

La Société des Ponts Jacques Cartier et Champlain inc. (PJCCI)

JCAP0015 / CT62576

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste cyclable par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Rapport post-mortem sur le projet pilote d'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier

259172_RAPPORT_POSTMORTEM_003

Rapport final | 09 octobre 2018

Le présent rapport prend en compte les exigences contractuelles et les instructions particulières de PJCCI. Certaines informations et conclusions présentées au cours de ce rapport sont basées sur des constatations préliminaires et des résultats obtenus dans le cadre du projet pilote, ainsi que sur des informations fournies au cours du mandat. L'ensemble des informations et conclusions présentées dans ce rapport est sujet aux changements lors de la phase de mise en œuvre du projet ou dans le cas d'un changement majeur. Ce rapport n'est destiné qu'à PJCCI et non à aucun tiers et ne devrait en aucun cas être invoqué comme tel. Arup ne pourra en aucun cas être tenu responsable du contenu de ce rapport à l'égard de tiers.

Arup Canada inc.
1, Place Ville Marie bureau 3270
Montréal (Québec) Canada H3B 3Y2
www.arup.com



Vérification de document

Titre du projet		La Société des Ponts Jacques Cartier et Champlain inc. (PJCCI)		Numéro du projet	
		Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage		JCAP0015 / CT62576	
Titre du document		Rapport post-mortem sur le projet pilote d'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier		Référence du dossier	
				259172-00	
Référence du document		259172_RAPPORT_POSTMORTEM_003			
Révision	Date				
Ébauche 1	31 août 2018	Description	Première ébauche pour commentaires		
			Préparé par	Vérifié par	Approuvé par
		Nom	Omar Moussa	Juan Echague	Doug Balmer
		Signature			
Finale pour commentaires	27 sep. 2018	Description	Deuxième ébauche pour commentaires		
			Préparé par	Vérifié par	Approuvé par
		Nom	Omar Moussa	Juan Echague	Doug Balmer
		Signature			
Rapport final	09 oct. 2018	Description	Rapport final		
			Préparé par	Vérifié par	Approuvé par
		Nom	Omar Moussa	Juan Echague	Doug Balmer
		Signature			

Équipe de réalisation du mandat

Général

Doug Balmer, ing., Arup Canada Inc., No 5036043

Juan Echague, ing., Arup Canada Inc., No 145195

Omar Moussa, ing., Arup Canada Inc., No 5019494

[REDACTED] ing., Arup Canada Inc., [REDACTED]

[REDACTED] ing., Arup Canada Inc., [REDACTED]

[REDACTED] ing. jr, Arup Canada Inc.

[REDACTED] ing. jr, Arup Canada Inc.

[REDACTED] spécialiste, Arup Canada Inc.

[REDACTED] spécialiste, Arup Canada Inc.

[REDACTED], spécialiste, Arup Canada Inc.

Matériaux et durabilité

[REDACTED] spécialiste, Arup Canada Inc.

[REDACTED], spécialiste, Arup Canada Inc.

Risques climatiques et météorologie

[REDACTED], spécialiste, Arup Canada Inc.

[REDACTED] spécialiste, Arup Canada Inc.

[REDACTED] spécialiste, [REDACTED]

Environnement

[REDACTED] géo, Spécialiste en environnement, [REDACTED]

[REDACTED] Biologiste et Spécialiste en environnement, [REDACTED]

[REDACTED] Géographe et Spécialiste en environnement, [REDACTED]

Électrique

[REDACTED] spécialiste, Arup Canada Inc.

[REDACTED] spécialiste, Arup Canada Inc.

Maintien de la circulation

[REDACTED] ing., [REDACTED]

[REDACTED], ing., [REDACTED]

Estimation

[REDACTED] consultant, [REDACTED]

[REDACTED] spécialiste [REDACTED]

Table des matières

	Page
Sommaire exécutif	1
1 Introduction	5
1.1 Mise en contexte du mandat	5
1.2 Portée du mandat et volets d'étude	5
1.3 Méthodologie	8
1.4 Revue documentaire	10
1.5 Termes et définitions	13
2 Contexte local	15
2.1 Description du pont Jacques-Cartier	15
2.2 Potentiel d'achalandage hivernal - Cyclistes	16
2.3 Potentiel d'achalandage hivernal - Piétons	28
2.4 Variation des conditions météorologiques	31
3 Opérations d'entretien hivernal conventionnel	35
3.1 Contraintes spécifiques au projet	35
3.2 Équipements de déneigement	36
3.3 Produits de déglaçage	41
3.4 Critères d'acceptabilité des opérations de déneigement	43
3.5 Mesure du coefficient de friction par essais de frottement	49
3.6 Projet pilote – Déneigement par méthode conventionnelle	53
3.7 Résultats des opérations	62
3.8 Logigramme des opérations de maintien hivernal conventionnel	79
3.9 Opérations de déneigement du trottoir	82
4 Durabilité de la dalle de béton	88
4.1 Analyse qualitative – Évaluation des produits déglaçant et leurs effets sur la dalle	88
4.2 Analyse quantitative – Analyse de durabilité	95

5	Environnement	108
5.1	Revue réglementaire	108
5.2	Analyse environnementale des produits déglaçant	113
5.3	Cas similaires	118
5.4	Impact potentiel sur la faune	120
6	Système de chauffage	124
6.1	Technologies chauffantes alternatives	124
6.2	Contraintes spécifiques au projet	136
6.3	Comparaison des différents systèmes de chauffage pour implantation sur le pont Jacques-Cartier	139
6.4	Systèmes testés – Projet pilote	142
6.5	Analyse de performance	161
6.6	Analyse des effets thermiques sur la dalle	171
6.7	Conclusion	193
7	Sécurité	196
7.1	Dégagement horizontal de la piste multifonctionnelle	196
7.2	Vitesse des cyclistes en descente	200
7.3	Éclairage et barrière anti-éblouissement	205
7.4	Sensibilisation	209
7.5	Intersection au Pont de l'Île Sainte-Hélène	213
7.6	Analyse de risques climatiques	217
8	Options d'opération hivernale et pratique de gestion	241
8.1	Description des options	241
8.2	Simulation des opérations hivernales sur une saison	252
8.3	Opportunités à long terme	258
8.4	Pratique mondiale pour l'entretien hivernal des pistes cyclables	268
9	Communication	275
9.1	Généralité	275
9.2	Analyse des besoins en communication	275
9.3	Modes de communication	278
9.4	Système de plaintes	283
10	Estimations des coûts	284
10.1	Généralité	284
10.2	Coûts d'investissements initiaux – Adaptation de la piste pour le cyclisme hivernal	284

10.3	Déneigement conventionnel	286
10.4	Système chauffant	290
10.5	Comparaison financière entre les deux alternatives	294
10.6	Analyse de coûts spécifique à l'analyse multicritère	296
11	Analyse préliminaire des risques	299
11.1	Explications	299
11.2	Résultats	301
12	Analyse multicritère	303
12.1	Options évaluées	303
12.2	Définition des dimensions	305
12.3	Définition des critères d'analyse	306
12.4	Pondération des critères	309
12.5	Notation	312
12.6	Résultats de l'analyse multicritère	313
12.7	Discussion des résultats	318
13	Conclusion	319

Annexes

A3 Annexe – Opérations de déneigement

- A3.1 Tableau d'évaluation globale des produits de déglaçage
- A3.2 Fiche de contrôle
- A3.3 Procédure d'essais et résultats
- A3.4 Rapports photographiques et suivi d'évolution des essais

A4 Annexe – Durabilité

- A4.1 Note technique : Service Life Model

A5 Annexe - Environnement

- A5.1 Revue réglementaire
- A5.2 Note technique : Discussion of the Environmental Effects and Mitigation for the De-icing Application of Road Salt

A6 Système de chauffage

- A6.1 Projet pilote – Tapis chauffants
- A6.2 Essai de performance tapis chauffants en atelier
- A6.3 Projet pilote – Membrane chauffante
- A6.4 Fiches de contrôle – Systèmes de chauffage

A11 Analyse préliminaire de risques

- A11.1 Tableau integral

A12 Analyse Multicritère

- A12.1 Analyse multicritère (tableau complet avec critères retenus)
- A12.2 Critères d'analyse retenus et non retenus
- A12.3 Causes principales d'émission de gaz à effet de serre (GES)
- A12.4 Comparaison des coûts

A13 Réflexion sur les futures opérations

- A13.1 Exemple de protocole de communication durant les précipitations

Sommaire exécutif

Afin d'examiner la possibilité de répondre à la demande croissante pour l'ouverture hivernale de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier, la Société des Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée (PJCCI) a mandaté la firme Arup Canada Inc. afin d'effectuer des analyses et essais d'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle durant l'hiver 2017-2018 dans le cadre d'un projet pilote.

La portée du mandat inclut l'évaluation de différentes options d'entretien hivernal, des essais *in situ*, l'analyse des avantages et des inconvénients de chaque solution, l'identification des risques associés et l'exploration des solutions potentielles. Ces analyses adressent particulièrement la sécurité des usagers, l'impact sur la structure existante et sur l'environnement, tout en considérant le contexte particulier du pont Jacques-Cartier.

Basé sur une analyse de faisabilité de déneigement par des méthodes conventionnelles, des essais de déneigement mécanique et d'épandage des produits de déglaçage ont été réalisés entre les sections 1 à 5 de la piste multifonctionnelle. L'expertise acquise au fil de ces essais a permis de mieux comprendre les enjeux relatifs à l'entretien hivernal de la piste et par conséquent d'identifier des solutions envisageables afin d'optimiser les opérations. Les observations principales découlant de ces essais sont les suivantes :

- > Suite aux opérations de déneigement réalisées dans le cadre du projet pilote, la largeur maximale dégagée sur la piste, utilisable pour les cyclistes est de l'ordre de 1,8m ;
- > L'état de la surface de la piste est variable dépendamment du type d'intervention et du produit de déglaçage appliqué ;
- > Les essais d'adhérence ont révélé que, sous différentes conditions, les coefficients de frottement sont peu variables selon le type de produit appliqué et se situent entre « satisfaisant » et « très bon » conformément à l'échelle adoptée par le MTMDET ;
- > Certains défis opérationnels ont été identifiés par rapport à la coordination nécessaire entre le déneigement de la piste et les voies de circulation adjacentes ainsi qu'au déneigement particulier à la section 7 dû à son enclavement entre les clôtures dissuasives.

Onze (11) produits de déglaçage de composition chimique ou organique ont également fait l'objet d'une évaluation de performance axée sur leur efficacité, leur impact sur l'environnement et sur la durabilité de la structure existante. Six (6) produits de déglaçage liquides et solides ont démontré une meilleure performance lors de cette étude comparative. Il s'agit de produits de composition organique, de dérivés de maïs ou de betterave, ainsi que des produits à base de chlorure de sodium comme le sel gemme et la saumure ou de chlorure de calcium et de magnésium. Cependant, considérant l'effet des produits à base de chlorure de magnésium et de calcium sur la durabilité de la structure, l'utilisation des produits de composition organique est privilégiée à des fins courantes pour les températures modérées ou basses. Des produits de composition chimique pourraient être utilisés en faible pourcentage, et en combinaison avec du chlorure de sodium afin d'atteindre une efficacité de déglaçage satisfaisante lors de températures extrêmes.

Une analyse quantitative de la durabilité de la dalle en béton par approche probabiliste et suivant le modèle proposé par la fédération internationale du béton (*fib*) a également permis de confirmer une durée de vie minimale de 50 ans malgré une application directe de sels et en l'absence d'une membrane d'imperméabilisation. Toutefois, bien que les résultats montrent un risque faible ou négligeable d'initiation de la corrosion pour la structure, l'installation d'une membrane d'imperméabilisation à titre préventif et / ou l'élaboration d'un protocole d'inspection et de suivi afin de confirmer les conclusions de cette analyse, sont recommandés considérant la fissuration existante de la dalle.

Du point de vue environnemental, une revue de la législation québécoise et canadienne en vigueur a permis d'identifier principalement des balises pour la gestion des rejets de neige transportée et contaminée par des produits de déglaçage, sans ressortir d'interdiction formelle de rejet direct de neige (sans transport) dans un cours d'eau ou un lac. De plus, suite à une évaluation qualitative des effets néfastes des produits de déglaçage sur l'environnement, il est conclu que l'impact du rejet potentiel de ces produits est généralement faible en regard de la très grande dilution occasionnée par le milieu récepteur dans les sections 3 et 7 principalement, et de l'absence d'incidence sur l'avifaune. En dépit de ces conclusions, la minimisation des rejets de neige contaminée dans le fleuve d'une part, et l'obtention d'un avis formel de la part du Ministère de l'Environnement d'autre part, serait pertinent. De plus, Environnement Canada et le ministère des Pêches et Océans pourraient confirmer cette approche.

La présente étude a aussi exploré la possibilité d'installer un système de chauffage sur la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier. Au cours de l'hiver 2017 - 2018, deux fournisseurs des systèmes de chauffage ont répondu à l'appel d'expression d'intérêt lancé par la Société, proposant soit un système de tapis chauffant ou de membrane chauffante. Ces deux systèmes ont été testés et évalués sur le tablier du pont Jacques-Cartier et les résultats ont été utilisés dans le cadre d'une analyse globale de performance. Malgré certaines inconnues quant à sa capacité de fonte réelle, il a été conclu que le système de membrane chauffante serait plus adapté à l'environnement et aux contraintes spécifiques du pont Jacques-Cartier par rapport à la solution avec les tapis chauffants. Par contre, des essais additionnels sont nécessaires avant d'envisager sa mise en œuvre à grande échelle afin de mieux comprendre son efficacité réelle sous différentes conditions hivernales. Un autre enjeu important à considérer est la demande énergétique très élevée de ce type de systèmes.

Par ailleurs, compte tenu du différentiel thermique entre les surfaces supérieures et inférieures de la dalle dû à l'installation potentielle d'un système chauffant, une analyse thermique de la dalle a été réalisée afin d'évaluer sa vulnérabilité face à ces différentiels. Il en ressort ainsi que des différentiels de température excédant 13°C et 6°C sur les sections 3 et 7 respectivement, pourraient engendrer des fissures dépassant les limites spécifiées par la norme canadienne CAN/CSA S6-14. Par conséquent, une isolation appropriée entre les éléments de chaleur et le tablier en béton doit être considérée.

Afin de compléter l'étude sur la faisabilité du maintien hivernal de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier, plusieurs autres études et analyses additionnelles ont été effectuées, notamment :

- > Une validation des besoins à travers l'estimation d'achalandage anticipé en période hivernale, ainsi que par la caractérisation des types de déplacement des usagers de

la piste multifonctionnelle. À partir des statistiques en période estivale de la piste multifonctionnelle et de ceux du réseau blanc de la ville de Montréal, un trafic cycliste pendulaire aux heures de pointe en particulier, d'environ 330 passages par jour ouvrable en moyenne (piste fermée en fin de semaine), est anticipé entre le 1er novembre et 31 mars, soit 17% de l'achalandage estival. Cette moyenne pourrait varier de façon importante durant l'hiver; par exemple entre le début de l'hiver où la météo est encore favorable et en plein milieu de l'hiver ;

- > Une évaluation de la sécurité des usagers lors de la circulation en hiver. Certains enjeux relatifs à la sécurité, particulièrement en lien avec la largeur réduite de la piste en hiver, la vitesse des cyclistes, l'éclairage et les chutes potentielles de glace de la superstructure. Ensuite, des pistes de solutions telles que des marquages de vitesse au sol, des radars pédagogiques et des panneaux de signalisation ont été étudiées sommairement afin d'explorer la possibilité de réduire ou éliminer ces enjeux ;
- > Le besoin de communication entre PJCCI, les usagers et les autres parties prenantes advenant une ouverture hivernale ainsi que les modes de communication potentiels. Il en ressort que l'établissement d'un protocole de communication efficace serait nécessaire afin de tenir les usagers au courant de l'état de la piste et des autres risques résiduels suite aux opérations hivernales.

À la suite de ces études, quelques options d'opération hivernale par déneigement mécanique sont présentées, considérant les nombreux enjeux du projet. L'historique des conditions météorologiques des deux derniers hivers combiné aux nouvelles connaissances acquises durant le projet a permis de réaliser des simulations d'une ouverture potentielle de la piste multifonctionnelle. Ainsi, avec un déneigement mécanique uniquement, la piste multifonctionnelle ne pourrait en théorie être ouverte qu'entre 55% et 75% du temps, sur la période hivernale et en dehors des périodes creuses de nuit, et dépendamment de l'option envisagée. Il faut toutefois noter que cette simulation se base sur des hypothèses pour tenir compte de la géométrie complexe de certaines sections du pont, de l'incertitude et la variabilité liées aux prévisions météo et du temps de déploiement des ressources nécessaires.

Trois volets additionnels ont été considérés dans le cadre du présent projet afin d'encadrer les analyses effectuées et d'appuyer la prise de décision :

- > Le premier étant l'estimation des coûts pour les différentes options d'opération hivernale, que ce soit par déneigement mécanique ou par chauffage, ainsi que tout investissement nécessaire avant l'ouverture. Les coûts totaux pour les deux options principales sont présentés au tableau suivant :

Options de déneigement	Coûts totaux (arrondis) incluant [REDACTED]	
	Investissements initiaux	Coûts d'opération annuels
Déneigement mécanique	\$2,690,000*	\$180,000
Système de chauffage	\$14,900,000	\$575,000

* Ces coûts comprennent [REDACTED] pour une membrane d'étanchéité

- > Le deuxième volet est une analyse préliminaire des risques effectuée selon les résultats et les conclusions des différentes études. Cette analyse a pour objectif d'identifier les risques et les enjeux potentiels qui pourront découler du maintien de la piste multifonctionnelle en hiver. Les risques identifiés comme critiques sont ceux reliés à la capacité portante de la structure existante et certains risques reliés à la sécurité des usagers. Des mesures de mitigation potentielles ont également été proposées pour chacun des risques. Avant l'application de certaines de ces mesures, des analyses additionnelles sont cependant nécessaires afin de confirmer leur efficacité. De plus, les risques résiduels qui en résultent devraient être considérés par le propriétaire lors de la prise de décision ;
- > Le dernier de ces volets est une analyse multicritère qui a pour but d'évaluer les options pour l'ouverture hivernale de la piste. Les cinq options étudiées à cet effet sont : « Statu Quo », « Déneigement mécanique », « Déneigement par système de chauffage », une « Option combinée » entre déneigement mécanique et système de chauffage ainsi qu'une « Option fondamentale » qui pourrait être envisagée à long terme. Dans le cadre du projet pilote et pour fins de comparaison, une option fondamentale comprenant l'installation d'une toiture sur la piste a été considérée. Cependant, d'autres variantes pourraient être considérées dans le cadre d'une étude plus détaillée. L'analyse multicritère se penche généralement sur quatre dimensions principales, soit les trois composantes du développement durable (Économique, Environnementale et Sociale) auxquelles a été ajoutée une dimension Technique jugée particulièrement importante pour ce projet. Les pointages pour les cinq options sont présentés au tableau suivant :

Résultats par Dimension	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable
Économique	4.2	4.4	2.6	2.2	2.6
Environnementale	2.5	3.1	2.8	3.2	3.2
Sociale	1.5	3.4	3.8	3.8	4.0
Technique	4.1	3.1	2.6	2.3	3.0

En fonction de la solution envisagée pour la suite du projet, des investissements particuliers et une stratégie rigoureuse d'entretien seraient nécessaires afin d'assurer une saine gestion de la piste en période hivernale.

1 Introduction

1.1 Mise en contexte du mandat

Les statistiques les plus récentes ressortent une hausse constante de l'utilisation du vélo en hiver dans la grande région de Montréal. D'autre part, la Société des Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée (PJCCI) a pour mission d'assurer aux usagers un passage sécuritaire par la gestion, l'entretien et la réfection des infrastructures, en optimisant la fluidité de la circulation et en respectant l'environnement. Ainsi, dans le but de répondre à la demande croissante de la pratique de vélo en hiver et d'explorer la possibilité d'ouverture de la piste multifonctionnelle pendant les périodes hivernales, PJCCI a mandaté Arup Canada Inc. afin d'effectuer les analyses nécessaires et identifier les enjeux potentiels reliés à l'ouverture hivernale de la piste multifonctionnelle.

Le présent mandat consiste, dans un premier temps, à analyser la faisabilité des opérations de déneigement mécanique de la piste ainsi que l'usage d'un système de chauffage afin de statuer sur les meilleures pratiques d'entretien hivernal adaptées au pont Jacques-Cartier. Lors de cette première étape, plusieurs enjeux reliés au contexte du pont Jacques-Cartier ou à la sécurité des usagers ont été identifiés. Un protocole d'essais de déneigement a été également établi. Dans une seconde étape, différents essais de déneigement mécanique de la piste multifonctionnelle ont été mis en pratique dans le cadre du projet pilote en vue de leur optimisation. De plus, des essais ont été effectués sur deux systèmes de chauffage identifiés lors de la première phase du mandat. À la lumière des résultats obtenus lors de différentes étapes du mandat, une planification stratégique et technique a été proposée pour l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle incluant diverses recommandations.

1.2 Portée du mandat et volets d'étude

Le mandat porte sur l'élaboration d'un projet pilote d'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier et comprend principalement les objectifs suivants :

- > Évaluer la performance et les impacts des méthodes conventionnelles de déneigement ;
- > Évaluer la performance de différents produits de déglaçage ainsi que leur impact sur la durabilité de la structure et sur l'environnement ;
- > Faire la revue de devis de déneigement actuel et fournir des recommandations en vue de son application sur la piste cyclable ;
- > Évaluer la faisabilité de mise en application d'un système de chauffage sur la piste et fournir l'assistance technique lors des essais de performance ;
- > Faire des recommandations par rapport aux nouvelles méthodes, produits et équipements d'entretien hivernal.
- > Analyser les différents enjeux pertinents à la mise en œuvre du projet et proposer des solutions concrètes ;

- > Développer des outils d'appui afin de guider l'équipe de PJCCI lors de la prise de décision.

