'impact d'un éventuel étiage sévère et de mieux connaître la marge de manœuvre sous le niveau minimum critique. – Établir un programme permanent de mesure des niveaux de la nappe phréatique en aval du mur, de manière à disposer de longues séries temporelles pour la prise de décision lors des prochaines études de sécurité de l'aménagement ou lors des prochains cycles de réfection du mur.
Remblai aval et milieu habité Humains (travailleurs et passants)	Chaleur extrême	<ul style="list-style-type: none"> – Minimiser l'aire des surfaces minéralisées (non végétalisées) afin de réduire la contribution au phénomène d'îlot de chaleur. – Maximiser l'ombrage sur les surfaces minéralisées. – Privilégier l'utilisation de matériau ou de revêtement de couleur claire.
Plantation terrestre	Sécheresse	<ul style="list-style-type: none"> – Sélectionner des plantes résistantes à la sécheresse. – Favoriser le maintien de l'humidité dans le sol. – Mettre en place de système d'irrigation (possibilité). – Couvrir le sol avec du paillis organique afin de réduire l'évaporation.
Herbier aquatique/ habitat du poisson	Climat plus chaud et chaleur extrême	<ul style="list-style-type: none"> – Vérifier que les espèces végétales sélectionnées pour l'herbier seront capables de survivre dans des conditions d'eaux plus chaudes résultant des changements climatiques afin d'étayer plus formellement l'hypothèse d'un bon niveau de résilience face au climat futur. – S'assurer que les espèces de poissons sélectionnées disposent d'habitats et de refuges thermiques ailleurs dans la rivière des Prairies afin de s'assurer qu'une éventuelle mortalité massive dans l'habitat construit ait une chance d'être compensée par de la recolonisation à partir d'autres habitats. – Minimiser l'aire des surfaces minéralisées (non végétalisées) afin de réduire le flux thermique du matériel environnant vers l'herbier.

6.6 Limites de l'évaluation

- Il n'y a pas eu de visite du site dans le contexte de cette évaluation, ce qui peut poser une limite pour la description du projet ou pour l'anticipation de certaines interactions entre composante de projet et aléa climatique. La documentation fournie par Hydro-Québec, le logiciel *Google Earth Pro* ainsi que les réponses d'Hydro-Québec aux requêtes d'informations ont néanmoins permis de suffisamment cerner le projet pour conduire une évaluation de l'adaptation aux changements climatiques ;
- L'évaluation a considéré les coupes rendues disponibles par SNC-Lavalin (14 avril 2023). Ces coupes sont considérées comme représentatives, mais ne représentent pas nécessairement toute la variété des composantes qui seront construites dans les trois secteurs du projet ;
- Pour les coupes disponibles, les composantes du projet ont été regroupées en catégories générales (remblai amont, mur et crête, herbier aquatique, etc.) afin de simplifier l'analyse de risques et parce que les sous-composantes (substrat d'herbier, types de blocs et de pierres, espèces végétales précises, etc.) ne sont pas toutes sélectionnées de manière définitive à cette étape-ci du projet (ingénierie 30 %). Travailler avec une catégorisation plus détaillée aurait vraisemblablement permis de générer certaines données supplémentaires, mais n'aurait sans doute pas changé le constat général exprimé à travers les énoncés de résilience préliminaires ;
- Il existe un grand manque d'informations pour les indicateurs qui ne sont pas directement liés aux températures et aux précipitations, une situation qui n'est pas indépendante de l'absence de projections pour ces variables sur les portails web de données climatiques ;
- Le traitement de l'incertitude climatique future n'est pas uniforme d'un indicateur à l'autre. Les scénarios de concentration de GES RCP4.5 (souvent considéré optimiste) et RCP8.5 (souvent considéré pessimiste) ont servi de bornes autant que possible, mais, pour certains indicateurs (ex. : CMP augmentée, vents forts), l'information disponible ne correspond pas à cette paire de scénarios ;
- Les sous-composantes n'étant généralement pas sélectionnées à cette étape-ci du projet (ingénierie 30 %), les seuils impliqués dans les indicateurs pour certains aléas (ex. : vents forts, chaleur extrême) ne sont pas liés à des paramètres de conception précis ;
- Les événements combinés (ex. : crue extrême avec vagues, étiage avec remontée de nappe phréatique) ont été peu approfondis dans cette évaluation, en raison du manque d'informations autant quantitatives que qualitatives à leur sujet.