Plusieurs études et analyses font partie de ce mandat afin de veiller à ce que tous les aspects reliés à l'entretien hivernal de la piste soient bien examinés et que tous les enjeux potentiels soient correctement adressés.

Les volets d'étude considérés en vue de la réalisation du présent mandat sont énumérés ci-dessous.

i) Niveau de service

Puisque l'objectif est de maximiser le niveau de service pour les usagers, il est important d'étudier l'achalandage potentiel de la piste en hiver. Afin d'ouvrir la piste le plus longtemps possible tant que les conditions climatiques le permettent, il faut aussi analyser l'impact des différents paramètres météorologiques sur le niveau de service ciblé.

ii) Opérations d'entretien hivernal conventionnel

L'utilisation des équipements de déneigement mécanique ainsi que différents protocoles d'intervention ont été abordés. La collecte de données, les résultats des essais de déneigement mécanique, leur optimisation et l'interprétation des résultats sont présentés dans la section 3 du présent rapport.

Dans le même contexte, une évaluation qualitative des produits de déglaçage a été faite vis-à-vis de leur efficacité de déglaçage (état de la surface), de la durabilité et de l'impact environnemental.

De plus, une analyse globale pour l'entretien hivernal du trottoir en aval du pont Jacques-Cartier a été réalisée.

À la lumière des données recueillies et des analyses effectuées, des recommandations par rapport aux opérations de déneigement mécaniques sont proposées. En outre, des ajouts et des changements au devis d'entretien hivernal sont présentés.

iii) Durabilité de la dalle en béton

Les différents effets des produits de déglaçage sur la durabilité de la dalle de la piste multifonctionnelle ont été étudiés dans la section 4 du présent rapport. Une analyse qualitative a été effectuée pour évaluer les effets nocifs de plusieurs produits de déglaçage selon leur composition. De plus, une analyse de durée de vie pour la dalle a été faite afin d'étudier l'impact du chlorure sur la dalle en béton armé.

iv) Environnement

L'impact environnemental des opérations de déneigement est abordé dans la section 5. Dans un premier temps, les exigences de règlementation fédérale et provinciale en vigueur par rapport au rejet de la neige dans le fleuve ont été prises en considération. Dans une seconde étape, l'impact du rejet de la neige vierge ou de la neige contaminée dans le fleuve a été évalué pour différents produits de déglaçage.

v) Système de chauffage

Dans la section 6 du présent rapport, une étude de marché sur la disponibilité et la convenance des systèmes chauffants a été effectuée. Des critères de performance ont été élaborés afin d'évaluer les systèmes de chauffage mis à l'essai sur le pont Jacques-Cartier dans le cadre du projet pilote. En outre, certains enjeux tel que la création d'un gradient thermique dans la dalle suite à l'installation du système de chauffage, ont été identifiés et analysés.

Pour les systèmes retenus dans le cadre du projet pilote, des essais de performance dans des conditions hivernales ont été réalisés. Les résultats obtenus ont été traités et des recommandations ont été proposées en conséquence.

vi) Sécurité

Plusieurs enjeux relatifs à la sécurité et au confort des usagers ainsi qu'à la réalisation des opérations de déneigement ont été identifiés lors de la mise en pratique du projet pilote. Des recommandations ciblant l'élimination de ces enjeux sont proposées à la section 7.

vii) Options d'opération hivernale

Plusieurs options d'opération hivernale pour une ouverture éventuelle de la piste multifonctionnelle sont discutées dans la section 8. Ceux-ci assureront le bon fonctionnement de la piste multifonctionnelle en fonction du niveau de service et du niveau de sécurité désiré.

Dans le même contexte, certaines propositions pour une meilleure gestion hivernale de la piste multifonctionnelle à long terme ont été présentées. Les avantages et les limitations de chaque solution sont adressés dans le cadre du présent mandat.

viii) Communication

Les besoins en communication et les différents moyens de communication entre PJCCI et les usagers sont adressés dans la section 9 du rapport pour répondre aux attentes de ces derniers. De plus, la communication interne entre les équipes d'Opération / Entretien, Ingénierie et Communication de PJCCI a été étudiée afin d'assurer un niveau de communication efficace et rapide.

ix) Estimation des coûts

Une estimation des différents coûts des travaux et des opérations est présentée dans la section 10. Les coûts relatifs à l'investissement de capital immédiat ainsi que les coûts d'opération sont déterminés pour les deux types de déneigement ; soit par déneigement mécanique et/ou par l'utilisation d'un système de chauffage.

x) Analyse préliminaire des risques

Une analyse préliminaire des risques a été effectuée afin d'identifier les risques majeurs relatifs à la décision de l'ouverture de la piste multifonctionnelle (voir section 10.6). De plus, d'autres enjeux et opportunités ont été listés afin d'étayer la prise de décision. Un plan d'action pour chaque risque a été proposé afin de l'atténuer ou voir l'éliminer.

xi) Analyse multicritère

Dans le but d'évaluer de manière compréhensive les options pour l'ouverture hivernale de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier, une analyse multicritère a été réalisée et présentée dans la section 12. En plus, cette analyse considère l'option « Statu Quo » mais également une « Option fondamentale à long terme » afin de porter un jugement judicieux par rapport à l'option la plus viable à mettre en place.

Cette analyse porte sur quatre dimensions principales (Sociale, Économique, Environnementale et Technique) et sert d'outil pour appuyer l'équipe de PJCCI lors du processus décisionnel.

1.3 Méthodologie

Les activités effectuées dans le cadre du présent mandat sont montrées sur la Figure 1.3-1 : Méthodologie ci-dessous et dans l'ordre suivant. Certaines activités ont été effectuées en parallèle afin de respecter l'échéancier du mandat.

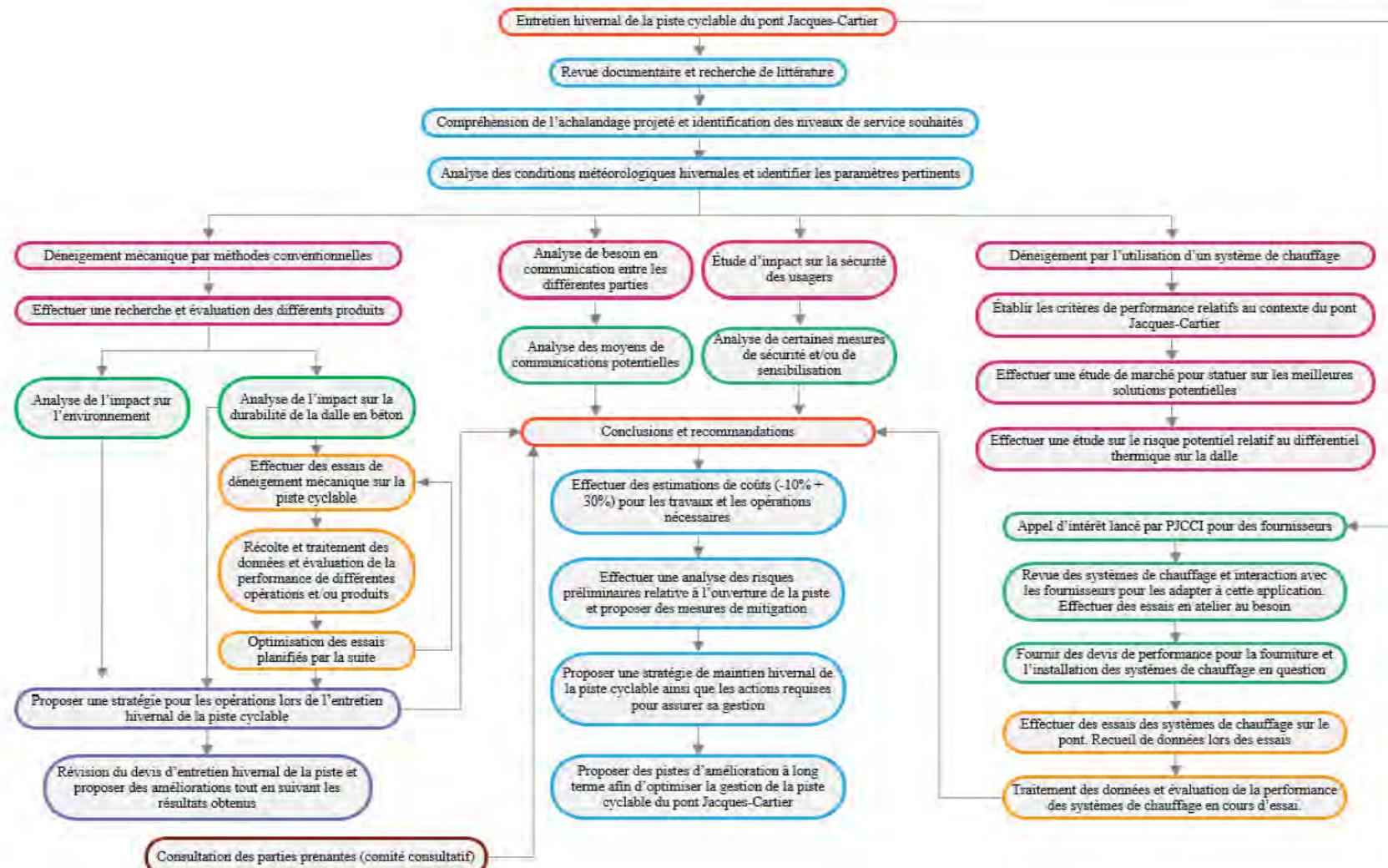


Figure 1.3-1 : Méthodologie adoptée lors du présent projet

1.4 Revue documentaire

Plusieurs intrants de la part de PJCCI et d'autres firmes ont été revus avant et pendant la réalisation du présent mandat. Ces documents sont énumérés dans le tableau suivant :

Tableau 1.4-1 : Revue documentaire

ID	Numéro du document	Numéro du contrat (et Auteur)	Titre du document	Résumé/conclusion	Pertinence
1	2954	62065 (CIMA+)	Analyse de viabilité hivernale de la piste cyclable du pont Jacques-Cartier	Ce rapport examine les divers aspects de l'ouverture de la piste multifonctionnelle le long de l'année avec une attention particulière à la période hivernale, en tenant compte de plusieurs études de cas ailleurs dans le monde et en créant un portrait et diagnostic de la piste. Par la suite, des recommandations ont été proposées.	Cet intrant sert de précédent pour le rapport d'étude préparatoire sur l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier, surtout lors de la planification des essais de déneigement mécanique.
2	n. d.	n. d. (Eco-Compteur)	Statistiques d'achalandage et données de comptage pour la piste multifonctionnelle	L'ensemble des données reçus comprend, entre autres, le nombre total et la moyenne journalière des passages/trajets faits à vélo et à pied ; Répartition des données par jour de semaine et par mois.	Cet intrant a servi à établir un portrait de l'achalandage estival des cyclistes et des piétons. Il a également été utilisé pour estimer l'achalandage hivernal sur la piste multifonctionnelle.
3	n. d.	62408 (Consortium Tetra Tech - Structura)	Étude de capacité portante adaptée de la piste cyclable du pont Jacques-Cartier Volume 1 - synthèse et recommandations	Les sections 1, 2, 3, 4, 6 et 7 de la piste cyclable du pont Jacques-Cartier ont la capacité requise pour résister aux poids des équipements de déneigement et au poids de neige accumulée. Par contre : - deux (2) poutres transversales dans la section 5 n'ont pas la capacité en flexion requise ; - une (1) poutre transversale dans la section 8 n'a pas la capacité en cisaillement requise ; - une (1) console en béton armé dans la section 9 n'a pas la capacité en torsion requise.	Cet intrant a servi à mieux définir l'étendue des travaux de déneigement sur la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier ainsi qu'à délimiter les zones d'essais (tant pour les produits de déglaçage que pour les systèmes de chauffage). Il a également été utilisé pour identifier le besoin de renforcement de la structure de la piste avant l'ouverture en hiver.
4	n. d.	60103 / 014256 (Groupeement SMDB)	Spécifications techniques pour le remplacement du tablier	Ce document établit les exigences et normes techniques à respecter pendant les travaux de remplacement du tablier.	Cet intrant a été pris en considération lors de l'étude de durabilité du tablier, surtout par rapport aux caractéristiques du béton.

ID	Numéro du document	Numéro du contrat	Titre du document (et Auteur)	Résumé/conclusion	Pertinence
5	n. d.	50015 (PJCCI)	Contrat de déneigement, épandage et fourniture de fondants et d'abrasifs	Ce document détaille, en profondeur, les conditions et modalités (telles que le prix du contrat, une description des travaux, la date d'achèvement, etc.) du contrat de déneigement octroyé à Location Benoit Inc.	La revue du devis d'entretien hivernal, ainsi que les diverses pistes d'améliorations considérées, sont basées sur cet intrant.
6	125543-03 ; rep-JC 2009	n. d. (PJCCI)	Périmètre de sécurité des aires de nidification du faucon pèlerin ; Inventaire des nids d'hirondelles à front blanc	Ce dessin sert à localiser les nichoirs actifs se trouvant à proximité du pont Jacques-Cartier et à définir un rayon de 50 à 100 mètres comme périmètre de sécurité ; Ce dessin offre un décompte approximatif des nids d'hirondelles se trouvant à proximité du pont Jacques-Cartier.	Ces intrants ont été pris en considération lors de l'étude environnementale, afin de tenir compte de l'impact potentiel de l'entretien hivernal sur la faune aviaire.
7	n. d.	n. d. (PJCCI)	Étude d'alternatives aux sels de déglaçage – annexe 5	Ce rapport effectue une comparaison entre les différents produits de déglaçage qui se présentent sur le marché comme des solutions de rechange aux sels de voirie conventionnels.	Cet intrant a servi de base à l'analyse de produits de déglaçage. Tous les produits ont fait l'objet d'une étude préliminaire et des essais pratiques comportant certains de ces produits ont été effectués sur le pont.
8	1486	60637 / GM-2985 (Groupe Séguin Experts-Conseils Inc.)	Étude de réaménagement de l'intersection cycliste d'accès au pavillon de l'île Sainte-Hélène	Ce rapport suggère l'apport de plusieurs modifications aux signalisations existantes à l'intersection au pavillon de l'île Sainte-Hélène.	Cet intrant a été considéré dans le volet « Sécurité », puisque la réduction de luminosité en hiver, les conditions météorologiques et les conditions de surface contribuent toutes à une réduction du niveau de sécurité à cette intersection.
9	n. d.	n. d. (PJCCI)	Photométrie de l'éclairage routier sans l'effet de mise en lumière	Ce dessin résume les mesures quantitatives des lumières émises à partir de la section 7 du pont Jacques-Cartier telles qu'elles sont perçues par l'œil humain.	Cet intrant a été considéré lors de l'évaluation du niveau d'éclairage sur la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier.
10	n. d.	n. d. (CIMA+)	Photos des fissures au-dessus du tablier de la piste cyclable	Ensemble des observations de fissures dans les dalles	Ces intrants font partie de l'analyse de durabilité.

ID	Numéro du document	Numéro du contrat	Titre du document (et Auteur)	Résumé/conclusion	Pertinence
11	125680-S06 à S09	60903 (Genivar)	Dessins des réparations et imperméabilisation du trottoir et de la piste cyclable	Réfection de la chaussée et de divers éléments connexes aux approches nord et sud du pont Jacques-Cartier.	Cet intrant a été utilisé lors de l'étude de durabilité et de la planification des essais dans le cadre du projet pilote.
12	125212-0M0001 Révision 05	60103 (Groupeement SMDB)	Plan de drainage	Plan de drainage dans le cadre du remplacement du tablier.	Cet intrant permet d'identifier les sections du pont où une accumulation d'eau serait probable et d'anticiper le ruissellement des eaux sur le pont. Le système de gestion de l'eau mis en place sur le pont affecte la durabilité de la dalle, l'environnement et l'efficacité des opérations de déneigement.
13	125212-020003 ; 125212-220042 à 220050	60103 (Groupeement SMDB)	Plans des dalles préfabriqués	Plans et coupes armature des glissières en béton	Cet intrant a été utilisé afin d'obtenir les dimensions requises et de mieux comprendre le système structural de la dalle en matière de durabilité, faisabilité du système de chauffage et de l'analyse relative aux différentiels thermiques suite à l'installation d'un système de chauffage.
14	2874	62408 / 28874TT (Consortium Tetra Tech - Structura)	Note/avis technique - Évaluation du garde-corps de la piste cyclable	Note de calcul visant à évaluer la capacité des ancrages, des poteaux et du garde-corps à subir la charge d'impact probable des véhicules d'entretien.	Cet intrant a été consulté pour information au début de ce mandat.
15	n. d.			Présentation portant sur les bonnes pratiques de conception et d'entretien des pistes cyclables en hiver.	Cet intrant a été consulté comme support pour l'analyse en matière de sécurité et de déneigement.
16	3023	62065 / M03567A-621 (CIMA+)	Évaluation de l'impact des chicanes sur la piste multifonctionnelle du Pont Jacques-Cartier	Qualification et quantification de l'impact des chicanes sur les vitesses et les comportements des cyclistes sur le pont.	Cet intrant a servi à prendre connaissance des autres études réalisées sur les chicanes dans un contexte de sécurité, comme l'aborde la section 7.

ID	Numéro du document	Numéro du contrat	Titre du document (et Auteur)	Résumé/conclusion	Pertinence
17	Révision 1	62536 (CIMA+)	Remplacement et renforcement des clôtures dissuasives, des garde-corps et autres travaux connexes (2017-2019)	Dessins et devis dans le cadre du projet de remplacement des clôtures dissuasives et des garde-corps.	Cet intrant a été tenu en compte pour l'installation potentielle d'un système de protection contre la chute de glace.
18	2990	60495098 (AECOM)	Inventaire de la biodiversité sur le territoire de la société (2016)	Inventaires de la flore et de la faune visant à décrire la biodiversité présente actuellement sur, et à proximité, des ponts Jacques-Cartier et Champlain, de l'Estacade du pont Champlain, du pont de contournement de l'île des Sœurs, des sections fédérales de l'autoroute Bonaventure et du pont Honoré-Mercier en plus du tunnel de Melocheville.	Ces intrants ont été pris en considération lors de l'étude environnementale, afin de tenir compte de l'impact potentiel de l'entretien hivernal sur la faune et la flore locales.
19	Version finale, révision 1	90016 (exp.)	Caractérisation de la pénétration du sel de voirie dans le sol et les éléments du pont	Programme d'échantillonnage visant à caractériser la pénétration des sels de déglaçage sur certaines structures et dans les sols adjacents au pont Jacques-Cartier.	Cet intrant a servi à mieux comprendre l'étendue de la salinisation des sols suite à l'épandage des sels de voirie.
20	Révision A	62537	Études, dessins et devis pour la séparation de la circulation des piétons et des cyclistes sur le pont et aux approches (2016-2017)	Étude préparatoire de conception relative à la planification des travaux de séparation des voies de circulation, des piétons et des cyclistes sur le pont Jacques-Cartier et ses approches.	Cet intrant a permis de prendre connaissance du chemin de détour pour l'accès des piétons au pont Jacques-Cartier et d'effectuer des études en fonction de cette proposition.

1.5 Termes et définitions

Critères de conception Formulations quantitatives qui décrivent les conditions à remplir pour chaque état limite.

Durabilité La capacité d'une structure ou de l'un de ses composants à exécuter ses fonctions requises dans son environnement de service sur une période de temps sans coûts imprévus pour l'entretien ou réparation.

Durée de vie de conception La durée de vie de conception est spécifiée par le concepteur conformément aux attentes (ou exigences) des propriétaires de la structure.

Durée de vie utile prévue	La prévision de la durée de vie utile selon les performances enregistrées, passées, testées ou modélisées
Durée de vie utile	Période de temps pendant laquelle le bâtiment ou composant fonctionne sans coûts imprévus ou perturbation de l'entretien et des réparations.
Fiabilité	Capacité d'une structure ou d'un élément structural à répondre aux exigences spécifiées, y compris la durée de vie de conception, pour lequel il a été conçu. La fiabilité est généralement exprimée en termes probabilistes.
Glissance	État d'une surface, en particulier d'une chaussée, présentant un très faible coefficient de frottement.
	Note : La fiabilité couvre la sécurité, la facilité d'entretien, et la durabilité d'une structure.

2 Contexte local

Cette section vise à établir le contexte local, en offrant une description du pont Jacques-Cartier dans sa globalité ainsi qu'une description de la piste multifonctionnelle et du trottoir. Le potentiel d'achalandage hivernal pour piétons et pour cyclistes a aussi été analysé, ce qui permettra de mieux cibler le niveau de service souhaité selon les conditions météorologiques locales. Enfin, la problématique d'une variation météorologique, plus particulièrement dans le cadre du pont Jacques-Cartier, sera abordée.

2.1 Description du pont Jacques-Cartier

Le pont Jacques-Cartier, doté de cinq voies routières, d'une piste multifonctionnelle et d'un trottoir à l'usage exclusif des piétons, enjambe le fleuve Saint-Laurent et la voie maritime sur une distance de 2 725 mètres, reliant ainsi l'île de Montréal, l'île Sainte-Hélène et la Rive-Sud. Il constitue un lien important entre la ville de Montréal et celle de Longueuil, comme l'attestent des milliers d'utilisateurs qui empruntent le pont chaque jour pour réaliser leurs divers trajets, qu'ils soient utilitaires ou pour le loisir. Le pont, lui-même, se compose de plusieurs sections, avec notamment :

- > Les sections 8 et 9 sur l'île de Montréal ;
- > La section 7, qui se distingue par sa superstructure emblématique, au-dessus du fleuve Saint-Laurent ;
- > Les sections 6 et 5 sur l'île Sainte-Hélène ;
- > La section 4 qui relie l'île Sainte-Hélène avec l'île Notre-Dame ;
- > La section 3, au-dessus de la voie maritime du Saint-Laurent, et finalement ;
- > Les sections 1 et 2 à Longueuil.

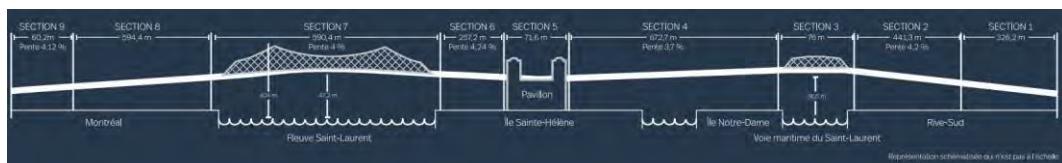
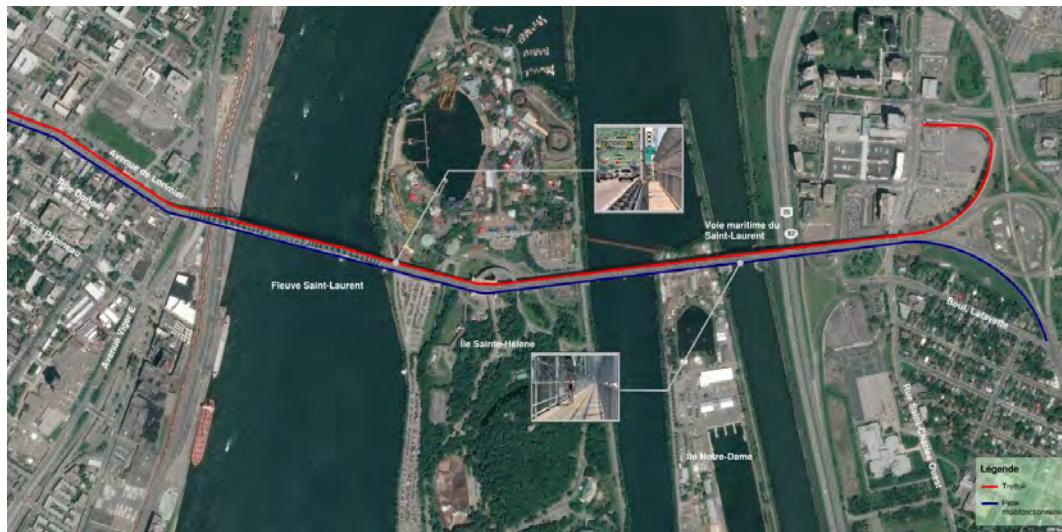
Figure 2.1-1 : Représentation schématisée du profil du pont (pas à l'échelle)¹

Figure 2.1-2 : Plan du pont Jacques-Cartier

La piste multifonctionnelle possède en moyenne une largeur de 2,5 mètres et demeure ouverte aux piétons, vélos et scooters électriques. La piste devient moins large à certains endroits, par exemple, près des structures de super-signification ou des lampadaires. Du côté de Montréal, le point d'accès à la piste multifonctionnelle se trouve à l'intersection de la rue des Confiseurs et de la rue Dorion. Du côté de Longueuil, l'accès à la piste s'effectue à l'intersection du boulevard La Fayette et du boulevard Taschereau.

La largeur du trottoir, quant à elle, mesure 1,25 mètre, et le trottoir ne peut être emprunté que par des piétons suite à la signalisation sur place. À Longueuil, la rue Saint-Charles Ouest donne accès au pont Jacques-Cartier et à Montréal le trottoir rejoint l'avenue de Lorimier.

2.2 Potentiel d'achalandage hivernal - Cyclistes

Depuis la fin avril 2015, PJCCI a installé un compteur de piétons et cyclistes sur la piste multifonctionnelle. Les données récoltées² permettent d'évaluer la répartition du trafic au cours des journées, semaines et mois.

¹ Les Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée, Fiche technique du pont Jacques-Cartier

² Source : <https://www.eco-visio.net>

2.2.1 Profil journalier et hebdomadaire

Le profil du trafic cycliste sur la piste multifonctionnelle est de type pendulaire, comme montré sur la Figure 2.2-1 : une majorité (50% à 70%) de cyclistes utilisent le pont aux heures de pointe du matin et du soir afin de se rendre sur leur lieu de travail. Le trafic est majoritairement unidirectionnel : entre 65% et 70% du trafic se fait en direction de Montréal le matin (entre 6h00 et 9h30) et en direction de Longueuil le soir (entre 16h00 et 18h30).

Notes générales sur les données de comptage

Le compteur est installé à l'extrémité nord du pont Jacques-Cartier, côté Montréal. Il inclut donc les trajets Montréal – Ile Sainte-Hélène et Jean Drapeau. Les graphiques montrés ci-après montrent le nombre de passages (sauf indication contraire) : un cycliste faisant l'aller-retour Montréal-Longueuil dans la journée sera donc compté deux fois (sauf dans le graphique de flux, séparé par direction).

La période analysée est 2016, car les comptages de 2017 sont incomplets à cause d'une défectuosité du compteur au cours de l'été 2017.

Les graphiques montrent uniquement la période du 1^{er} avril 2016 au 31 octobre 2016.

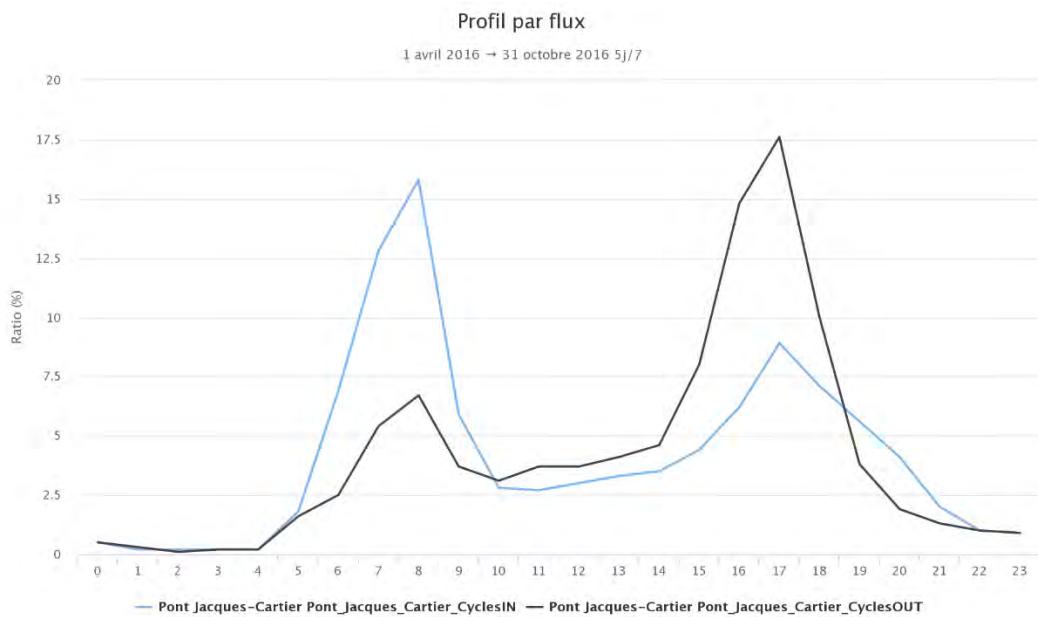


Figure 2.2-1 : Profil horaire directionnel sur la semaine de 5 jours

Notes

Unité : % de passages dans une direction par heure. 100% au total des passages sur une journée dans une direction. Moyenne sur la période indiquée.

En bleu est représenté le nombre de passages relatifs de cyclistes en direction Montréal, « IN » (pic du matin).

En noir est représenté le nombre de passages relatifs de cyclistes en direction Longueuil, « OUT » (pic du soir).

Malgré le caractère pendulaire du trafic en semaine, une certaine proportion (entre 20% et 25%) de cyclistes utilise la piste en fin de semaine, comme montrée sur la Figure 2.2-2. Ces déplacements majoritairement de loisir, entraînement cycliste, promenade, magasinage, et autres loisirs sont en général répartis sur la journée entière, dans les deux directions et se font majoritairement entre Montréal et les îles. Ce type de trafic sera très réduit en hiver, car le circuit Gilles Villeneuve (piste d'entraînement pour les cyclistes) est fermé.

Selon les données de 2016, nous comptons, en moyenne sur la période analysée :

- > 100 passages par heure, en moyenne, entre 6h00 et 20h00 ;
- > Jusqu'à 250 et 350 passages par heure au maximum aux heures de pointe du matin et soir respectivement ;
- > 75 passages par heure au creux de la journée entre 10h00 et 15h00 en semaine ; et
- > 125 passages par heure en moyenne entre 11h et 18h durant la fin de semaine.

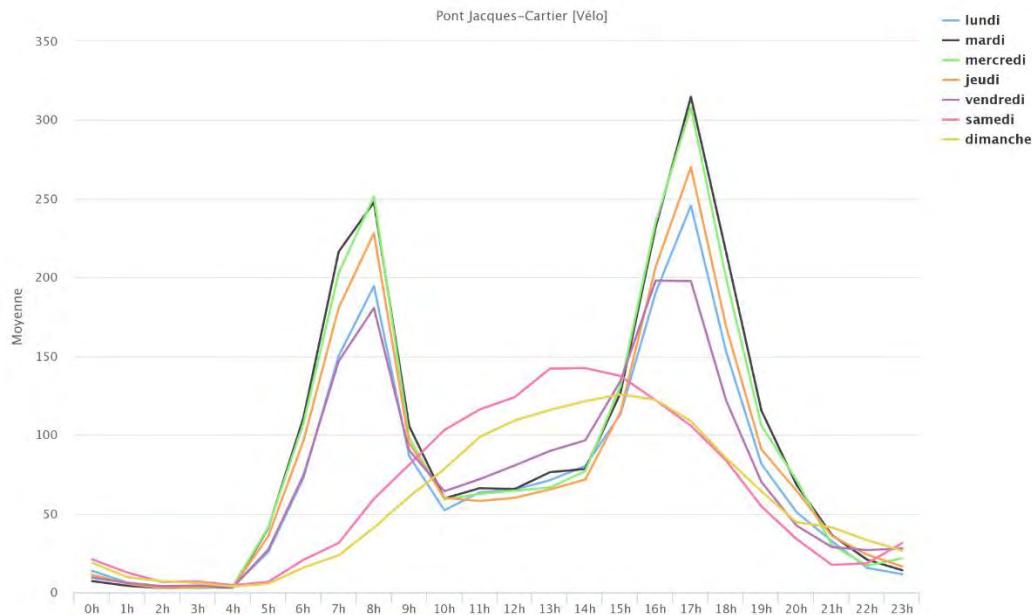


Figure 2.2-2 : Profil horaire sur les 7 jours de la semaine - nombre de passages cumulés dans les 2 directions, par heure - moyenne sur la période analysée (avril à octobre inclus, 2016)

2.2.2 Variation du trafic au cours des saisons

La piste multifonctionnelle étant actuellement fermée en hiver, il est difficile de prédire son achalandage. Un certain nombre de paramètres peuvent influencer cette prédition et notamment les spécificités du pont Jacques-Cartier adressées à la Section 2.2.3.

Selon les données de 2016, il y a en moyenne 1825 passages de cyclistes par jour (entre le 1^{er} avril et le 31 octobre). Ce chiffre varie fortement d'une journée à l'autre et au fil des mois, comme le montre la Figure 2.2-3, avec une pointe à 3640 en juillet 2016.

Il faut aussi noter que cette variabilité se retrouve également d'une année à l'autre : en 2015 la moyenne était de 1910 passages par jours (sur la même période) bien que le nombre total de passages soit demeuré constant aux alentours de 400 000 passages, sur la période analysée (avril à octobre 2016).

La variabilité de l'achalandage est principalement causée par les conditions météorologiques ; et plus particulièrement la température, comme indiqué sur la Figure 2.2-3. En effet, une bonne corrélation est visible entre l'achalandage et la température maximale enregistrée sur une journée (écart type $R^2 = 0.7367$).

Par contre, l'achalandage semble beaucoup moins corrélé aux précipitations journalières (voir Figure 2.2-4). La corrélation serait potentiellement plus forte si l'on étudiait les passages par heure.

Toutefois d'autres facteurs peuvent aussi expliquer ce manque de corrélation avec les précipitations :

- > La variabilité géographique des précipitations (reportées ici de l'aéroport Trudeau) ;
- > La durée des précipitations : en effet, les averses ou orages en été sont généralement forts, mais de courte durée. Les cyclistes peuvent alors décaler leur trajet afin d'éviter les précipitations ;
- > La fiabilité prévisionnelle : les prévisions de précipitations sont généralement peu fiables, à l'inverse des températures journalières très précises, ce qui pourrait diminuer l'intérêt des cyclistes à se fier à celles-ci.

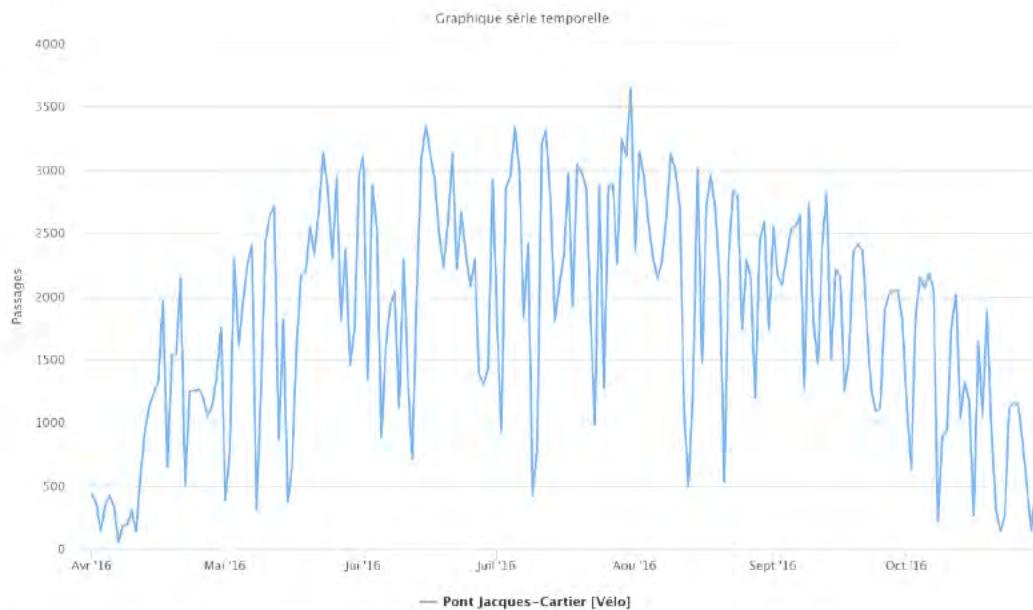


Figure 2.2-3 : Profil saisonnier, nombre de passages cyclistes, par jour – 2016

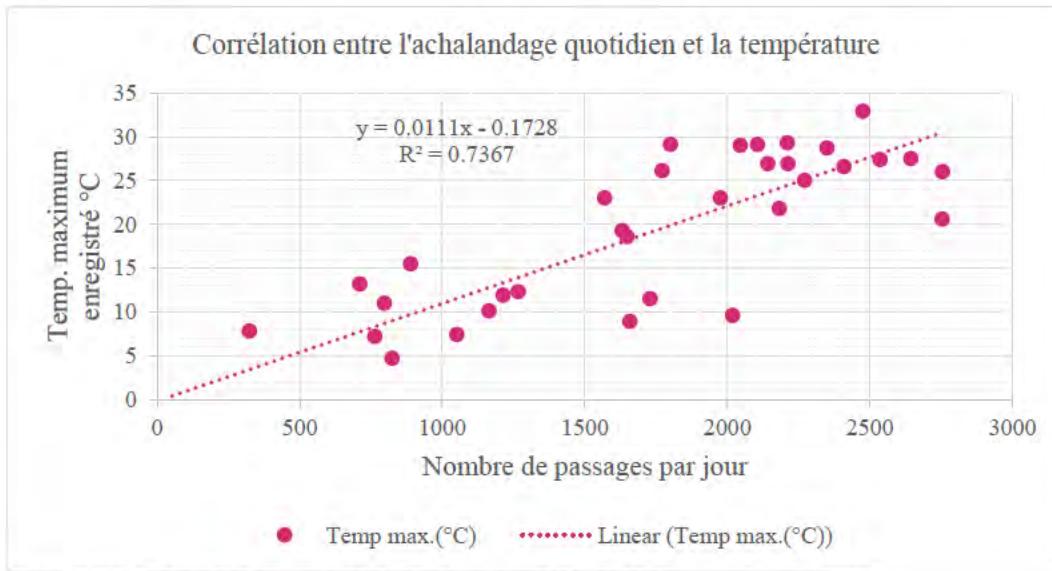


Figure 2.2-4 : Corrélation entre l'achalandage quotidien et la température – 2016

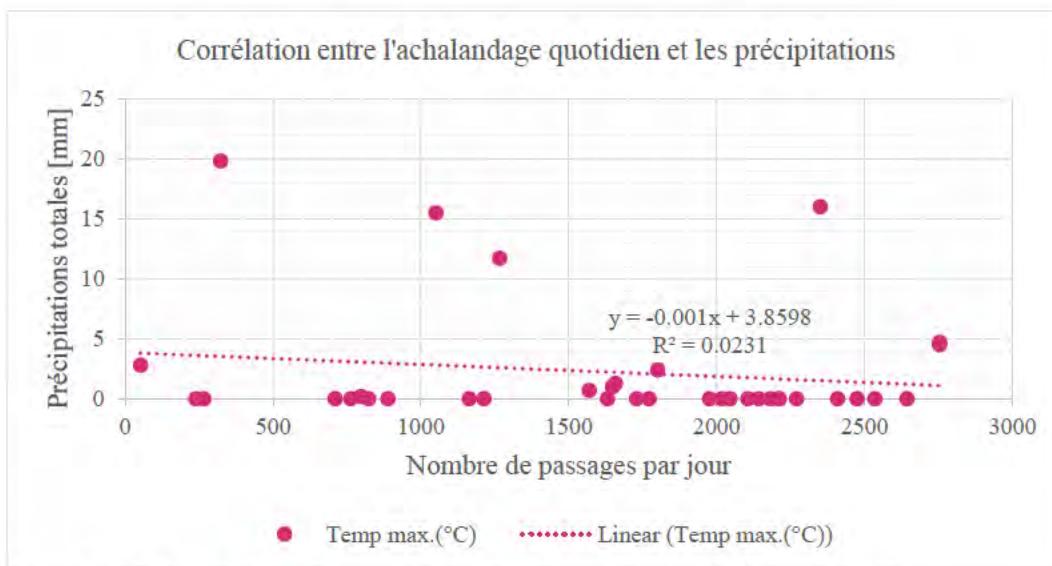


Figure 2.2-5 : Corrélation entre l'achalandage quotidien et les précipitations – 2016

Notes

Les données météorologiques sont fournies par Environnement Canada³, par jour, au niveau de l'aéroport Trudeau, et toujours sur la même période.

2.2.3 Extrapolation hivernale

Selon le rapport 2016 de CIMA+⁴, l'achalandage hivernal potentiel a été évalué à 7% de l'achalandage estival. Ces projections sont basées sur les données de la Ville de Montréal sur certaines pistes seulement (Côte Ste-Catherine, Maisonneuve 1 et 2, du Parc, Pierre-Dupuy et Rachel) entre 2011 et 2013.

Afin de mieux comparer les chiffres fournis précédemment, l'exercice a été refait, uniquement sur l'année 2016 et sur un plus grand nombre de compteurs de la ville de Montréal⁵.

³ <http://climat.meteo.gc.ca>

⁴ Analyse de Viabilité hivernale de la piste multifonctionnelles du pont Jacques-Cartier, novembre 2016

⁵ <http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/velos-comptage>

Tableau 2.2-1 : Achalandage saisonnier sur certaines pistes du réseau de Montréal

	12 mois	Été (*)	Hiver (**)	Ratio	Réseau blanc
Berri1	2701	4157	652	16%	Oui
Boyer	2015	3262	259	8%	Non
Brébeuf	2449	4003	261	7%	Non
CSC (Côte Sainte-Catherine)	1354	2176	317	15%	Probablement oui
Maisonneuve_2	3655	5027	912	18%	Oui
Maisonneuve_3	998	1521	262	17%	Oui
Notre-Dame	1040	1667	157	9%	Non
Parc	1713	2596	471	18%	Oui
Pier Dupuy	1004	1659	80	5%	Non
Pont Jacques-Cartier	1350	2173	191	9%	Non (***)
Rachel / Papineau	2215	3399	549	16%	Oui
René-Lévesque	1381	2128	328	15%	Oui
Saint-Antoine	326	502	78	15%	Oui
Saint-Urbain	1033	1580	263	17%	Oui
Totem Laurier	2075	3164	541	17%	Oui
Université	1804	2774	440	16%	Probablement oui
Viger	278	426	70	16%	Oui
Compteur PJCCI J.-Cartier		1825			Cyclistes uniquement
Moyenne (réseau blanc)				16.6%	Réseau blanc uniquement
Extrapolation J.-Cartier			302		Cyclistes uniquement

(*) Été : 7 mois du 1^{er} avril au 31 octobre 2016,

(**) Hiver : 5 mois du 1^{er} janvier au 31 mars 2016, et du 1^{er} novembre au 31 décembre 2016

Ratio hivernal = passages cyclistes sur les 5 mois d'hiver / passages cyclistes sur les 7 mois d'été

(***) Les chiffres fournis ici comprennent les passages de piétons, ceux-ci ne sont pas analysés ici ; et la période analysée est différente que celle de la fermeture officielle de la piste en 2016, d'où la présence d'usagers en hiver.

Une tendance nette se dégage entre les pistes du « réseau blanc », c'est-à-dire ouvert en hiver, où le ratio hivernal varie entre 15% et 18% ; et les pistes « fermées » en hiver, où le ratio hivernal varie entre 5% et 9%. Le réseau blanc est présenté à la Figure 2.2-6.



Figure 2.2-6 : Réseau blanc de Montréal en 2010⁶

Notes

La carte du réseau 4 saisons (été et hiver) a été mise à jour en 2017, mais l'information est présentée ici plus clairement pour la partie « réseau blanc uniquement »

Un ratio moyen de 16.6% se dégage alors si on considère uniquement le réseau blanc. Par extrapolation, avec en moyenne 1825 passages cyclistes par jour en été (chiffres du 1^{er} avril au 31 octobre 2016) sur la piste, l'achalandage quotidien devrait atteindre en moyenne 302 passages en hiver (de novembre à mars).