6.7 Énoncés de résilience préliminaire

Une évaluation de résilience aux changements climatiques a été réalisée pour le projet de réfection du MSRД du barrage Simon-Sicard, un ouvrage faisant partie de l'aménagement hydroélectrique RDP. Au total, 29 interactions potentielles entre les principaux aléas hydroclimatiques pouvant agir sur le site et les principales catégories de composantes du projet ont été sélectionnées. Le constat principal de l'évaluation est que les efforts déployés pour inclure l'adaptation aux changements climatiques dans le projet sont adéquats.

Cependant, il convient de noter que l'incertitude concernant l'évolution future des crues extrêmes et des étiages sévères dans la rivière des Prairies pourrait être mieux évaluée en développant des connaissances supplémentaires, ce qui pourrait être intégré à la prise de décision lors des prochaines évaluations de sécurité de l'aménagement RDP. Dans le cas des crues, l'enjeu concerne la CMP, une quantité théorique qui sert de crue de sécurité pour l'aménagement RDP. Le mur de soutènement est résilient face à la valeur de la CMP établie pour le climat du passé récent, soit 5 614 m³/s, avec une marge de +6,6 % face à une éventuelle augmentation de la CMP dans le futur durant la durée de vie de l'ouvrage de 35 ans. Un ordre de grandeur convenable pour appréhender l'évolution future de la

CMP dans le cadre de la présente évaluation est de +3,8 à + 5,6 % (sur la base de projections réalisées pour d'autres bassins versants de l'est du Canada), alors que le mur de soutènement est considéré stable et capable de contenir les débordements jusqu'à une augmentation de +6,6 % avec des vagues et en l'absence d'embâcles (estimation fournie par Hydro-Québec). Quant aux étiages, ils sont pressentis par la communauté scientifique pour devenir plus sévères et plus longs dans le sud du Québec, mais la façon dont ce constat général se manifestera dans la rivière des Prairies demeure très incertaine. Par ailleurs, la documentation du projet n'aborde pas la capacité future à assurer le respect du niveau minimal critique (15,60 m) de la rivière en face du mur de soutènement.

Dans ce contexte, il pourrait être envisagé d'effectuer des exercices de modélisation hydrologique afin de mieux cerner les possibilités futures à l'égard de la CMP et des étiages sévères dans la rivière des Prairies et de les intégrer lors de la prochaine évaluation de la sécurité de l'aménagement RDP. Par ailleurs, les étiages passés pourraient être mieux documentés et la nappe phréatique (côté terrestre du mur) pourrait faire l'objet d'un programme permanent de mesures. Développer des connaissances en ce sens enrichirait les prochaines études de sécurité de l'aménagement RDP et permettrait une prise de décision éclairée.

Cette évaluation est basée notamment sur les lignes directrices de la norme ISO 14091:2021 (*Adaptation au changement climatique*) et le rapport intègre le jugement d'experts issus de diverses disciplines ainsi que les renseignements disponibles au moment de l'évaluation.



7 Références

- Bush E., et Lemmen D.S, éditeurs. (2019). Rapport sur le climat changeant du Canada. Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 446 pages. [En ligne] : <https://changingclimate.ca/CCCR2019/fr/a-propos/>
- Centre d'expertise hydrique du Québec - CEHQ. (2014). Guide d'interprétation de la fiche technique d'un barrage. ISBN : 978-2-550-70085-2 (PDF), 20 pages.
- Cheng C.S., Lopes E., Fu C., and Huang Z. (2014). Possible Impacts of Climate Change on Wind Gusts under Downscaled Future Climate Conditions: Updated for Canada. *Journal of Climate*, vol. 27, p. 1255-1270, doi : 10.1175/JCLI-D-13-00020.1.
- Clavet-Gaumont J., Sushama L., Khaliq M.N., Huziy O., and Roy R. (2013). Canadian RCM projected changes to high flows for Québec watersheds using regional frequency analysis. *Int. J. Climatol.*, 33(14):2940-2955. [En ligne]: <https://doi.org/10.1002/joc.3641>
- Clavet-Gaumont J., Huard D., Frigon A., Koenig K., Slota P., Rousseau A., Klein I., Thiémonge N., Houdré F., Perdikaris J., Turcotte R., Lafleur J., and Larouche B. (2017). Probable maximum flood in a changing climate: An overview for Canadian basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, p. 11-25.
- CSA PLUS 4013:19. (2019). Technical guide. Development, interpretation, and use of rainfall intensity duration-frequency (IDF) information: Guideline for Canadian water resources practitioners. Canadian Standards Association, ICS 13.060.10, ISBN 978-1-4883-2625-7.
- CVIIP. (2021). PIEVC High Level Screening Guide. PIEVC© Family of Resources. Beta Version 1.01 - Nov. 10, 2021. Version anglaise.
- Dagenais M. (2011) Montréal et l'eau : Une histoire environnementale. Les Éditions du Boréal, ISBN 978-2-7646-2095-3, 306 pages.
- Derksen C., Burgess D., Duguay C., Howell S., Mudryk L., Smith S., Thackeray C., and Kirchmeier-Young M. (2019). Changes in snow, ice, and permafrost across Canada ; Chapter 5 in *Canada's Changing Climate Report*, (ed.) E. Bush and D.S. Lemmen ; Government of Canada, Ottawa, Ontario, p.194-260.