⁶ http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/TRANSPORT_FR/MEDIA/DOCUMENTS/R%C9SEAU%20BLANC%202010.PDF

Il faut toutefois noter que ces chiffres s'appliquent pour une ouverture sept jours par semaine. Dans le cas d'une ouverture uniquement du lundi au vendredi, il y avait en moyenne 1988 passages par jour, entre le 1^{er} avril et le 31 octobre 2016. Supposant toujours un achalandage identique à celui du réseau blanc (ratio de 16.6%), il y aurait en moyenne 330 passages par jour, du lundi au vendredi uniquement. Avec une fermeture de la piste en fin de semaine, l'achalandage serait alors nul ces deux jours. Donc en moyenne sur la semaine de sept jours, il y aurait 236 passages (*) par jour sur l'hiver (de novembre à mars inclus).

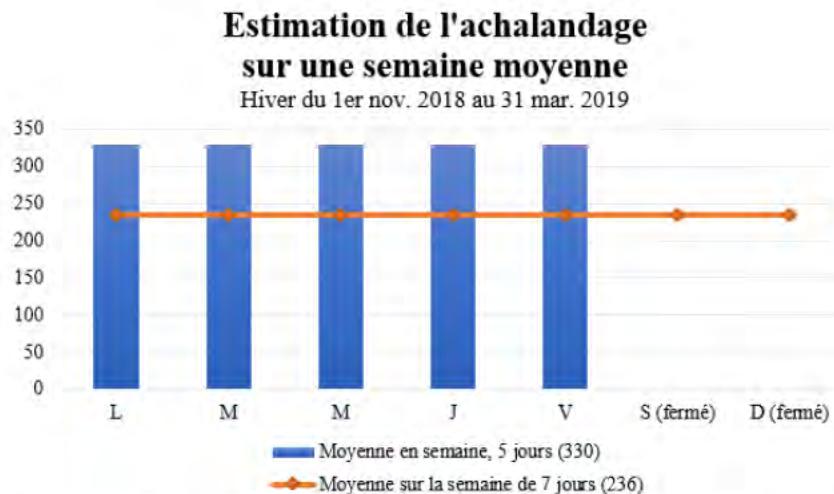


Figure 2.2-7 : Estimation de l'achalandage sur une semaine avec fermeture en fin de semaine

(*) Hypothèses non considérées :

- > Augmentation annuelle du nombre de cyclistes (inflation)
- > Achalandage « récréatif » en semaine plus faible en hiver
- > Fermetures pour déneigement
- > Variabilité annuelle de la météorologie (hiver rigoureux ou non) : basée sur les chiffres de l'année 2016
- > Autres particularités du pont J-Cartier, voir rapport section 2.2.4.

Ce ratio d'achalandage hivernal est confirmé par les données les plus récentes annoncées par Vélo Québec, elles-mêmes basées sur les valeurs d'Eco-Compteur (voir la Figure 2.2-8). Il faut noter que la valeur de 13% n'utilise probablement pas les mêmes hypothèses que celles utilisées lors de la présente étude ; et ces valeurs sont comptées sur l'ensemble du réseau et non uniquement sur la portion « Réseau blanc ». Néanmoins, la tendance à la hausse de l'achalandage hivernale se confirme.

VÉLO D'HIVER

LA NEIGE ET LE FROID EXTRÊME
N'ARRÈTENT PAS LES CYCLISTES D'HIVER!

13% des cyclistes font du vélo été
comme hiver, contre 6% en 2009



65%

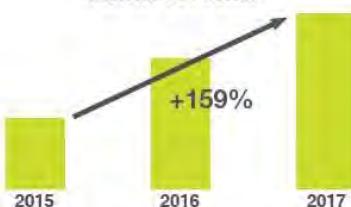
des cyclistes d'hiver ont
pédalé le jour le plus froid
de l'hiver dernier (-24°C)



>70%

des cyclistes d'hiver ont
pédalé lors de la plus grande
tempête de neige de l'année

Nombre de cyclistes au mois de Janvier et Février



Source: Ville de Montréal/Eco-Compteur:
avg: Berri, Parc, Rachel & Maisonneuve (2016-2017)

Figure 2.2-8 : Données Eco-compteur pour la Ville de Montréal, 2017

2.2.4 Spécificités du pont Jacques-Cartier

Malgré ces prévisions de nombreux paramètres liés aux spécificités du pont pourraient influencer le nombre réel de passages, à la hausse (+), ou à la baisse (-) :

- > **Un pont urbain** : le pont Jacques-Cartier est un lien majeur au cœur de Montréal, contrairement, par exemple, au pont Champlain qui est un lien périurbain. Un pont urbain partage certaines caractéristiques du trafic de la ville : la population dense qui l'entoure est davantage tournée vers la mobilité douce (déplacements piétons et cyclistes). (+)
- > **Un lien unique** : s'il était ouvert aux cyclistes en hiver, le pont Jacques-Cartier serait alors le seul lien cyclable entre la Rive Sud et l'île de Montréal. Il pourrait théoriquement drainer plus de trafic cycliste qu'en été lorsque l'Estacade du pont Champlain, le pont de la Concorde et le pont Victoria offrent une alternative. (+)
- > **Un profil pendulaire** : tel que discuté précédemment, la majorité des cyclistes du pont l'utilisent pour se rendre sur leur lieu de travail. Ils auront ainsi tendance à vouloir utiliser le pont davantage en hiver, contrairement aux trajets « récréatifs » qui sont plus sensibles à la température. (+)

- > **Restrictions de la STM :** aux heures de pointe, les vélos ne sont pas autorisés à bord du métro. Il n'y a alors pas d'alternative pour les cyclistes en hiver qui souhaiterait faire une partie de leur trajet en transport en commun. (+)
- > **Géométrie difficile :** la longueur, la pente et l'étroitesse de la piste multifonctionnelle peuvent facilement décourager les cyclistes potentiels ; et d'autant plus en hiver. (-)
- > **Exposition aux conditions météorologiques :** contrairement aux pistes cyclables en pleine ville, la piste du pont est très exposée aux intempéries et au vent. Ceci pourrait décourager certains cyclistes. (-)
- > **Achalandage « récréatif » :** déjà minoritaires en semaine, les trajets « récréatifs » sur le pont Jacques-Cartier devraient être négligeables en hiver : fermeture du parc Jean-Drapeau, de la Ronde, et du circuit d'entraînement Gilles Villeneuve. De la même manière, le pont Jacques-Cartier n'est pas une piste multifonctionnelle de « proximité » qui accueille les trajets courts à vélo (épicerie, loisirs du soir, etc.). Ainsi le trafic cycliste en fin de semaine devrait être extrêmement réduit et limité à ceux qui travaillent pendant cette période. (-)

2.2.5 Cyclisme en hausse à Montréal

Le trafic cycliste augmente chaque année de 7% à 13,5% selon les Vélo Québec et Bixi⁷ et la tendance s'accélère.

Les récentes annonces politiques autant municipales que provinciales démontrent un engagement croissant vers le financement des infrastructures cyclables. Ces annonces pourraient faire accélérer la tendance.

Malgré un achalandage en hiver relativement faible (240 passages par jour prévus sur le pont Jacques-Cartier), le trafic cycliste hivernal connaît une croissance significative ces dernières années :

« En 2015 Montréal comptait 105 % plus de cyclistes d'hiver par rapport à 2014. »⁸

« Le nombre de cyclistes qui roulent sur ces pistes durant les mois de janvier et février a bondi de 159 % entre les années 2015 et 2017, indique le document. »⁹

« La proportion des cyclistes qui roulent été comme hiver a doublé depuis l'année 2009, passant de 6 à 13 % des adeptes du vélo. »⁹

⁷ <https://www.ledevoir.com/societe/transport-urbanisme/525325/coup-d-oeil-dans-le-retroviseur-pour-bixi> ; <https://www.ledevoir.com/societe/472272/velo-quebec-plus-de-cyclistes-moins-de-blesses>

⁸ http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=8957,99637667&_dad=portal&_schema=PORTAL

⁹ <https://www.ledevoir.com/societe/518634/le-velo-d-hiver-progresse-a-montreal>

2.2.6 Conclusions

Compte tenu de ces observations, il est raisonnable de prévoir un trafic cycliste d'environ 240 passages par jour (piste fermée en fin de semaine), en moyenne sur la période du 1er décembre au 31 mars, sachant qu'une augmentation significative est anticipée.

Il faut aussi noter que le nombre de passages sera directement proportionnel au niveau de service de la piste multifonctionnelle. Les chiffres fournis ici supposent un niveau de service maximal, c'est-à-dire que le pont est ouvert en tout temps ou au moins entre 5h et 22h (voir la Section 8 pour les différentes options d'opération hivernale envisagées).

De plus, en cas d'ouverture hivernale, les horaires sélectionnés pourraient avoir un impact indirect sur le nombre de passages : des horaires trop réduits, variables ou parfois imprévisibles pourraient décourager certains usagers et réduire davantage l'achalandage. L'inverse est aussi vrai.

En cas d'ouverture, il serait ainsi pertinent de faire le suivi pour confirmer l'achalandage réel sur le pont en hiver suite à son ouverture potentielle, et réévaluer la tendance en conséquence.

Dans un but communicatif, il serait aussi pertinent d'installer un panneau pour l'affichage dynamique du comptage des usagers, à l'entrée du pont côté Montréal, là où l'espace le permet.

Un certain nombre de recommandations fournies dans ce rapport suppose un achalandage de 240 passages par jour en moyenne en hiver (piste fermée en fin de semaine), et jusqu'à 2500 passages par jour en moyenne en juillet et août. Cependant, si ces valeurs venaient à changer drastiquement, la réévaluation de certaines hypothèses serait préférable.



Image 2.2-9 : Compteur éco-totem® utilisé sur la piste multifonctionnelle de l'avenue Laurier

2.3 Potentiel d'achalandage hivernal - Piétons

2.3.1 Utilisation du trottoir (côté aval)

En aval du pont, le trottoir est destiné aux piétons et pourrait être ouvert en hiver. Une piste multifonctionnelle fermée aux piétons qui emprunteraient alors le trottoir constituerait une des options d'exploitation envisageables. Ainsi, la séparation des usagers permettrait notamment d'agrandir la largeur libre pour les cyclistes sur la piste multifonctionnelle, en amont. Cependant, il faudra prendre en considération des mesures nécessaires afin d'assurer le respect d'une telle séparation par les usagers (signalisation ou autre). La problématique liée au déneigement du trottoir est traitée séparément en Section 3.9.

Le trottoir offre actuellement une largeur de 1250 mm (mesurée à la Section 6). Cependant la largeur adéquate selon les normes du Ministère des Transports pour les nouvelles constructions : Tome II – Trottoirs - 6.3.1 :

- > *La largeur des trottoirs doit tenir compte du débit de piétons prévu, en prenant en considération les conditions particulières existant près des écoles, des bureaux, des usines et des centres commerciaux. Une largeur de 1,5 m est considérée comme étant un minimum.*

Bien que cette valeur soit recommandée pour les nouvelles constructions, elle a été définie pour permettre le croisement des usagers à mobilité réduite et des poussettes pour enfants (70 cm de large). En cas de croisement de deux de ces usagers (probabilité très faible) sur le trottoir du pont alors l'un des usagers devra faire demi-tour jusqu'à une zone plus large qui permet le croisement (fins des sections 3 et 7, belvédère, pavillon de l'île Sainte-Hélène et extrémités du pont).

Au-delà de cette problématique, un enjeu majeur de l'ouverture du trottoir est le respect de la signalisation pour les piétons. En effet, il sera difficile d'empêcher l'accès aux piétons sur la piste multifonctionnelle et de les obliger à faire un détour et passer sur le trottoir uniquement, côté aval (voir le chemin de détour pour l'accès des piétons au pont Jacques-Cartier proposé dans le cadre du contrat 62537).

Malgré tous ces enjeux, il faut souligner que les prévisions de trafic piétonnier en hiver sont très faibles tel que montré dans la section suivante.

2.3.2 Trafic piéton attendu

Le trafic piéton sur la piste multifonctionnelle est bien plus faible que le trafic cycliste. Alors que l'on comptait environ 400 000 passages cyclistes sur la période d'avril à octobre 2016, c'est seulement 75 000 passages de piétons, soit 16% du trafic.

La Figure 2.3-1 montre qu'en été le nombre de piétons augmente sensiblement en fin de semaine (environ 220 passages par jour en semaine, contre 360 passages en fin de semaine). Et la Figure 2.3-2 montre qu'il y a autant de trajets fait en direction Longueuil qu'en direction Montréal.

Étant donné le manque de statistiques sur l'achalandage hivernal piétonnier, il est délicat d'estimer le nombre de passages quotidiens prévus sur le pont en hiver. En appliquant le ratio de 17% calculé précédemment (trafic cycliste principalement pendulaire), nous pouvons prévoir environ 44 passages piétons par jour, en hiver. À cause des spécificités du pont Jacques-Cartier, il est très probable que ce chiffre soit surestimé, notamment durant les tempêtes de neiges. Les piétons ne représentent de ce fait pas les usagers principaux de la piste multifonctionnelle en période hivernale.

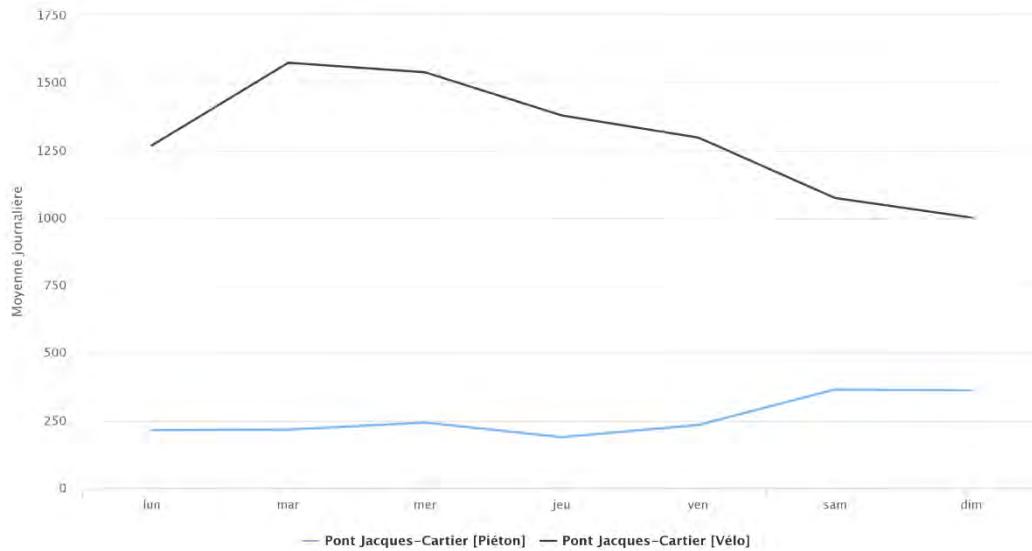


Figure 2.3-1 : Profils hebdomadaires piéton et cycliste - 2016

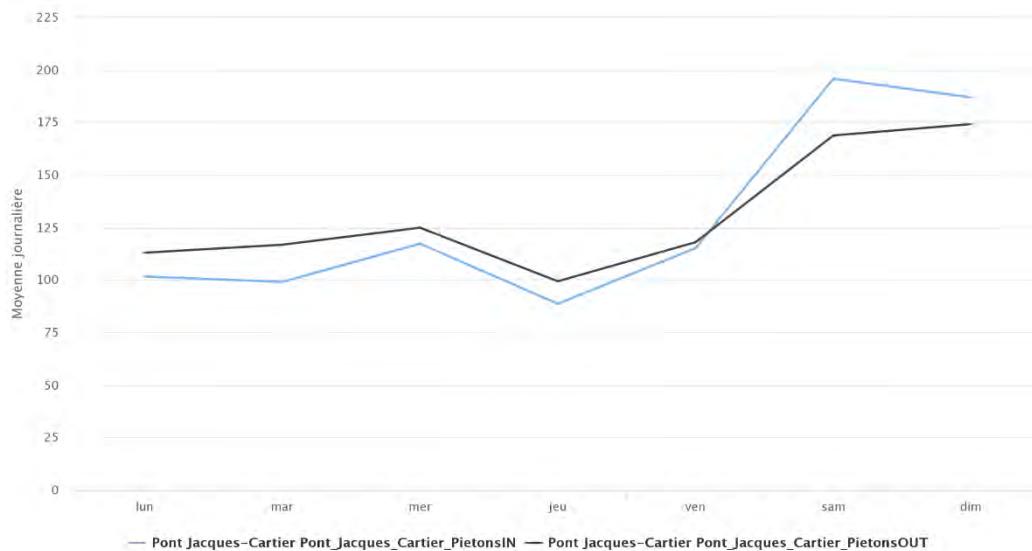


Figure 2.3-2 : Profil hebdomadaire en direction Montréal (IN) et direction Longueuil (OUT)

2.3.3 Confort et tourisme

Finalement, il faut noter que le trottoir est orienté vers le nord et voit très peu de soleil. Ces conditions difficiles ne sont pas idéales pour le confort des piétons qui empruntent généralement le pont comme activité récréative.

Contrairement à la piste multifonctionnelle, qui elle est orientée vers le sud, le trottoir n'offre pas une vue panoramique. Bien que le tourisme local ou international soit fort limité en hiver, c'est une dimension importante du pont Jacques-Cartier et un élément à considérer dans la prise de décision.

2.4 Variation des conditions météorologiques

L'entretien hivernal des surfaces consiste généralement à minimiser l'accumulation de la neige et à maximiser l'adhérence de la surface de roulement. Pour cela, il est nécessaire de combiner l'information météorologique aux conditions particulières des voies de circulation et de passage.

Néanmoins, disposer de prévisions météorologiques fiables peut s'avérer difficile : les événements météorologiques sont généralement instables ce qui aboutit à des écarts entre les prévisions et la réalité. Par exemple, le type de précipitation est difficile à prévoir lorsque la température de l'air est proche de 0 °C, la neige pouvant se changer facilement en pluie ou en grésil. Aussi, les situations de verglas comportent des phénomènes transitoires pour lesquels les différents types de précipitation peuvent se succéder les uns aux autres sans vraiment permettre au météorologue de connaître avec précision les quantités.

Il est également important de noter que les prévisions météorologiques ne correspondent pas toujours au microclimat pour lequel l'information est recherchée. Les conditions de température, d'humidité, de vent ou de précipitation risquent d'être différentes au sein d'une même région.

Pour ces raisons, il est primordial de privilégier une approche de gestion de risque plutôt que de se fier directement aux valeurs données sur un bulletin de prévision météorologique. L'analyse des risques intégrera les caractéristiques les plus importantes du microclimat qui fait l'objet d'intérêt ce qui permettra d'anticiper l'accentuation ou l'atténuation des différents paramètres correspondants du bulletin de prévision. L'acquisition de données d'observation, en installant une station météorologique à proximité, donne également la possibilité d'ajuster les différents seuils de gestion des risques, et aidera également à mieux documenter les événements météorologiques lors de la mise en œuvre de l'entretien hivernal de la piste.

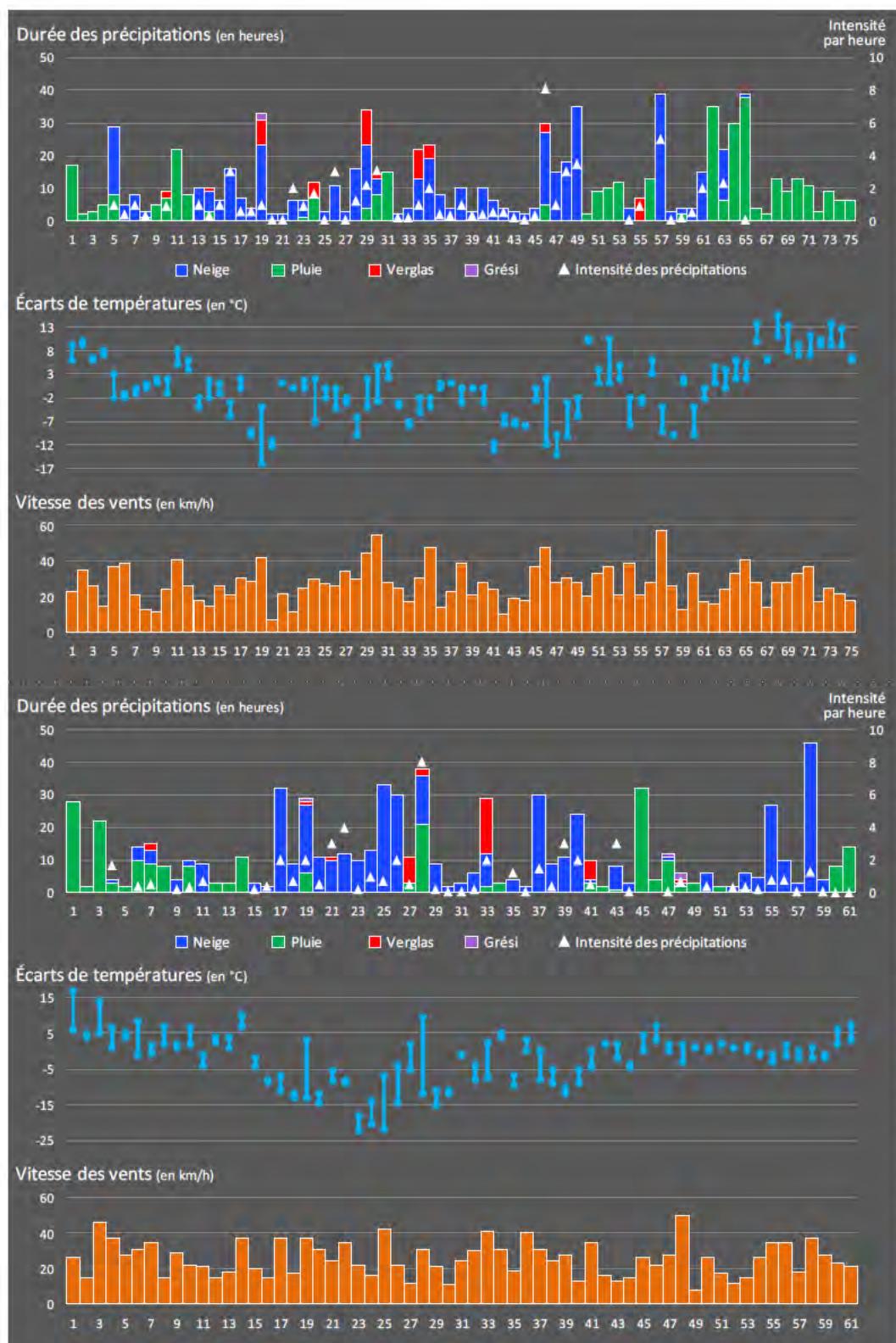


Image 2.4-1 : Comparaison des paramètres météorologiques des hivers 2016-2017 et 2017-2018 (intensité en mm/h pour pluie et cm/h pour neige, numéro des événements en abscisse)

La hauteur des précipitations de neige est souvent prise comme référence pour caractériser un hiver. Cependant, il est important de considérer la fréquence d'occurrence des précipitations (le nombre d'événements) pour la neige, mais également pour le verglas, et pour la pluie lorsque celle-ci survient lorsque la température de l'air s'approche de 0°C. La durée des événements de précipitation est plus représentative de la difficulté d'entretien d'une voie de circulation que la quantité de précipitation elle-même. Par exemple, un événement totalisant 10 cm de neige sur seulement 2 ou 3 heures, n'a pas les mêmes conséquences sur la circulation et requiert une logistique de déneigement différente qu'un événement s'étalant sur 24h.