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat - GIEC. (2021). Atlas. Dans : Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. Sous presse.
- Guay C., Minville M., and Braun M. (2015). A global portrait of hydrological changes at the 2050 horizon for the province of Québec. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, Vol. 40, No. 3, pp. 285-302, doi:10.1080/07011784.2015.1043583.
- Huziy O., Sushama L., Khaliq M.N., Laprise R., Lehner B., and Roy R. (2013). Analysis of streamflow characteristics over Northeastern Canada in a changing climate. *Clim. Dyn.*, 40(7):1879-1901. [En ligne] : <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1406-0>
- Hydro-Québec. Non daté. *Barrage Simon-Sicard - Réfection du mur de soutènement*. [En ligne] : <https://www.hydroquebec.com/projets/mur-barrage-simon-sicard/>
- Hydro-Québec et Stantec Experts-conseils ltée (2021) Adaptation aux changements climatiques. Phase 1 : Analyse des risques. Version finale (février 2021), 168 pages + annexes.
- ISO 14091:2021. (2021). Adaptation au changement climatique - Lignes directrices sur la vulnérabilité, les impacts et l'évaluation des risques. Version française.
- Kirchmeier-Young M.C., Wan H., and Zhang X. (2021). Anthropogenic Contribution to the Rainfall Associated with the 2019 Ottawa River Flood [in "Explaining Extremes of 2019 from a Climate Perspective"]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 102 (1), S33-S38, doi:10.1175/BAMS-D-20-0191.1. BAMS-D-20-0144.1.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques - MDDELCC. (2015). Portrait sommaire du bassin versant de la rivière des Outaouais. 51 pages. [En ligne] : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/bassins/outaouais/portrait-sommaire.pdf>.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques - MELCC. (2021). Les changements climatiques et l'évaluation environnementale : Guide à l'intention de l'initiateur de projet. [En ligne] : www.environnement.gouv.qc.ca/evaluations/directive-etude-impact/guideintention-initiateur-projet.pdf
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs - MELCCFP et Ouranos. (2022). Guide de l'atlas hydroclimatique du Québec méridional. ISBN 978-2-550-93500-1 (PDF). 40 pages.
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). 2023. *Atlas hydroclimatique du Québec méridional*. [En ligne] : cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique
- Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports - MTMDET (2018). Tome III - Ouvrages d'art. Québec. [En ligne] : www3.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits/ouvrage_routier/normes/norme1.fr.html.
- Musselman K.N., Clark M.P., Liu C., Ikeda K., and Rasmussen R. (2017). Slower snowmelt in a warmer world. *Nat. Clim. Change*, 7:214. [En ligne] : <https://doi.org/10.1038/nclimate3225>
- Ouranos. (2015). Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Édition 2015. Ouranos, Montréal, Québec. 415 pages.
- Teufel B., Sushama L., Huziy O., Diro G.T., Jeong D.I., Winger K., Garnaud C., de Elia R., Zwiers F.W., Matthews H.D., and Nguyen V.-T.-V. (2019). Investigation of the mechanisms leading to the 2017 Montreal flood. *Climate Dynamics*, 52:4193-4206 [En ligne] : <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4375-0>

Plusieurs documents spécifiques au projet ont été également rendus disponibles par la Direction Environnement d'Hydro-Québec dans le contexte de cette évaluation (tableau 18).

Tableau 18 : Documentation technique transmise par la Direction Environnement d'Hydro-Québec

Nom court	Type de document	Référence complète
HQ-P (2010)	Étude de crues fréquentielles	Hydro-Québec Production - Hydrologie et obligation d'affaires - Direction Planification de la production (mai 2010) Rivière des Prairies : Étude de crues fréquentielles. Rapport 04-33-10-0001, 142 pages.
HQ-DBi (2011)	Étude de sécurité (extraits)	Hydro-Québec - Direction Barrages et infrastructures (janvier 2011) Évaluation de la sécurité de l'aménagement Rivière-des-Prairies (Chapitres 3, 8, 11, 14, 16 ; Annexe B).
HQ-P (2016)	Directive d'exploitation	Hydro-Québec Production (mai 2016) Mode d'exploitation hydraulique - Centrale Rivière-des-Prairies. N° 13301-D-922, 12 pages.
HQ-IÉSP (2018a)	Rapport de gel de concept	Hydro-Québec Innovation, équipement et services partagés (avril 2018) Aménagement hydroélectrique de la Rivière-des-Prairies. Secteurs des travaux prioritaires du mur de soutènement rive droite du barrage Simon-Sicard - Aspects hydrauliques et géotechniques. Rapport de gel de concept, RA-2018-0005-01, 56 pages.
HQ-IÉSP (2018b)	Note technique hydraulique	Hydro-Québec Innovation, équipement et services partagés (septembre 2018) Aménagement de la Rivière-des-Prairies : Mur de soutènement rive droite du barrage Simon-Sicard - Travaux prioritaires - Note technique hydraulique. Rapport RA-2018-0003-02, 51 pages + annexes.
HQ-IÉSP (2020)	Rapport sectoriel	Hydro-Québec Innovation, équipement et services partagés (octobre 2020) Centrale de la Rivière-des-Prairies. Rapport sectoriel - Avant-projet mur de soutènement rive droite (MSRD) du barrage Simon-Sicard - Aspects hydrauliques et géotechniques. Rapport RA-2020-0017-02, 59 pages.
Thiémonge (2021)	Calcul de la CMP de Carillon	Thiémonge N. - Hydro-Québec - TransÉnergie et équipement (avril 2021) QT3AC - Réhabilitation de l'évacuateur de crues - Calcul de la Crue Maximale Probable à Carillon pour le printemps et l'été-automne. RA-2020-0013-01, 47 pages + annexes.
HQ-TÉÉ (2021a)	Rapport sectoriel	Hydro-Québec TransÉnergie et Équipement - Unité Conception - Barrages et ouvrages régulateurs Disciplines structure (21 juin 2021) 0003 - Centrale Rivière-des-Prairies Réhabilitation du mur de soutènement rive droite du barrage Simon-Sicard. Rapport sectoriel d'avant-projet. Révision A - Rapport final, QT3CN-RT-HQIESP-MSA-STR-0001-A, 56 pages.
HQ-TÉÉ (2021b)	Rapport synthèse d'avant-projet	Hydro-Québec TransÉnergie et Équipement - Direction Ingénierie de production (août 2021) Aménagement Rivière-des-Prairies (RDP) Réhabilitation et mise aux normes du Mur de Soutènement Rive Droite (MSRD) du Barrage Simon-Sicard - secteurs non prioritaires (phase-2). Rapport synthèse d'avant-projet. 38 pages + annexes.
HQ-TÉÉ (2021c)	Révision de calcul de la revanche	Hydro-Québec TransÉnergie et Équipement - Direction Ingénierie de production (septembre 2021) Aménagements Rivière-des-Prairies : QT3CN - Mur de soutènement rive droite du barrage Simon-Sicard : Révision de calcul de la revanche et niveau requis à la crête. Rapport RA-2021-0022-01, 38 pages.
SNC-Lavalin (2021)	Critères de conception	SNC-Lavalin / Critères de conception - Réhabilitation du mur de soutènement en rive droite du barrage Simon-Sicard. 680705-1000-40EC-0001 / 2021-09-15, 57 pages + annexes.
HQ-P (2021)	Critères de sélection de la revanche	Hydro-Québec Production - Direction Expertise en barrages et infrastructures (22 octobre 2021) Aménagement de la Rivière-des-Prairies : Mur de soutènement rive droite du barrage Simon-Sicard - Critères de sélection de la revanche. Rapport 0433-1/095, 28 pages.
Hydro-Québec (2022)	Document de présentation publique	Hydro-Québec (15 septembre 2022) Barrage Simon-Sicard - Réfection du mur de soutènement - Solution proposée. Présentation publique. Disponible en ligne : https://www.hydroquebec.com/projets/mur-barrage-simon-sicard/
Thiémonge (2022)	Note interne	Thiémonge N. - Hydro-Québec (27 septembre 2022) Impact des changements climatiques sur la crue maximale probable. N° CI-2022-0038-01, 7 pages.
SNC-Lavalin (2023)	Rapport de conception 30%	SNC-Lavalin / Rapport de conception - Secteurs non prioritaires du MSRD. 680705-1000-4GER-0001 / 2023-01-13, 167 pages + annexes.