L'anticipation des risques de glissance et d'accumulation de neige doit impérativement prendre en considération les phénomènes météo-routiers qui se produiront sur la surface de roulement. Ceux-ci peuvent être définis par l'ensemble des paramètres météorologiques et des caractéristiques de la voie de roulement qui aboutiront à des états de surface variés. Par exemple, selon la température de la surface de roulement et la présence de produit de déglaçage, les précipitations n'auront pas le même effet en termes d'adhérence. Une précipitation de neige sur une surface qui est à une température supérieure au point de congélation produira dans un premier temps une surface mouillée, alors que de la pluie sur une surface à une température sous le point de congélation conduira assez rapidement à une surface glacée.

L'analyse de risques climatiques et les mécanismes pouvant contribuer à la formation de glace sur la structure du pont sont abordés de façon plus détaillée dans la Section 7.6.

2.4.1 Le cas particulier de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier

La météorologie locale du pont Jacques-Cartier est un défi particulier pour le déneigement de la piste multifonctionnelle :

- > La surface de roulement d'une structure surélevée, contrairement à une chaussée sur remblai, ne bénéficie pas de matériaux en profondeur qui atténuent son refroidissement. Lorsque les conditions météorologiques sont réunies, par exemple un refroidissement rapide de l'air ou encore le dégagement du ciel en période nocturne, les déperditions de chaleur sont plus rapides ce qui aboutit à un refroidissement plus important de la surface ;
- > Le pont Jacques-Cartier se trouve au-dessus d'un fleuve, ce qui génère beaucoup plus d'humidité que dans les autres secteurs de la ville et qui favorise la constance des vents et augmente leur intensité : l'écoulement de l'air ne rencontre pas de résistance, ce qui contribue également à l'accélération des déperditions de chaleur lorsque la température de l'air est inférieure à celle de la surface de roulement ;
- > Une piste cyclable requiert le maintien d'un plus haut niveau d'adhérence qu'une chaussée pour automobilistes ou qu'un trottoir. En effet, la surface de frottement du pneu d'un vélo est très petite ce qui rend le cycliste plus sensible aux conditions de surface. De plus, les cyclistes disposent de seulement deux points de contact avec le sol ce qui réduit leur stabilité en cas de défaut (aucune redondance).

Pour prendre en considération l'ensemble de ces facteurs, l'interprétation des prévisions météorologiques devrait se faire selon 3 axes : les risques de précipitations, les risques de refroidissement de la surface de roulement et les risques de condensation de surface. Les précipitations sont facilement considérées pour les situations de perturbation (tempêtes), mais leur importance est souvent sous-évaluée pour les situations d'averses de pluie ou de neige. Celles-ci sont difficiles à prévoir par les météorologues, car elles sont intermittentes et leur occurrence dépend de facteurs locaux. Il est néanmoins crucial de les prendre en considération, en surveillant les probabilités de précipitation au cours de la journée, car elles sont souvent à l'origine de la dilution des produits de déglaçage qui produit de l'eau sur la surface de roulement, ce qui risque ensuite d'aboutir à la formation de glace noire.

Une autre cause de la formation de glace noire est le refroidissement de la surface de roulement lorsque celle-ci est mouillée et que sa température passe en dessous du point de congélation. L'application de produit de déglaçage permet d'abaisser le point de congélation et d'empêcher la formation de glace. Plus la concentration de produit est forte, plus le point de congélation sera bas, réduisant ainsi les risques de formation de glace noire. Les paramètres météorologiques qui permettront d'anticiper le refroidissement de la surface de roulement sont la baisse de la température de l'air, qui conduit à des déperditions de chaleur de la surface par convection, ou encore le dégagement du ciel en période nocturne, qui conduit à des déperditions de chaleur par rayonnement.

Autre phénomène météo-routier, la condensation de surface survient lorsque le niveau d'humidité de l'air est trop élevé pour la température de la surface de roulement. La température du point de rosée est le paramètre à prendre en considération sur le bulletin de prévision météorologique, car sa valeur indique le seuil à partir duquel le processus de condensation débutera. Lorsque la surface de roulement passe en dessous de la température du point de rosée, celle-ci se recouvre d'une pellicule d'eau ou d'une épaisseur de cristaux de glace (givre) selon la température et la présence ou non de fondant. C'est le risque de gel de la pellicule d'eau qui aboutira à une glace noire.

En résumé, l'interprétation des données météorologiques doit intégrer plusieurs aspects :

- > La prise en compte du degré de fiabilité des données selon le type de situation météorologiques ;
- > L'adaptation des données aux réalités du secteur, et la considération du microclimat le cas échéant ;
- > L'utilisation d'indicateurs autres que la hauteur des précipitations pour avoir une représentation plus réaliste des ressources à consentir ;
- > La prise en compte des paramètres particuliers de la piste multifonctionnelle tant sur le plan de la géométrie que sur le plan du comportement thermique de la surface de roulement ;
- > L'adoption d'une approche de gestion de risque basée sur 3 axes : les précipitations, les refroidissements et les condensations.

3 Opérations d'entretien hivernal conventionnel

Le déneigement conventionnel de la piste multifonctionnelle correspond aux opérations de maintien hivernal réalisées par le passage des équipements mécaniques, l'épandage des produits déglaçant, et le dégagement manuel de la neige ou de la glace sur la surface roulement. Dans le cadre du projet pilote, le dégagement manuel de la piste ou des éléments de la piste n'a pas été réalisé. Toutefois, le besoin d'effectuer un dégagement manuel a été considéré lors des analyses des résultats.

3.1 Contraintes spécifiques au projet

Le déneigement conventionnel de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier présente plusieurs contraintes opérationnelles spécifiques par rapport au déneigement traditionnel sur une piste cyclable ou trottoir au sol. Ces contraintes sont liées à l'utilisation des produits déglaçant et des équipements de déneigement.

3.1.1 Contraintes spécifiques aux équipements de déneigement

L'utilisation des équipements mécaniques sur la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier est assujettie à diverses contraintes opérationnelles imposées par les caractéristiques de la piste multifonctionnelle et de la structure portante (dalle et structure d'acier du pont) :

- > Enclavement de la piste : la piste multifonctionnelle se trouve confinée entre la glissière de sécurité et la clôture dissuasive, il est donc difficile de gérer des grandes quantités de neige, ce qui limite les dimensions des équipements et conditionne leur manœuvrabilité ;
- > Largeur de la piste : la distance moyenne entre la glissière de sécurité et la clôture dissuasive est de 2,5 m, ce qui limite la largeur utile des équipements si on considère l'espace nécessaire pour cumuler de la neige contre la glissière ;
- > Courbes et virages : la piste multifonctionnelle présente une géométrie complexe avec pentes et largeur variables et des virages serrés par endroits. En plus, il est possible de faire demi-tour seulement à quelques endroits éloignés. Il serait préférable que les équipements puissent faire un demi-tour au niveau du belvédère de la piste multifonctionnelle afin de minimiser les déplacements pendant les opérations de déneigement ;
- > Capacité portante limitée de la dalle et de la structure d'acier : comme décrit dans les rapports de capacité portante du pont Jacques-Cartier les plus récents (voir la Section 1.4), certains éléments de la structure portante de la piste multifonctionnelle présentent une limitation des charges additionnelles que ces derniers peuvent supporter. Ceci limite le poids total des équipements mécaniques et les charges d'essieu admissibles de ceux-ci. Il est à noter qu'en cas d'ajout de poids propre dû à une installation d'une membrane d'usure et étanchéité, il est

vraisemblable que d'autres éléments de la structure nécessitent des travaux de renforcement. Quoi qu'il en soit, une évaluation de la capacité portante du pont Jacques-Cartier serait nécessaire.

3.1.2 Contraintes spécifiques aux produits de déglaçage

L'utilisation des produits chimiques de déglaçage solides ou liquides dans la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier est assujettie à diverses contraintes opérationnelles imposées par l'état actuel de la structure du pont :

- > Drainage des eaux contenant des produits : la gestion des eaux contenant des produits de déglaçage est un enjeu important, tant du point de vue environnemental comme du point de vue de la durabilité de l'ouvrage considérant l'absence de revêtement protecteur sur la dalle ;
- > Corrosion de l'acier de la structure du pont : le pont Jacques-Cartier est un ouvrage qui a été affecté par les sels de déglaçage pendant plusieurs décennies, et a fait objet de multiples travaux de réfection de sa structure portante. Les agents chimiques des produits de déglaçage peuvent affecter la durabilité de l'ouvrage.

3.2 Équipements de déneigement

Les équipements les plus courants et disponibles sur le marché pour l'entretien hivernal conventionnel sont listés ci-après.

3.2.1 Camion-remorque avec pelle



Figure 3.2-1 : Exemple de camion compact articulé (avec pelle devant et épanduse des produits solides derrière)

Il existe une grande variété des camions-remorques disponibles sur le marché. Cependant, les contraintes particulières de la piste multifonctionnelle exigent des caractéristiques spécifiques pour le poids total de l'équipement, la charge à l'essieu, le rayon de giration et la largeur totale. Le Tableau 3.2-2 résume les caractéristiques des camions-remorques qui satisfont certaines contraintes opérationnelles.

Tableau 3.2-2 : Tableau comparatif des camions-remorques

	Modèle A	Modèle B	Modèle C
Poids (kg)	2550	1470	3460
Largeur (mm)	1016	1143	2760
Longueur (mm)	3226	2979	5740
Hauteur (mm)	2108	1981	2220
Charges à l'essieu	Répartition à peu près égale	558 kg à l'avant ; 882 kg à l'arrière (la répartition des charges par défaut est de 60/40, 40 du côté de la cabine). Avec une attache à l'avant du tracteur, la répartition des charges devient égale.	1514 kg à l'avant ; 1946 kg à l'arrière (la répartition des charges par défaut est d'environ 56/44, 44 du côté de la cabine).
Rayon de giration (mm)	800 (intérieur) 2250 (extérieur)	1445 (intérieur) 2625 (extérieur)	2176 (intérieur) 3905 - 4766 (extérieur)
Fonctions particulières	Pelle à lame lisse ; Souffleuse ; Épandage de produits solides (remorque) ; Épandage de produits liquides (remorque)	Pelle à lame lisse ; Souffleuse ; Épandage de produits solides ; Épandage de produits liquides	Configuration double, dont une pelle à lame lisse et un balai-brosse (balai rotatif)
Avantages	Équipement connu et testé, facilité d'ajout des citernes et épandeuses	Équipement facile à manipuler, faible rayon de giration et longueur	En théorie, bonne qualité de surface et minimisation de la quantité des produits
Inconvénients	Épandeuse solide sans système de mesurage du débit de produits	Équipement non testé à date sur le pont Jacques-Cartier	Équipement non testé à date sur le pont Jacques-Cartier Équipement très lourd, vérifier la capacité de la structure avant de son utilisation Équipement très encombrant et difficile à manipuler

3.2.2 Remorque avec épandeuse de produits



Figure 3.2-3 : Exemple de remorque avec épandeuse de produits solides

3.2.3 Souffleuse pour camion-remorque



Figure 3.2-4 : Exemple de souffleuse pour camion-remorque

3.2.4 Balai rotatif

Dans le cadre du présent mandat, une revue des techniques et des expériences de maintien hivernal de pistes cyclables effectuées internationalement a été effectuée. Cette revue a permis d'identifier que dans plusieurs cas, l'utilisation d'un balai rotatif permet l'obtention de conditions de surface acceptables pour le cyclisme, tout en minimisant l'utilisation de produits déglaçant. Un exemple de balai rotatif est présenté à la Figure 3.2-5. Par exemple, la Ville de Copenhague utilise presque uniquement le balai rotatif conjointement avec l'épandage des produits solides pour déneiger les pistes cyclables du réseau municipal.

Malgré qu'il n'ait pas été possible de tester l'efficacité du balai rotatif en raison de contraintes d'approvisionnement, il serait pertinent de le considérer pour une opération

future par déneigement mécanique. Le balai rotatif présente des avantages intéressants, puisque ce dernier offre, selon les cas étudiés, une qualité de surface acceptable pour le cyclisme et permet de réduire la quantité de produits de déglaçage à utiliser.

Le balai rotatif pourrait être utilisé seul ou, plus vraisemblablement, en complément à l'utilisation de la pelle à lame lisse, puisque cette dernière performe mieux lorsque les épaisseurs de neige sont supérieures à 15 cm. Utilisé en combinaison, la pelle permettrait de dégager le large volume de neige dans un premier temps, et par la suite, le balai rotatif pourrait être employé pour nettoyer et dégager la surface et ainsi offrir une qualité de surface acceptable pour le cyclisme.

Le modèle C (voir Figure 3.2-5) est un équipement mixte qui combine les avantages d'une pelle à lame lisse et du balai rotatif. Il faudra toutefois s'assurer que cet équipement se conforme aux contraintes décrites plus tôt dans cette section, en réalisant des essais sur la piste. De plus, des essais en amont permettraient de mieux comprendre la condition de surface que cet équipement permet d'obtenir.



Figure 3.2-5 : exemple d'un véhicule de déneigement de type Modèle C

3.3 Produits de déglaçage

Une brève description des produits de déglaçage considérés dans le cadre du présent mandat, suite à une étude de marché, est présentée ci-dessous :

- > Produit A (sel gemme, produit de référence)

Composants principaux : chlorure de sodium

Description : Le sel de voirie conventionnel est très peu coûteux et reste largement disponible au Québec. Son grand potentiel corrosif constitue néanmoins un inconvénient majeur et son utilisation n'est pas non plus adaptée au contexte montréalais étant donné la chute d'efficacité en dessous de -15°C. Du point de vue environnemental, la salinisation des eaux et du sol, les pertes liées aux rebonds et la quantité importante de sel requise font que le sel gemme reste un produit qui est loin d'être idéal.

- > Produit B (saumure de sel)

Composants principaux : chlorure de sodium (23% en masse idéalement) et eau

Description : Tout comme le sel à l'état pur, la saumure de sel est très peu coûteuse. La procédure de mélange et de dilution est simple et rapide et mène à une diminution de la quantité de sel requise et à une meilleure répartition sur les surfaces. Toutefois, la saumure de sel possède les mêmes inconvénients que le sel conventionnel, bien que l'ampleur de ces derniers soit moins élevée.

- > Produit C

Composants principaux : chlorure de sodium, avec traces de calcium et de magnésium

Description : Ce produit contient du sel gemme obtenu par des procédés miniers traditionnels, et qui a été ensuite broyé, tamisé et transporté en gros. Toutefois, il contient aussi une faible quantité de calcium, de magnésium et de prussiate jaune de sodium (PJS) ajouté comme agent anti-agglutinant. Par conséquent, il a un comportement et une efficacité très similaires à ceux du sel de voirie conventionnel.

- > Produit D

Composants principaux : chlorure de sodium, betteraves et autres sous-produits agricoles

Description : Ce produit est dérivé principalement de betteraves et autres composants biologiques, mélangés à du sel conventionnel. De par sa faible teneur en sel, il s'avère être moins corrosif. Selon le fabricant, il est également efficace jusqu'à -30°C. Cependant, il peut aussi exercer une demande biologique en oxygène (DBO) sur les cours d'eau.

- > Produit E

Composants principaux : chlorure de sodium, betteraves et autres sous-produits agricoles

Description : Ce produit a une composition similaire au Produit D mais agit en forme liquide. Il est plus adapté à une approche proactive (antigivrage). Comme son homologue, il peut aussi exercer une demande biologique en oxygène (DBO) sur les cours d'eau.

> Produit F

Composant principal : acétate de potassium

Description : Ce produit agit mieux dans un cadre proactif (antigivrage) et retient son efficacité jusqu'à -30°C. Il ne contient aucun composé de chlorure, de calcium ou de magnésium et exerce une faible demande biologique/chimique en oxygène (DBO). Ce produit comporte néanmoins de forts inconvénients, à savoir au niveau du prix très élevé et de sa biodégradabilité variante. L'acétate de potassium, aggravé par les autres composants fortement alcalins, peut causer la réaction alcali-granulat (RAG), fissurant et affaiblissant ainsi les surfaces de béton affectées.

> Produit G

Composant principal : betterave, maïs, soja et composé breveté à base d'un Polyol

Description : Les granules du produit G sont conçus à partir d'une formule recommandée par le système « BioPreferred » aux É.-U. et d'un l'inhibiteur anticorrosion. Leur utilisation permet de grandement réduire la quantité de sel requise lors des travaux de déneigement et aide à prévenir la formation de verglas. Ils agissent jusqu'à -28°C et restent actifs pendant 2 à 3 jours. Et selon le fabricant, ces granules présentent une toxicité réduite.

> Produit H

Composants principaux : glycérol (glycérine) et autres sous-produits agricoles

Description : Selon le fabricant, ce produit ne contient pas de chlorure, sulfate ou nitrite et par conséquent ne nuira ni aux surfaces en béton ni aux métaux. Il est marqué comme non-toxique et reste efficace jusqu'à -30°C. Il peut aussi bien être utilisé dans un cadre d'antigivrage que comme produit de déglaçage. Des tests de laboratoire réalisés par l'association « Pacific Northwest Snow fighters » aux É.-U., chargée d'assurer et d'améliorer la sécurité des transports routiers en hiver, ont confirmé que ce produit-SM ne corrodera pas les métaux ; il se peut même que le produit offre une protection contre la corrosion.

> Produit I

Composant principal : chlorure de magnésium

Description : Ce produit agit en forme liquide et permet d'accélérer la fonte de la neige sans laisser de résidu granulaire. Selon le fabricant, son point de congélation est de -45°C. Il peut aussi bien être utilisé dans un cadre d'antigivrage que comme produit de déglaçage. Toutefois, le chlorure de magnésium constitue un risque à long terme pour les éléments structuraux de pont.

> Produit J

Composant principal : chlorure de calcium

Description : Spécialement conçu pour les pistes cyclables, ce produit agit en forme liquide et ne laisse donc pas de résidu granulaire. Selon le fabricant, son point de congélation est de -51°C. Le chlorure de calcium, comme le chlorure de magnésium, constitue un risque à long terme pour les éléments structuraux de pont, bien que ce risque soit moins élevé.

> Produit K

Composants principaux : copeaux de bois et chlorure de magnésium ou de calcium

Description : Les copeaux de bois agissent en tant qu'abrasifs et servent à augmenter l'adhérence des chaussées. Avec un pH neutre et une faible corrosivité, il est spécifié sur la fiche technique du produit que les propriétés des copeaux de bois sont sans danger pour les structures et l'environnement.

L'impact de ces produits sur l'environnement et la durabilité de la dalle est évalué au cours du projet pilote. Les résultats sont présentés à la section 3.6.6. De plus, certains de ces produits sont mis à l'essai lors des opérations de déneigement afin de statuer sur leur efficacité.

3.4 Critères d'acceptabilité des opérations de déneigement

Deux paramètres fondamentaux des essais ont été caractérisés lors des essais, soit la largeur utile résiduelle et la condition de surface obtenues suite aux opérations de déneigement. Afin d'établir une base uniforme de comparaison, nous avons établi les cibles suivantes pour chaque paramètre :

3.4.1 Largeur résiduelle de la piste multifonctionnelle suite au déneigement

La piste multifonctionnelle a une largeur totale de 2,5 m (réduite à 2,3 m par endroit). Toutefois, due à la présence d'utilités publiques et de câble d'alimentation fixé à la glissière de sécurité et la difficulté de déneiger les abords de la glissière de sécurité et de la barrière dissuasive, la largeur utile se voit réduite en période hivernale, suite aux opérations de déneigement.

Une accumulation de neige est générée contre la glissière de sécurité, qui peut réduire le dégagement horizontal jusqu'à 400 à 500 mm de la surface de roulement.

Du côté de la barrière dissuasive, l'équipement mécanique ne peut s'approcher des poteaux et barrotins en acier pour ne pas les accrocher et entraîner un bris mécanique de l'équipement et/ou le bris de la clôture. De ce fait, à peu près 300 mm de neige, glace ou résidus du déneigement resteront au-dessous de la clôture, peu importe le nombre de

passages des équipements mécaniques, en réduisant la largeur utile d'environ 150 mm (largeur de neige dépassant la barrière).

Ces phénomènes sont appréciables sur la photo ci-dessous :

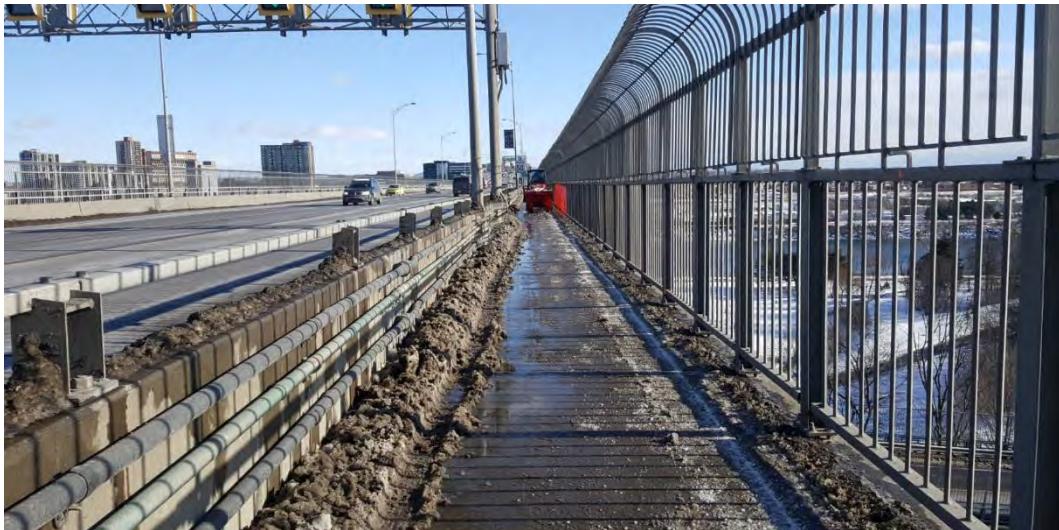


Figure 3.4-1 : Largeur résiduelle réduite de la piste lors du passage des équipements mécaniques

3.4.2 Condition de surface de la piste après les opérations

Les conditions de surface obtenues lors des essais de déneigement ont été classifiées selon leur état (surface sèche, mouillée, humide), la présence de neige, glace ou verglas, et la présence d'une ou plusieurs couches de ces résidus. Les conditions de surface ont été définies comme que suit :

3.4.2.1 Surface sèche et non glacée

Idéalement, les conditions de piste adhérente sont celles d'une surface « *sèche et non glacée* ». Voir la Figure 3.4-2 ci-dessous pour un exemple de ce type de condition de surface. Bien qu'il soit entendu que cette condition n'est pas une condition récurrente durant la saison hivernale, cette condition de surface a été établie afin d'établir une base comparative pour les autres conditions de surface.

D'ailleurs, la calibration des résultats des essais de friction à l'aide du pendule britannique a été effectuée en printemps 2018 avec des conditions sèches et non glacées (condition « *à sec* »), afin de pouvoir comparer les résultats avec la ligne de base de façon quantitative. Cependant, l'obtention de surfaces « *sèches et non glacées* » suite à des opérations de déneigement demeure plutôt rare dans des conditions hivernales. Il est donc trop restrictif d'exiger une telle condition de surface comme la seule condition acceptable pour la circulation cycliste en hiver. En effet, il faudra non seulement que les températures et l'humidité soient propices pour l'assèchement de la surface, mais aussi un trafic de cycliste suffisamment abondant sur la surface de roulement afin de permettre l'activation mécanique des produits de déglaçage.



Figure 3.4-2 : Condition de surface « à sec », sèche et non glacée (source : Journal de Montréal)

On observe des surfaces « *sèches et non glacées* » lors de certaines périodes de l'hiver suite à des redoux de température sur les chaussées des autoroutes où un trafic permanent permet d'assécher la surface suite aux passages répétés des essieux de véhicules (voir la Figure 3.4-3). Les roues des véhicules dégagent les résidus des neige ou glace qui n'ont pas été fondus par le sel, et facilitent l'assèchement de la surface de roulement. Au contraire, une piste multifonctionnelle, et surtout une piste à faible débit, ne profite pas de cet avantage. C'est pour cette raison qu'une surface « *sèche et non glacée* » n'a pu être obtenue lors des essais du présent projet pilote avec des opérations conventionnelles de déneigement.



Figure 3.4-3 : Condition de surface « à sec, sèche et non glacée », sur un chemin routier à Minnesota (source : AASHTO). Le passage du trafic autoroutier permet l'assèchement des surfaces de roulement en hiver, contrairement aux pistes cyclables

3.4.2.2 Surface sèche, glacée par endroits et avec résidus de glace ou produits de déglaçage.

Les conditions de surface « *sèche, glacées par endroits et avec résidus de glace ou produits* », tel que présenté à la Figure 3.4-4, surviennent en général après les opérations de déneigement, quand la température baisse en dessous de -20 °C. À cause de ses basses températures, la surface reste sèche, mais une couche de glace peut se former par endroits, et ce malgré l'application de produits de déglaçage. Ceci est dû à une mauvaise application desdits produits de déglaçage, qui sont épandus en dehors de la plage de température suscitant l'activation chimique de ceux-ci. Cette mauvaise application est normalement causée par des contraintes opérationnelles causant le retard des opérations sur la piste, et par le manque de disponibilité du personnel et équipement pour donner la priorité au déneigement des voies routières du pont.



Figure 3.4-4 : Condition de surface sèche, glacée par endroits et avec résidus de glace ou produits obtenus suite à la tempête de verglas du 2018.01.23

3.4.2.3 Surface humide, dégagée et non glacée

Une condition de surface « *humide, dégagée et non glacée* », telle que présenté dans la Figure 3.4-5, a été obtenu à plusieurs occasions, notamment après quelques heures d’activation des produits de déglaçage. Il est à noter que les produits ont une vitesse de déglaçage différente. De plus, l’efficacité des certains produits solides augmente avec une activation mécanique suite au passage des essieux des véhicules, tandis que d’autres amorcent la fonte de neige et glace dès leur application. Dans le dernier cas, seulement l’activation chimique a lieu, puisque les températures au moment de l’application sont propices pour que le produit en question puisse faire fondre la neige et la glace sans activation mécanique.



Figure 3.4-5 : Condition de surface humide, dégagée et non glacée (suivi du scénario de base, 2018.02.01)

3.4.2.4 Surface humide, avec des résidus et non glacée

La condition de surface « *humide, avec résidus de glace et non glacée* », tel que présenté à la Figure 3.4-6, est normalement obtenue suite à l’application des produits solides, mais non activés par la plage des températures non propice à l’activation chimique du produit. Ceci arrive quand la température baisse rapidement pendant la nuit et que le produit n’a pas le temps de fondre la neige ou la glace sans aide d’activation mécanique.



Figure 3.4-6 : Condition de surface humide, avec des résidus et non glacée (suivi du scénario amélioré, 2018.02.09)

3.4.2.5 Surface avec une fine couche de neige fondante ou « *slush* », pas de sous-couche glacée

La condition de surface « *fine couche de neige fondante ou slush, pas de sous-couche glacée* », tel que présenté à la Figure 3.4-7, est normalement obtenue immédiatement après l’application des produits de déglaçage. La « *slush* » est maintenue après l’activation chimique du produit pendant des heures, sans geler, mais sans fondre.



Figure 3.4-7 : Condition de surface avec une fine couche de neige fondante ou *slush*, pas de sous-couche glacée (suivi du scénario amélioré, 2018.02.13)

3.4.2.6 Surface glacée avec résidus de neige et glace

Ce type de surface est obtenue suite au passage de la pelle à lame lisse et avant l’application des produits. Bien que cette condition de surface n’ait pas été ciblée comme objectif des essais et des scénarios appliqués, nous avons mesuré l’adhérence de ce type de surface aux

fins de comparaison et pour estimer quantitativement l'effet de ne pas appliquer des produits de déglaçage suite au passage des équipements mécaniques.



Figure 3.4-8 : Condition de surface glacée avec résidus de neige, suite au passage de la pelle à lame lisse et avant l'application des produits

3.5 Mesure du coefficient de friction par essais de frottement

Bien qu'une description qualitative des conditions de surface soit essentielle aux fins d'identification, une mesure quantitative de l'adhérence est aussi importante pour caractériser la qualité d'une condition de surface donnée et ainsi déterminer sa sécurité pour la pratique du cyclisme.

3.5.1 Techniques disponibles pour mesurer le coefficient de friction

Des recherches ont été réalisées afin de déterminer la méthode la plus appropriée pour mesurer le coefficient de friction de la piste multifonctionnelle. La littérature sur ce sujet est vaste et plusieurs recherches ont été effectuées afin de déterminer la meilleure méthode pour mesurer l'adhérence des surfaces de roulement pour des chaussées autoroutières. Ces références, explorées dans cette section, visent la mesure de l'adhérence exigée pour des travaux de marquage routier. Différentes sources, telles que les agences gouvernementales et instituts de recherche universitaire, utilisent ces directives comme base de comparaison pour la mesure de l'adhérence en conditions hivernales. Sur les surfaces de roulement autre que les chaussées routières, où il n'y a pas de trafic et de circulation de véhicules lourds, tel que les stationnements, trottoirs et pistes cyclables, peu de données de recherche et de documentation sont disponibles afin de fournir une ligne directrice.

3.5.2 Comparaison et analyse des différentes techniques de mesure du coefficient de friction

La Figure 3.5-1 résume les principaux équipements qui existent pour mesurer le coefficient de friction sur les surfaces de roulement.

Title	Measurement principle	Main parameters	Tyre and wheel load	Measurement device view
ADHERA	Longitudinal friction coefficient (LFC)	Slip ratio: 1,0 or 100 % Water film thickness: 1,0 mm; Measures macrotexture; Measurement speed: 40, 60, 90, 120 km/h; Measurement interval: 20 m.	PIARC smooth profile tyre 165R15 (180kPa); Wheel load: 2500 N.	
BV-11	Longitudinal friction coefficient (LFC)	Slip ratio: 0,17 or 17 %; Water film thickness: 0,5-1,0 mm; Measurement speed: 70 km/h; Measurement interval: 20 m.	Trelleborg type T49 tyre (140kPa); Wheel load: 1000 N.	
GripTester	Longitudinal friction coefficient (LFC)	Slip ratio: 0,15 or 15%; Water film thickness: 0,5 mm; Measurement speed: 5-100 km/h; Measurement interval: 10-20 m or other.	254 mm diameter smooth profile ASTM-tyre (140kPa); Wheel load: 250 N.	
RoadSTAR	Longitudinal friction coefficient (LFC)	Slip ratio: 0,18 or 18%; Water film thickness: 0,5 mm; Measures macrotexture; Measurement speed: 30, 60 km/h; Measurement interval: 50 m.	PIARC tyre with tread; Wheel load: 3500 N.	
ROAR DK	Longitudinal friction coefficient (LFC)	Slip ratio: 0,2 or 20%; Water film thickness: 0,5 mm; Measures macrotexture; Measurement speed: 60, 80 km/h; Measurement interval: >5 m.	ASTM 1551 tyre (207kPa); Wheel load: 1200 N.	
T2GO	Slow-moving measurement; Longitudinal friction coefficient (LFC)	Slip ratio: 20%; Used for pedestrian/bicycle paths, road marking	Two 75 mm width tyres.	
VTI Portable Friction Tester (PFT)	Slow-moving measurement; Longitudinal friction coefficient (LFC)	Used for pedestrian/bicycle paths	-	
ROAR NL	Longitudinal friction coefficient (LFC)	Slip ratio: 0,86 or 86%; Water film thickness: 0,5 mm; Measures macrotexture; Measurement speed: 50, 70 km/h; Measurement interval: 5-100 m.	ASTM 1551 tyre (200kPa); Wheel load: 1200 N.	
RWS NL Skid Resistance Trailer	Longitudinal friction coefficient (LFC)	Slip ratio: 0,86 or 86%; Water film thickness: 0,5 mm; Measurement speed: 50, 70 km/h; Measurement interval: 5-100 m.	PIARC smooth profile tyre 165R15 (200kPa); Wheel load: 1962 N.	
SCRIM	Sideway friction coefficient (SFC)	Slip angle: 20°; Water film thickness: 0,5 mm; Measures macrotexture; Measurement speed: 50 km/h; Measurement interval: >10 m.	Avon SCRIM smooth profile tyre 76/508 (350kPa); Wheel load: 1960 N.	
Skiddometer BV-8	Longitudinal friction coefficient (LFC)	Slip ratio: 100% or 14%; Water film thickness: 0,5 mm; Measurement speed: 40, 60, 80 km/h; Measurement interval: 30-50 m.	AIPCR tyre with longitudinal tread 165R15; Wheel load: 3500 N.	
SKM	Sideway friction coefficient (SFC)	Slip angle: 20°; Water film thickness: 0,5 mm; Measurement speed: 50 km/h; Measurement interval: 100 m or other.	Smooth profile tyre; Wheel load: 1960 N.	

SRM	Longitudinal friction coefficient (LFC)	Slip ratio: 15% or 100%; Water film thickness: 0.5 mm; Measurement speed: 40, 60, 80 km/h; Measurement interval: 20 m or other.	AIPCR tyre with longitudinal tread 165R15; Wheel load: 3500 N.	
TRT	Longitudinal friction coefficient (LFC)	Slip ratio: 25%; Water film thickness: 0.5 mm; Measurement speed: 40-140 km/h; Measurement interval: 20 m or other.	Smooth profile ASTM-tyre; Wheel load: 1000 N.	
SRT-3	Longitudinal friction coefficient (LFC)	Slip ratio: 100%; Water film thickness: 0.5 mm; Measurement speed: 60 km/h.	Tyre with tread (200kPa).	
IMAG	Longitudinal friction coefficient (LFC)	Slip ratio: 100%; Water film thickness: 1.0 mm; Measurement speed: 65 km/h;	PIARC smooth profile tyre; Wheel load: 1500 N.	
DFT Dynamic Friction Tester	Rotating friction	For stationary measurements	—	
SRT Pendulum	Pendulum test	For stationary measurements	—	

Figure 3.5-1 : Équipements existants pour la mesure de l'adhérence sur des chaussées (extrait de « *Evaluation of skid resistance characteristics and measurement methods* », Andriejuskas et. al, 9th International Conference on Environmental Engineering, Vilius, Lithuania, 2014)

Certains aspects identifiés méritent d'être nommés :

- > Les équipements les plus courants pour la mesure de l'adhérence sur les chaussées ne sont pas les plus adaptés pour l'utilisation dans le cas de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier. Ceci est dû aux contraintes de capacité portante de la structure, la géométrique et l'espace disponible de la piste. En effet, le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) utilise le véhicule SCRIM sur les chaussées du Québec. Toutefois, les caractéristiques propres à la piste en font que son utilisation soit impossible ;
- > Les études les plus récentes en Europe venant des pays scandinaves (en particulier de la Suède), indiquent que la méthode la plus représentative pour la mesure du coefficient de friction dynamique d'une chaussée est la méthode décrite dans la norme européenne EN 1436 – *Road marking materials, road marking performance for road users*. En effet, l'article « *Evaluation of skid resistance characteristics and measurement methods* » par Andriejuskas et. Al, présenté à la 9th International Conference on Environmental Engineering, tenue en 2014 à Vilius, Lituanie, en fait référence, et compare les différents systèmes de mesure de l'adhérence sur des surfaces de roulement ;

> L'appareil PFT, « Portable Friction Tester », développé en Suède pendant les années 70, semble donner des résultats fiables qui caractérisent de manière réaliste l'adhérence d'une roue qui se déplace sur un chemin enneigé ou glacé (LFC, Longitudinal Friction Coefficient). En effet, par rapport aux autres tests et méthodes de mesurage de l'adhérence, le PFT est le seul appareil manuel et portatif qui mesure la friction dynamique pendant le parcours de l'instrument dans un chemin linéaire donné, au moyen d'une roue et d'une courroie qui s'oppose au mouvement de ladite roue. Les essais et méthodes décrits dans la Figure 3.5-1, à l'exception de ceux qui utilisent les appareils PFT et T2GO, mesurent principalement le coefficient de friction statique de manière ponctuelle, et alors ne sont pas représentatifs de l'adhérence d'une roue qui se déplace sur une surface donnée.

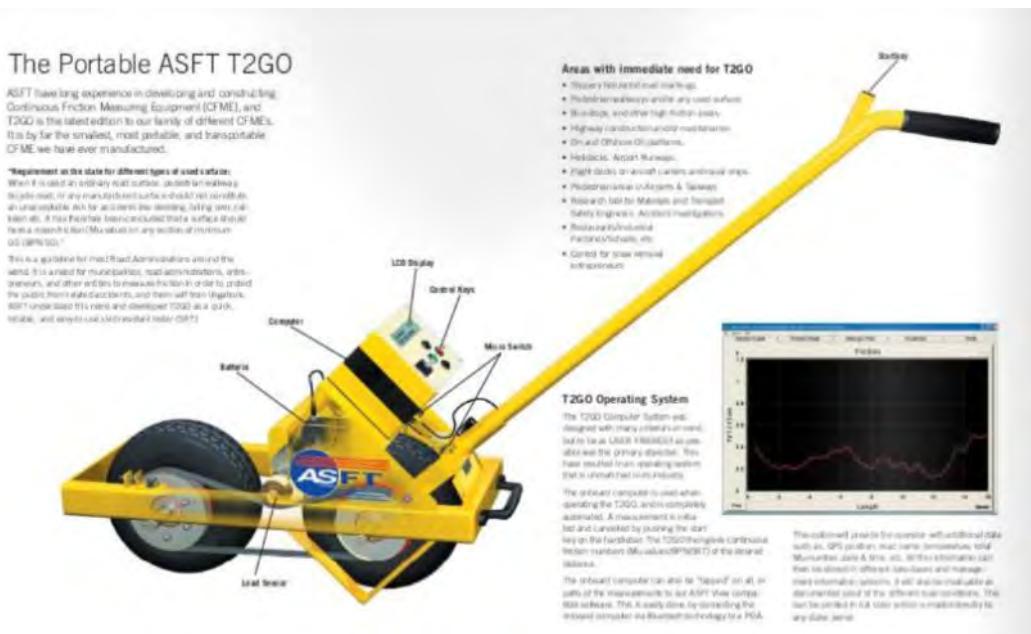


Figure 3.5-2 : Équipement portatif T2GO

3.6 Projet pilote – Déneigement par méthode conventionnelle

3.6.1 Généralité

Les essais de maintien hivernal selon les méthodes dites conventionnelles ont été planifiés, exécutés, suivis et enregistrés par Arup lors du déroulement du présent projet pilote, entre décembre 2017 et avril 2018, et ce sur les sections 2 à 5 de la piste du pont Jacques-Cartier. Les objectifs de ces essais sont les suivants :

- > **Évaluer l'efficacité des scénarios d'intervention planifiés**

Un scénario d'intervention consiste en un protocole d'opérations qui inclut l'utilisation d'un ou plusieurs équipements de déneigement, d'un ou plusieurs produits de déglaçage, et sur certaines zones spécifiques de la piste multifonctionnelle. L'efficacité de chaque scénario est évaluée et comparée. Les données considérées comprennent la condition de surface de la dalle et la largeur résiduelle obtenue.

- > **Mesurer les ressources nécessaires pour chaque scénario : temps d'opérations, logistique et facilité d'exécution du scénario**

À chaque essai, le temps des opérations, ainsi que toute autre observation importante pouvant affecter le déneigement de la piste multifonctionnelle, ont été enregistrés à l'aide de fiches de contrôle et de rapports de suivi.

3.6.2 Catégories d'événements météorologiques

Afin de cibler le type d'interventions le plus approprié, nous avons identifié quatre types de précipitations ; ces catégories visent à classifier chaque tempête de façon pratique pour pouvoir mesurer les efforts nécessaires pour le maintien de la piste, dans le cadre du projet pilote.

Table 3.6-1 : Catégories d'événements météorologiques

Événement / catégorie	Critère de catégorisation
Majeure	Au-delà de 10 cm
Moyenne*	Entre 2 et 10 cm
Mineure	En dessous de 2 cm
Verglas	Précipitation du verglas

*Pour fins de simulation présentée dans la section 8.2, les tempêtes de plus de 10 heures et au-dessus de 2 cm ont été considérées

3.6.3 Types d'intervention

Afin de cibler les efforts du projet pilote et faciliter l'interprétation des résultats, quatre types d'intervention ont été établis pour répondre à différents niveaux de gravité d'événements météorologiques. Ces types d'intervention varient en fonction du temps

d'utilisation des équipements et de la main d'œuvre, et de la quantité de produits appliqués et sont définis tel que suit :

3.6.3.1 Intervention avec produits seulement (scénario A) :

Cette intervention vise à obtenir des résultats rapides, sans grattage de la surface par la lame du véhicule et en utilisant des produits de déglaçage seulement. Cette intervention a été évaluée théoriquement uniquement, n'ayant pas fait l'objet d'essais in-situ durant le projet pilote. Il est estimé que cette intervention sera applicable lors des très faibles quantités de neige (< 2 cm), ou en absence de neige de façon préventive.

3.6.3.2 Intervention de base (scénario B) :

Cette intervention vise à obtenir des résultats rapides suite à une tempête moyenne ou majeure, avec une utilisation maximale des produits de déglaçage pour le temps minimal d'utilisation des équipements mécaniques. Lors des essais, les paramètres suivants ont été fixés pour les interventions de base :

- > Quantité maximale du produit + passage minimal des équipements, pour les interventions de base ;
- > Quantité de produits solides : environ 0,3 à 0,5 kg / m linéaire
- > Quantité de produits liquides : entre 0,15 et 0,17 L / m linéaire
- > Nombre de passage de la pelle à lame lisse : 1 passage au centre de la piste
- > Passage de la souffleuse : Non

3.6.3.3 Intervention améliorée (scénario C) :

Cette intervention vise à obtenir la meilleure qualité de surface possible suite à une tempête moyenne ou majeure, avec une utilisation minimale des produits de déglaçage. Lors des essais, les paramètres suivants ont été fixés pour les interventions améliorées :

- > Quantité minimale du produit + passage maximal des équipements, pour les interventions améliorées ;
- > Quantité de produits solides : environ 0,2 à 0,3 kg / m linéaire
- > Quantité de produits liquides : entre 0,065 et 0,095 L / m linéaire
- > Nombre de passage de la pelle à lame lisse : un minimum de 2 passages (aller-retour, en maximisant la largeur dégagée)
- > Passage de la souffleuse : au besoin, selon la largeur utile et le niveau de service souhaités

Lors du projet pilote l'utilisation d'une souffleuse, en complément à la pelle mécanique, a permis d'améliorer l'état de la piste multifonctionnelle, en produisant une surface mieux

déagagée. À noter que le nombre de passages de la souffleuse dépend de la largeur utile souhaitée.

3.6.3.4 Intervention en cas de verglas (scénario D) :

Les cas des tempêtes de verglas doivent être traités de façon particulière, à cause de la nature et type de précipitation, de la sécurité des opérations et de l'efficacité des équipements et des produits. Il y a deux stratégies de maintien à être appliquées lors des tempêtes de verglas : le maintien préventif (dégagement de la surface et épandage des produits avant les précipitations), et le maintien curatif (dégagement de la surface et épandage des produits après les précipitations). Le maintien curatif a été testé lors du présent projet pilote, les résultats se trouvent dans la Section 3.7.

3.6.4 Fiche de contrôle des opérations conventionnelles

La fiche de contrôle, conçue pour les opérations de déneigement, sert à enregistrer les observations pertinentes et à consolider la collecte de données suite à chaque visite. Elle a été employée aussi bien durant les opérations de déneigement que les visites de suivi. Elle contient, entre autres, les informations suivantes :

- > Planification de la visite et commentaires généraux (organisateurs, participants, heures de la visite, etc.) ;
- > Profil météorologique (température extérieure, vent, précipitations, etc.) ;
- > Type de déneigement (scénario enclenché, zones déneigées, largeur utile de la piste suite au déneigement, etc.) ;
- > Produit utilisé (estimation de la quantité utilisée, efficacité, etc.) ;
- > Conditions de surface, et niveau de sécurité associé à celles-ci ;
- > Un descriptif des mesures de frottement à l'aide du pendule britannique, lorsqu'elles s'appliquent ;
- > Recommandations à la lumière des mesures et des inspections effectuées ;
- > Toute autre observation jugée pertinente.

La fiche de contrôle utilisée lors des opérations de déneigement peut être consultée à l'Annexe 3.2.

3.6.5 Équipements utilisés dans le cadre du projet pilote

Les équipements mécaniques de déneigement ont été fournis pour le projet pilote à partir du contrat en vigueur pour la fourniture des services de déneigement des voies carrossables du pont Jacques-Cartier. Ceux-ci rencontraient plus ou moins les exigences décrites dans la section 3.1.1 applicable aux zones où des essais de déneigement et de condition de surface ont été effectués dans le cadre du projet pilote durant l'hiver 2017-2018. Les sections où des essais ont été effectués sont les sections 1 à 5 du pont Jacques-Cartier.

Les équipements suivants fournis par PJCCI ont été utilisés lors du projet pilote : véhicule avec remorque pour épandeuse solide, épandeuse liquide, pelle à lame lisse et souffleuse.

3.6.6 Produits de déglaçage évalués et mis à l'essai durant le projet pilote



Figure 3.6-2 : Échantillons des produits de déglaçage utilisés

Au cours du présent mandat, onze produits de déglaçage ont été étudiés (voir section 3.3). Cependant seulement neuf de ces produits ont été soumis à des essais pratiques réalisés lors des opérations de déneigement ; les deux autres présentaient soit un risque pour les éléments structuraux du pont, soit un comportement assez similaire à celui d'un autre produit, et ont donc été écartés. En effet, le produit F (acéate de potassium) peut potentiellement corroder les éléments du pont faits en acier galvanisé, en zinc ou en cuivre; tandis que le produit E (dérivés naturels et saumure de sel) est en partie composé de saumure de sel.

Il faut toutefois noter que la saumure de sel pourrait être considérée pour des températures plus douces (jusqu'à -15 °C environ) notamment en raison de sa disponibilité sur le marché et de son faible coût. Sa forme liquide facilite l'épandage et accélère la fusion de la glace ou neige. Elle s'avère toutefois inappropriée pour les températures très basses. Étant à base de chlorure de sodium, elle peut aussi avoir un impact sur la dalle du pont ou sur ses éléments structuraux (voir la section 4).

L'analyse des produits comprend, tout d'abord, une revue des fiches techniques et signalétiques ainsi qu'une analyse « théorique » selon plusieurs critères, notamment au niveau de leur :

- > Composition chimique ;
- > Impact environnemental, qui comprend (pour plus de détails, voir la section 5) :
 - Salinisation ;
 - demande biochimique/chimique en oxygène (DBO/DCO) ;
 - toxicité ;
 - persistance environnementale à long terme ;
 - eutrophisation, ou changement du milieu environnemental ;
- > Impact sur la durabilité de la structure du pont, incluant (pour plus de détails, voir la section « Durabilité ») :
 - potentiel corrosif ;
 - attaque chimique ;

- réactivité alcali-granulat (RAG) ;
- > Coût ;
- > Efficacité en dessous du point de congélation, et ;
- > Disponibilité au Québec, ou possibilité d'importation.

Ensuite, les produits ont été évalués sur une échelle de 0 à 5, démontrant ainsi leur performance respective pour chacun des critères ci-dessus. Plus la note est élevée, plus la performance est élevée.

De façon similaire, une pondération a été attribuée à chaque critère en fonction de leur impact. Toutefois, les catégories générales, dont l'environnement, la durabilité et l'efficacité, ont toutes été pondérées de manière égale. À noter aussi qu'un facteur de correction a été appliqué aux sommes partielles pour refléter la quantité de produits requise pendant les opérations de déneigement. À partir de ces sommes partielles, une note globale sur 100 a été évaluée pour chaque produit et les résultats ont ensuite été inclus dans un tableau, comme le montre le Tableau 3.6-3.

La partie « Efficacité » a considéré le potentiel de déglaçage et le coût des produits de déglaçage et a été pondérée de la manière suivante (plus la valeur est élevée, plus l'importance est grande) :

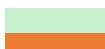
$$\text{Efficacité} = \text{puissance de déglaçage} \times 3 + \text{coûts} \times 1$$

En effet, le coût des produits n'a pas grandement influencé la prise de décision dans le cadre du projet pilote.

Pour plus d'informations sur la pondération des critères environnementaux et de durabilité, veuillez consulter les sections 4 et 5 respectivement. Le tableau complet d'analyse globale figure à l'Annexe 3.1.

Tableau 3.6-3 : Évaluation globale des produits de déglaçage

Produit	Composant principal	Solaire ou Liquide	Environnement		Durabilité		Efficacité		Note Global	Classement	Commentaires			
			sur 100		sur 100		sur 100							
Produit A	Sel	Solaire	84.0	61.7	70.0	77.1	4				Produit de référence			
Produit B	Sel + Eau	Liquide	84.0	70.0	S. O.	S. O.	S. O.				Produit non testé ; évaluation faite sans tenir compte des résultats du projet pilote			
Produit C	Sel	Solaire	84.0	55.0	65.0	68.2	6				Produit essentiellement à base de sel gemme plus magnésium et calcium en tant qu'additifs			
Produit D	Dérivés naturels	Solaire	61.0	83.3	90.0	80.4	1				Sel traité avec dérivés naturels			
Produit E	Dérivés naturels	Liquide	56.0	83.3	15.0	66.1	7				Produit mieux utilisé comme agent proactif (antigivrage)			
Produit F	Acetate	Liquide	62.0	95.0	S. O.	S. O.	S. O.				Produit non testé ; évaluation faite sans tenir compte des résultats du projet pilote			
Produit G	Dérivés naturels	Solaire	70.0	91.7	75.0	79.4	2				Produit à base de composants biologiques Idéalement dilué avec du saumure			
Produit H	Dérivés naturels	Liquide	61.0	100.0	75.0	76.8	5				Produit à base de composants biologiques et apparemment complètement biodégradable			
Produit I	Chlorure de magnésium	Liquide	75.0	25.0	70.0	61.1	9				Chlorure de magnésium corrosif A ne pas utiliser non dilué			
Produit J	Chlorure de calcium	Liquide	75.0	48.3	95.0	77.2	3				Chlorure de calcium corrosif A ne pas utiliser non dilué			
Produit K	Copeaux	Solaire	58.0	76.7	50.0	61.4	8				Ce produit est plutôt un abrasif Il flotte sur la glace et ne se dilue pas			

 Recommandé
 Déconseillé

3.6.7 Mesure du coefficient de friction dans le cadre du projet pilote

L'utilisation du PFT pour mesurer l'adhérence de la piste multifonctionnelle dans le cadre du présent mandat a été considérée, mais l'appareil n'a pu être déployé puisque ce dernier n'était pas disponible.

Alternativement, pour mesurer l'adhérence, la méthode du pendule britannique (British Pendulum, BP) a été sélectionnée. La Figure 3.6-4 présente le pendule britannique ainsi que l'appareil en action de mesurer l'adhérence de la piste multifonctionnelle. Le pendule britannique a été développé durant les années 50, et a été fortement utilisé par le « Department of Transportation » américain (DOT). Le pendule britannique mesure le coefficient de friction statique de façon ponctuelle, c'est-à-dire à un point précis et non sur une distance. Pour cette raison et pour bien évaluer le coefficient de surface moyen sur la piste et éviter des points de mesure non représentatifs, des mesures d'adhérence ont été réalisées à plusieurs reprises dans le sens de la largeur de la piste à un même emplacement. La valeur moyenne a alors été considérée. Les résultats ont été déduits et interprétés selon la norme ASTM E303-93.



Figure 3.6-4 : British Pendulum (BP) utilisé lors du projet pilote (à gauche) ; exécution des mesures de glissance sur la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier (à droite)

Les valeurs obtenues avec le pendule britannique (*BPN, British Pendulum Number en anglais*) sont sensibles à la température du revêtement. En effet, les propriétés du caoutchouc du sabot du pendule varient quelque peu selon la température. À l'aide d'une relation fournie par le manufacturier, les valeurs de BPN mesurées sur le site ont été corrigées à une température de référence afin d'établir une base de comparaison commune. Pour bien interpréter et calibrer ces données, ces valeurs sont ensuite ajustées aux mesures de frottement de la même surface sèche et à des températures positives, dans des conditions « à sec ». Cet essai de calibration « à sec » effectué au début de l'été 2018. À ce moment-ci, une correction a été effectuée pour des températures de 0,10 et 20 °C. La Figure 3.6-5 illustre la correction suggérée par le manufacturier pour une température de référence du revêtement de 10 °C au moment des essais.

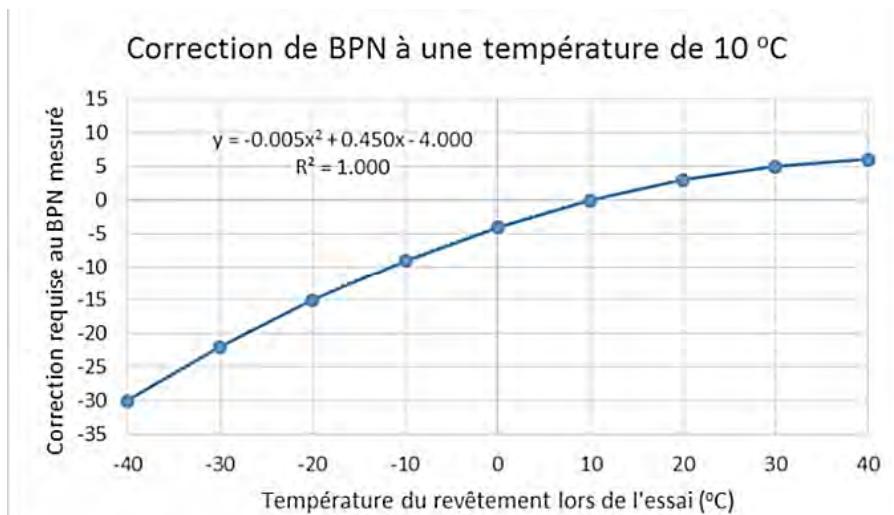


Figure 3.6-5 : Correction des valeurs de BPN a une température de référence de 10 C

Les valeurs de BPN mesurées sur la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier ont été converties en coefficient de frottement à l'aide d'une relation établie par le MTMDET (Réf. Bulletin d'information technique Vol. 1, no 5, janvier 1996, Ministère des Transports). Cette relation a été établie à partir de données de CFT (coefficient de frottement transversal) mesurée à l'aide de l'appareil SCRIM en période estivale et des valeurs estivales de BPN du pendule britannique, recueillies sur 68 sections de route. Les valeurs de BPN mesurées sur la piste multifonctionnelle ont d'abord été corrigées à une température de 20 °C puis converties en CFT selon la relation du Ministère des Transports.

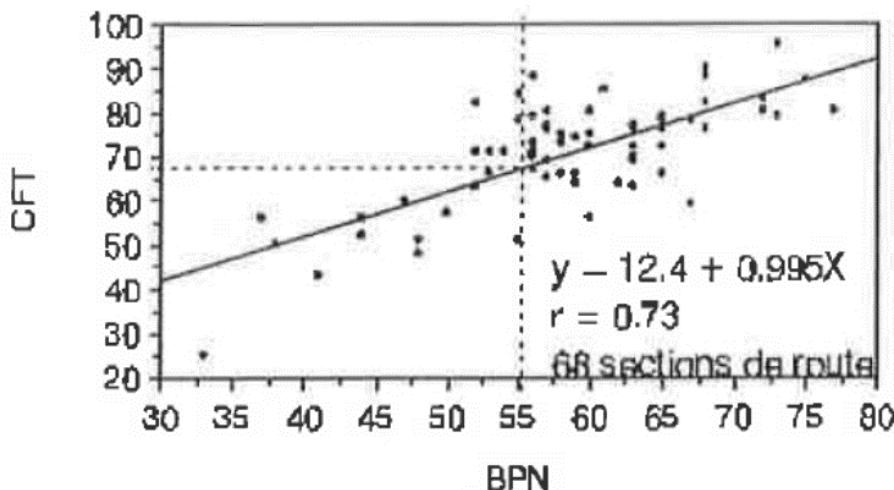


Figure 3.6-6 : Corrélation des mesures du CFT (Coefficient de Frottement Transversal) et les valeurs mesurées avec le BP (BPN, British Pendulum Number), selon le Bulletin d'information technique Vol. 1, no 5, janvier 1996, Ministère des Transports

3.6.8 Autres considérations

D'autres considérations importantes doivent être tenues en compte lors de l'évaluation de la piste suite aux opérations de déneigement. Celles-ci incluent :

3.6.8.1 Homogénéité de la surface

L'homogénéité de la surface doit être caractérisée et considérée au même niveau que l'adhérence et le coefficient de friction associé à une opération de déneigement donnée. En effet, la surface est souvent irrégulière après l'application des produits liquides, comme les « rainures » laissées par l'aspergeur du produit liquide (voir Figure 3.6-7), ou les zones de dalle glacées par endroit comme dans le cas d'une tempête de verglas.

3.6.8.2 Dégagement des drains, des plaques couvre-joints et d'autres équipements de la piste multifonctionnelle

Les opérations de déneigement conventionnel (équipements mécaniques et épandage des produits déglaçant) affectent essentiellement la surface de la piste par rapport à sa largeur utile ; cependant, il a été observé pendant les essais qu'il sera nécessaire de réaliser un dégagement et nettoyage manuel des éléments suivants :

- > Drains de la piste multifonctionnelle : la bouche des drains est bloquée à chaque fois que la pelle à lame lisse passe et tasse la neige et la glace contre la glissière de sécurité ;
- > Plaques couvre-joint : le passage de la pelle à lame lisse risque d'endommager la plaque couvre-joint. De la même manière que les opérateurs des camions de déneigement lèvent la pelle au droit des joints de dilatation des ponts, l'opérateur lève la pelle pour éviter que la plaque couvre joint soit accrochée et que celle-ci

s'endommage au passage de l'équipement. Cependant, ceci laisse une épaisseur de neige vis-à-vis des plaques et n'offre pas une condition de surface désirable localement.

- > Blocs de glace en dessous de la lisse horizontale de la clôture.

Pour ces raisons, il est pertinent de compter une équipe de travailleurs pour effectuer le nettoyage et le dégagement manuel pendant les opérations de maintien hivernal. Ceci aidera à assurer la sécurité des cyclistes et usagers de la route, et à faciliter le drainage de l'eau après les opérations mécaniques.



Figure 3.6-7 : drains confinés par la neige accotée à la glissière de sécurité (à gauche) ; plaque couvre-joint glacé et ses approches enneigées (à droite)

3.6.8.3 Nettoyage et déneigement de la zone des chicanes

Une zone particulière à considérer dans la piste est la zone des nouvelles chicanes amovibles. Les chicanes ont été installées au printemps 2018, afin de diminuer la vitesse des cyclistes. En ce moment il y a cinq zones de chicanes de part et d'autre des descentes, soit deux du côté de Longueuil, une du côté de Montréal et deux autres près de la passerelle de l'Île-Sainte-Hélène. Les chicanes peuvent être en position fermée en été, et en position ouverte pour les cas d'urgences et potentiellement durant la saison hivernale.

Une attention particulière devra être portée par les opérateurs de machinerie pour ne pas endommager et percuter les poteaux. Si un tel événement venait à se produire, en plus d'endommager les chicanes et l'équipement de déneigement, ceci pourrait entraîner des retards sur les opérations de déneigement et engendrer des retards pour l'ouverture de la piste. Par conséquent, l'opérateur des équipements devra être avisé de leur position. Afin d'atteindre une meilleure largeur utile au sol, il serait peut-être nécessaire de déneiger et épandre les produits de déglaçage manuellement près des chicanes.

3.7 Résultats des opérations

Au total, dix-neuf (19) visites à la piste multifonctionnelle ont été effectuées ; douze (12) de ces visites ont été effectuées lors des opérations de déneigement et les sept (7) autres consistaient en un suivi de l'état de la piste effectuée 6 à 12 heures après les opérations de déneigement. Lors de ces visites, les paramètres définis dans la fiche de contrôle ont été mesurés, et l'état de la piste (état de surface, largeur utile, dégagement des drains et joints, etc.) a été enregistré. Des rapports photographiques ont été réalisés et l'évolution de la

qualité de la surface après les essais a été suivie. Le Tableau 3.7-1 montre le résumé des interventions réalisées.

Tableau 3.7-1 : Résumé des interventions réalisées

Date du déneigement ou suivi	Est-ce un déneigement ou un suivi ?	Produits utilisés	Température extérieure	Précipitations actuelles	Largeur utile de la piste suite au déneigement [Largeur]	Qualité de la surface après déneigement	Moyenne BPN calibrée	Moyenne CFT calibrée	Résidus
12/13/2017	Déneigement	rien	-11°C ou moins	Aucune, Neige soufflée	115cm(50%)	Béton visible, Fine pellicule de neige restante			Drains bouchés
12/15/2017	Déneigement	Produit I (Cl. de magnésium)	-11°C ou moins	Aucune	170cm(75%)	Fine pellicule de neige restante			
12/20/2017	Déneigement	Produit I (Cl. de magnésium), Produit C	-2°C	Aucune	140cm(60%)	Béton visible			Drains bouchés; Flaques d'eau du côté de la glissière; Couche de neige sur les couvre-joints (joints de dilatation)
1/8/2018		rien	-10°C à -4°C	Neige légère		Piste impraticable (neige accumulée)			
1/13/2018	Déneigement	Produit I (Cl. de magnésium), Produit C	-11°C ou moins	Aucune	170cm(75%)	Fine pellicule de neige restante, Couche de neige dure (glissante)			Drains bouchés; Couche de neige sur les couvre-joints (joints de dilatation)
1/23/2018	Déneigement	Produit A (sel gemme)	+1°C	Pluie verglaçante, Rafales de vent	150cm(65%)	Fine pellicule de neige restante, Couche fine de slush non glacée et humide			Blocs de glace sur le bord de la piste cyclable; Accumulation de glace et de verglas sur les extrémités du garde-corps
1/24/2018	Suivi	Produit A (sel gemme)	-11°C ou moins	Aucune	150cm(65%)	Surface sèche, Béton visible, Glace vive (noire), Surface sèche (S3), béton visible (la plupart des sections) et glace vive (points bas où l'eau s'est accumulée)			Blocs de glace sur le bord de la piste cyclable; Accumulation de glace et de verglas sur les extrémités du garde-corps
1/27/2018	Déneigement	Produit I (Cl. de magnésium)	-11°C ou moins	Aucune	120cm(55%)	Béton visible, Couche de neige dure (glissante), Glace vive (noire), suite au soufflage, neige en cristaux			Couche de neige dure (glissante), Glace vive (noire), suite au soufflage, neige en cristaux
1/31/2018	Déneigement	Produit J (Cl. de calcium)	-10°C à -4°C	Neige légère	120cm(55%)	Fine pellicule de neige restante, Couche résiduelle fine 1 a 2 mm			Drains bouchés; Neige légère sur flaques de glace à quelques endroits; Couche de sloche sur les couvre-joints (joints de dilatation)
2/1/2018	Suivi	Produit J (Cl. de calcium)	-1°C	Aucune	170cm(75%)	Surface sèche, Béton visible, Surface sèche (S3), béton visible (la plupart des sections) et flaques d'eau (points bas où il y a une accumulation d'eau et de sloche)			Drains bouchés; Neige légère sur flaques de glace à quelques endroits; Couche de sloche sur les couvre-joints (joints de dilatation)
2/5/2018	Déneigement	Produit D, Produit E	-10°C à -4°C	Aucune	150cm(65%)	Fine pellicule de neige restante, Couche de neige dure (glissante)			Drains bouchés; Sloche résiduelle
2/6/2018	Suivi	Produit D, Produit E	-11°C ou moins	Neige légère	170cm(75%)	Surface sèche, Béton visible, Fine pellicule de neige restante			Drains bouchés; Couche de neige sur les couvre-joints (joints de dilatation)
2/8/2018	Déneigement	Produit D / Produit J (Cl. de calcium)	-11°C ou moins	Neige légère	170cm(75%)	Fine pellicule de neige restante	44.8 / 45.1	0.57 / 0,57	Fine pellicule de neige restante
2/9/2018	Suivi	Produit D / Produit J (Cl. de calcium)	-10°C à -4°C	Poudrerie			48.9 / 52.9	0.61 / 0.65	Drains bouchés; Flaques d'eau du côté de la glissière; Couche de neige sur les couvre-joints (joints de dilatation)
2/12/2018	Déneigement	Produit A (sel gemme) / Produit J (Cl. de calcium)	-11°C ou moins	Aucune	170cm(75%)	Béton visible, Traces de sloche	52.7 / 37.3	0.65 / 0.49	Traces de sloche
2/13/2018	Suivi	Produit A (sel gemme) / Produit J (Cl. de calcium)	-11°C ou moins	Aucune		Surface sèche, Béton visible, surface humide pour les deux produits, grains de sel (de LS10 à LS11)	40.1 / 50.1	0.52 / 0.62	Drains bouchés; Surface humide; Traces granulaires
2/16/2018	Déneigement	Produit K / Produit A (sel gemme)	-5°C à -3°C	Neige légère	120cm(55%)	Béton visible	42.0	0.5	Drains bouchés
2/17/2018	Suivi	Produit K / Produit A (sel gemme)	-5°C à -3°C	Poudrerie					Accumulation de flaques d'eau
3/8/2018	Déneigement	Produit G / Produit H	-2°C	Neige légère	120cm(55%)	Fine pellicule de neige restante	50.2 / 41.5	0.62 / 0.54	Fine pellicule de neige restante
3/9/2018	Suivi	Produit G / Produit H	-1°C	Aucune, Neige légère			44.5 / 39.1	0.57 / 0.51	Drains bouchés
6/12/2018	Calibration	rien	30°C ou plus	Ensoleillé			86.2	0.98	Accumulation de flaques d'eau

Les interventions sont évaluées en fonction des résultats par rapport aux paramètres principaux de performance suivants :

3.7.1 Condition de surface résiduelle

Les conditions de surface décrites dans la Section 3.4.2 ont été atteintes lors des interventions et leurs suivis, sauf la condition idéale de surface sèche et non glacée. En plus, un produit antigivrage (Produit E à base de dérivés naturels) a été appliqué une fois mais ce dernier n'a pas donné des résultats satisfaisants, car il a été utilisé comme déglaçant.

Deux des conditions de surface atteintes ont été jugées satisfaisantes : surface humide, dégagée et non glacée, et surface humide, avec des résidus et non glacée. Pour la première condition, elle a été observée pendant le suivi des opérations incluant l'épandage de deux produits liquides (Produits I à base de chlorure de magnésium et J à base de chlorure de calcium), et en une occasion après le suivi d'un produit solide (Produit D à base de dérivés naturels). Il semblerait que le nombre de passages de la pelle à lame lisse n'a pas eu un fort impact sur la condition de ce type de surface. Dans le cas du Produit J, il a même dissous la neige qui est tombée après l'intervention quelques heures plus tard.

Pour la condition de surface humide, avec des résidus et non glacée, elle a été observée pendant le suivi de l'application du Produit A (sel gemme, chlorure de sodium), du Produit C (à base de chlorure de sodium), du Produit D (à base de dérivés naturels) et du Produit H (à base de dérivés naturels). En général, l'activation chimique des produits solides sans activation mécanique comme dans le cas des interventions du présent projet pilote dépend uniquement de l'humidité et de la température lors des premières heures suivant l'épandage. Si les températures baissent subitement et l'air est sec, il n'y aura pas d'activation chimique sans activation mécanique, et donc les grains de sel et glace resteront à la surface de la dalle comme des abrasifs. Par contre, si la température monte et l'air est humide, l'activation chimique peut arriver plus rapidement. Dans tous les cas, sans activation mécanique, il sera difficile d'atteindre une surface sans résidus de glace ou grains de sel.

En ce qui concerne la quantité de produits à épandre pour obtenir des résultats satisfaisants, les essais ne permettent pas de tirer des conclusions puisque la remorque utilisée pour l'épandage de produit solide et la citerne pour l'épandage de produit liquide ne possédaient pas de systèmes de contrôle de dosage qui permettaient de mesurer avec précision les quantités de produits appliquées. Pour le cas des solides, l'épandeuse avait deux mesures d'ouvertures (minimum et maximum), sans une grande différence en ce qui concerne la quantité de produit, et à partir du troisième essai elle ne pouvait qu'appliquer la quantité maximale. Pour l'épandage des liquides, la buse mesurait seulement la pression hydraulique et nous avons mesuré la quantité avant et après les opérations. Dans le cas des liquides plus performants (Produits I et J), la qualité était semblable tant pour l'application maximale de produit que pour l'application minimale. Il convient de souligner que les quantités ont en effet un impact sur la condition de surface, mais que dans le cadre du présent projet pilote il a été impossible de démontrer une différence substantielle entre deux scénarios, car les quantités ont été similaires. Il serait pertinent donc de compter un système plus précis pour mesurer et doser les quantités de produits lors des opérations de déneigement futures.

Finalement, bien que quelques produits aient eu une activation plus rapide que d'autres, aucune surface n'a été complètement humide, sans neige, slush ou glace avant la fin des interventions. Toutes les surfaces jugées satisfaisantes ont été observées lors des visites de suivi, entre 6 à 8 heures après les opérations de déneigement conventionnel. Pour cette raison, un délai d'attente entre les interventions et une éventuelle ouverture de la piste serait souhaitable, afin de permettre aux produits de déglaçages de s'activer chimiquement et de faire fondre la neige et la glace.

La Figure 3.7-2 montre l'évaluation qualitative de l'efficacité des produits, du niveau de sécurité et de l'efficacité des opérations de déneigement, à partir d'une échelle de 1 à 10 (1 pour une faible efficacité, 10 pour une efficacité excellente), tel qu'évalué par le personnel qui a participé aux interventions et suivis.

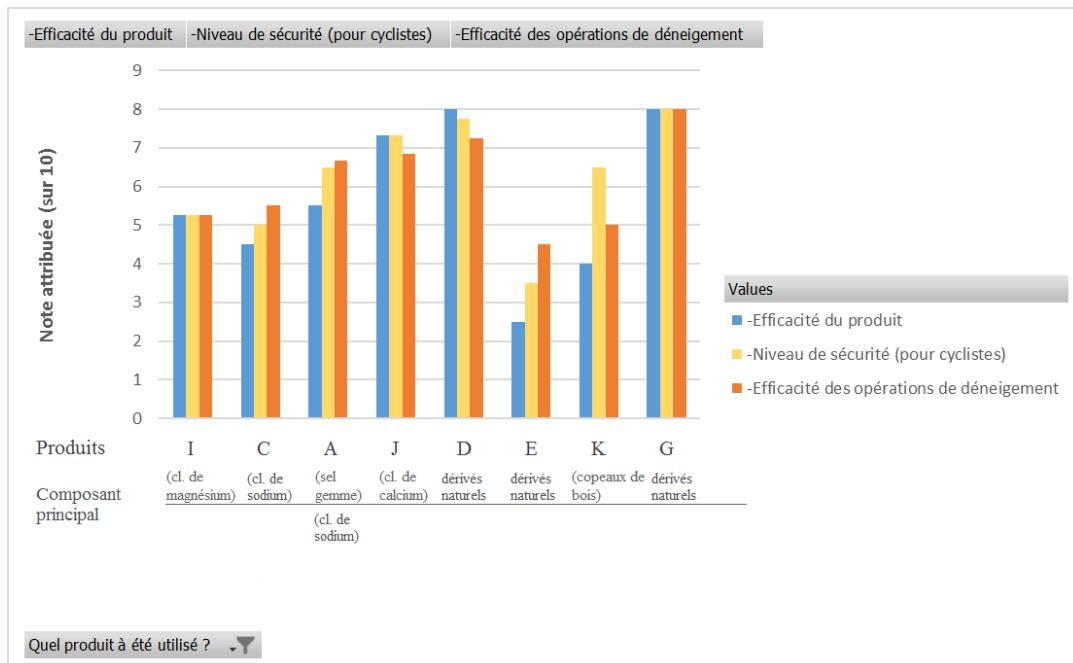


Figure 3.7-2 – Évaluation qualitative de l'efficacité du produit, niveau de sécurité et de l'efficacité des opérations de déneigement, à partir d'une échelle de 1 à 10

3.7.2 Largeur utile obtenue après le passage de la pelle à lame lisse

La lame du tracteur utilisée dans le projet pilote mesure 48 po. de largeur (1200 mm). Les interventions de base qui considèrent un passage de la pelle ont dégagé à peu près cette largeur, (voir Figure 3.7-3), et un peu moins si on considère les rebuts de neige ou glace qui sont rentrés dans la zone dégagée après le passage. Pour deux passages de la lame, il a été possible de dégager jusqu'à 1800 mm environ pour la neige poudreuse et pour la neige molle. Cependant, dans le cas de présence de verglas ou de la neige compacte et dure, il s'avère plus difficile de contrôler le tracteur et l'opérateur doit faire attention à maintenir le tracteur au milieu de la piste.

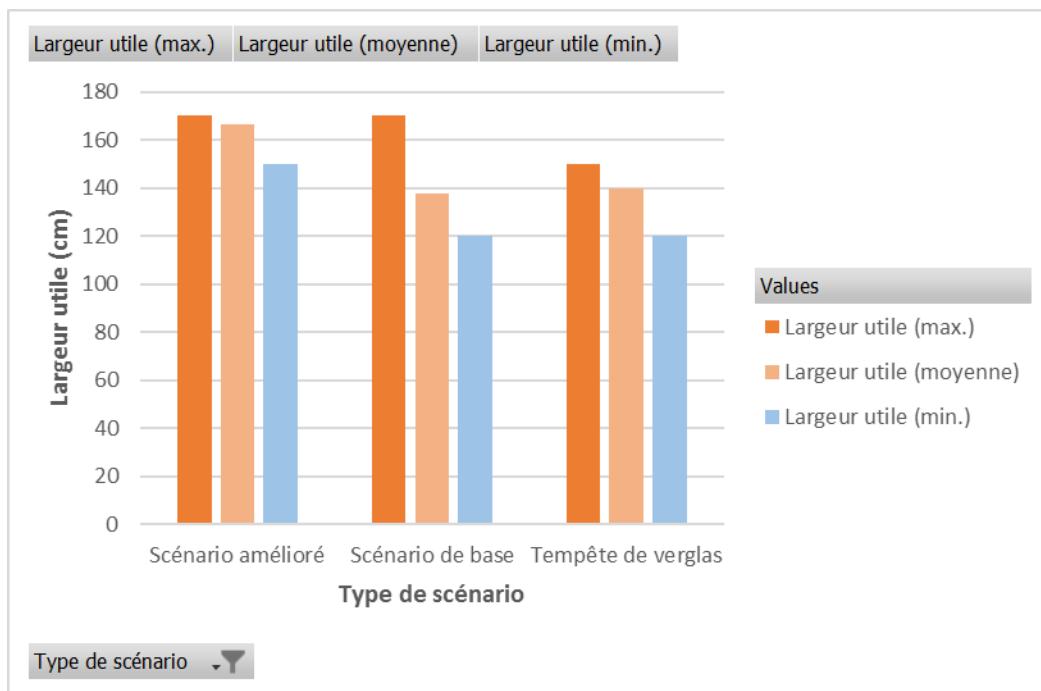


Figure 3.7-3 – Agrégation des largeurs utiles obtenues vs type d'intervention

3.7.3 Adhérence testée avec l'essai au pendule britannique (BP)

Les essais d'adhérence au pendule britannique ont été réalisés pour six interventions et leur suivi a été réalisé de 6 à 8 heures après. Les résultats ont été calibrés par le biais d'un essai en conditions estivales (+30 degrés Celsius, surface sèche), essai réalisé le 12 juin 2018. Les résultats des lectures du BPN sont montrés au Tableau 3.7-1, après correction par température de +30 °C et après la corrélation avec le CFT. Les valeurs BPN suggérées sont présentées dans la Figure 3.7-4. La procédure d'essai et les détails de l'essai de calibration sont présentés à l'annexe 3.3.

Nature du site	BPN minimum suggéré
Conditions difficiles	65
Urbain > 2000 véhicules par jour	55
Autres sites	45

À la lumière du tableau 1, une valeur minimale de BPN corrigée à 20°C de 45 devrait être visée sur la piste cyclable.

À titre indicatif, le MTMDET suggère les valeurs de CFT estival suivantes pour la gestion de son réseau routier :

- 0,00 à 0,25 Très pauvre, pavage à corriger
- 0,25 à 0,40 Médiocre, intervention requise
- 0,40 à 0,55 Satisfaisant
- 0,55 à 0,70 Bon à très bon
- 0,70 à 0,99 Excellent, moyenne des pavages neufs

Figure 3.7-4 : Extrait du rapport « Mesure de glissance sur la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier » - [REDACTED]

À noter que le niveau d'adhérence ciblé (c.-à-d. un BPN de 45, ce qui équivaut à un coefficient de frottement d'environ 0.48) est le résultat d'une approche conservatrice. En effet pour plusieurs villes, plus particulièrement celles en Amérique du Nord, la conception de nouvelles pistes cyclables se base sur des recommandations faites par la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)¹⁰ dans le cadre du document « Guide for the development of bicycle facilities ». En extrapolant les chiffres généralement employés dans la conception des routes, l'association recommande d'utiliser un coefficient de friction variant de 0.21 à 0.31 (consulter le Tableau 3.7-5), selon le type, la rugosité et l'état de la surface en question ainsi que la vitesse maximale autorisée sur la piste. Pour des cas de surfaces non-pavées, le coefficient de frottement à considérer pendant les phases de conception est réduit de 50%. En Finlande, les agences chargées de l'entretien hivernal du réseau routier et cyclable tolèrent un coefficient de frottement entre 0.15 et 0.25 pour les pistes multifonctionnelles¹¹. Une fois en dessous de ces valeurs cibles, les opérations de déneigement sont enclenchées afin de rétablir un niveau d'adhérence acceptable.

¹⁰ American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO (1999) Guide for the development of bicycle facilities, 86 pages

¹¹ Katko, K., “Goals and Methods of Winter Maintenance in Finland.” Transportation Research Record, No. 1387 (1993) 4 pages.

Tableau 3.7-5 : plage de coefficient de frottement à utiliser pendant les phases de conception de nouvelles pistes cyclables (AASHTO)

**Table 2. Minimum Radii for Paved Shared Use Paths
Based on 2% Superelevation Rates and 20° Lean Angle**

Design Speed (V) km/h	Friction Factor (f) (paved surface)	Minimum Radius (R) m	ft
(mph)			
20 (12)	0.31	10	(30)
30 (20)	0.28	24	(90)
40 (25)	0.25	47	(155)
50 (30)	0.21	86	(260)

Les constatations susmentionnées mènent aux conclusions suivantes :

- > Il a été observé une meilleure adhérence pour les Produits I et J (produits en forme liquide) pendant le suivi des 6 à 8 heures après les interventions. Ceci est cohérent avec la caractérisation de la condition de surface humide, dégagée et non glacée.
- > En général, l'adhérence à la surface est améliorée de 6 à 8 heures après l'application des produits. La Figure 3.7-6 montre les valeurs de la moyenne des lectures du BPN pendant les interventions de déneigement, et l'augmentation de l'adhérence après. Cette augmentation est cohérente avec le fait que les produits ont une activation chimique qui prend quelques heures à fondre la neige dans la zone appliquée.

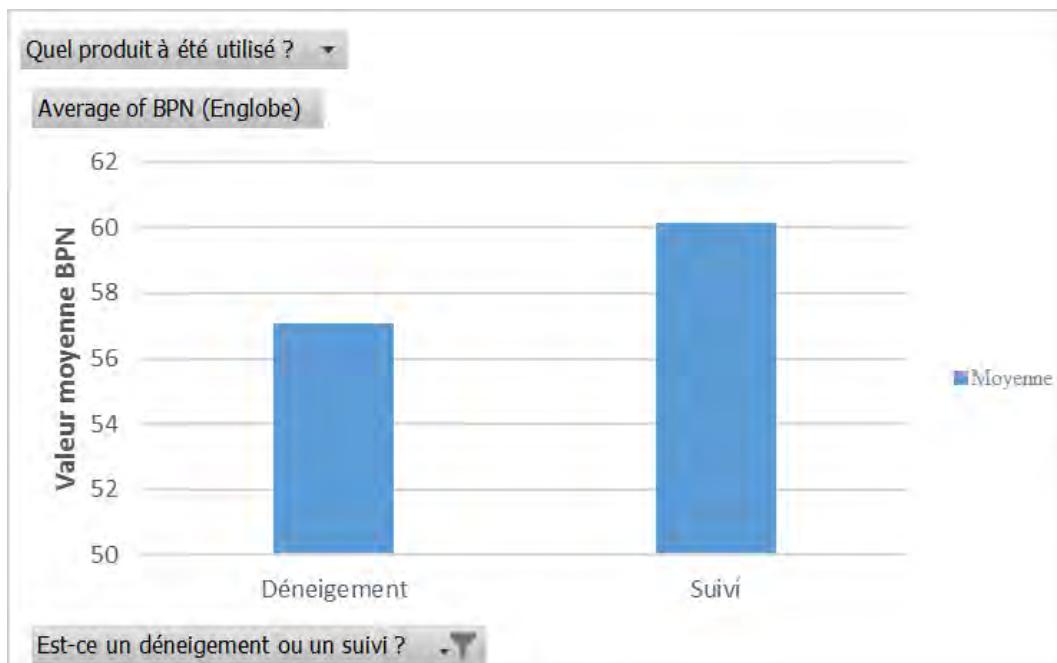


Figure 3.7-6 – Valeur moyenne des lectures avec le pendule britannique (BPN) pendant les interventions de déneigement et leur suivi de 6 à 8 heures après.

- > Les mesures pendant les interventions et pendant le suivi des produits solides sont difficiles à interpréter quand il y a une quantité de neige ou glace cumulée. En premier lieu, la première lecture du pendule à chaque point de mesure a été négligée, car la première passe du pendule sert à nettoyer la surface des grains de produit solide. Nous avons ensuite demandé au laboratoire d'ajouter la valeur de la première passe au tableau des résultats pour évaluer les différents produits. Par conséquent, les valeurs de la première passe pour les produits solides sont plus grandes, car les grains de produit solide retiennent le pendule, c'est-à-dire, augmentent la friction, ce qui arrive en réalité, car ils servent comme un abrasif qui augmente l'adhérence de la surface de roulement.
- > Bien que les valeurs d'adhérence des produits solides soient en général légèrement inférieures que celles des deux produits liquides plus performants, les valeurs mesurées pendant le suivi pour les Produits D et H sont au-dessus des valeurs recommandées pour des zones urbaines ($BPN > 55$).
- > Les conditions météorologiques sous lesquelles le Produit K avait été testé ont démontré une capacité insuffisante à fondre de la neige et de la glace dure. Bien qu'il soit qualifié d'abrasif, le Produit K n'a pas produit une surface adhérente. L'utilisation d'une plus grande quantité de copeaux pourrait potentiellement mener à des meilleurs résultats.

3.7.4 Durée des opérations de déneigement

Le délai nécessaire pour les opérations de déneigement dépend de plusieurs facteurs, dont la quantité et le type de précipitations, les conditions de surface, les équipements déployés, la vitesse d'avancement des véhicules de déneigement, le nombre de demi-tours (s'il y a

lieu), le nombre de chargements de remorque (si plusieurs produits de déglaçage sont utilisés lors d'une même opération de déneigement) et la période de transition entre les différentes phases de déneigement (soufflage, passage de la lame lisse, inspection visuelle, coordination liée à la fermeture des voies routières, etc.).

Dans le cadre du projet pilote, la durée approximative des opérations de déneigement entre la section 2 et 5 en fonction des scénarios les plus fréquents et selon notre retour d'expérience est présentée dans le Tableau 3.7-7.

Tableau 3.7-7 : Résumé de la durée approximative des opérations de déneigement entre les sections 2 et 5 du pont Jacques-Cartier

	Scénario	Cumul de neige (cm)	Durée approximative (hr)	Largeur utile obtenue (mm)
1	Passage de la lame lisse, en un aller-retour (supposant que le véhicule avance à 4 km/hr)	0 - 3	1.0	1200 - 1400
2	Passage de la lame lisse, en un aller-retour (supposant que le véhicule avance à 4 km/hr)	5+	1.0 - 1.5	~1200
3	Passage de la lame lisse et soufflage, en un aller-retour	15+	2.0 - 3.0+	1700 - 1800
4	Soufflage seulement, en un aller-retour entre la section 2 et 5	15+	2.0 - 4.0	~1500
5	Soufflage seulement (pleine largeur), en un aller simple	15+	4.0+	1700 - 1800
6	Soufflage seulement, en un aller-retour entre la section 2 et 5	-glace et verglas-	2.0 - 4.0	1200 - 1500

Comme le montre le Tableau 3.7-7, la durée des travaux faisant usage de la lame lisse (scénarios 1, 2 et 3) dépend principalement de l'accumulation de neige. La durée des opérations de soufflage, par contre, dépend de la méthode employée. Un premier passage de la lame lisse avant les opérations de soufflage diminue le temps des travaux, comme le montre une comparaison entre les scénarios 3, 4 et 5. Une opération de soufflage en pleine largeur et en un aller-simple (scénario 4) requiert plus de temps qu'une opération de soufflage en un aller-retour (scénario 5). Lors du scénario 5, la souffleuse avance au fur et à mesure en se coordonnant avec le camion accompagnateur sur une des voies routières afin de couvrir la largeur de la piste, comme l'illustre la Figure 3.7-8. Le scénario 6 portant sur les tempêtes de verglas survient plus rarement dans l'année et dépend fortement des changements de température et de l'étendue de la formation de glace au sol.

Le Tableau 3.7-7 présente également la largeur utile obtenue suite à chacune des opérations effectuées. Il a été constaté que la durée des opérations serait prolongée afin d'obtenir plus de largeur dégagée.

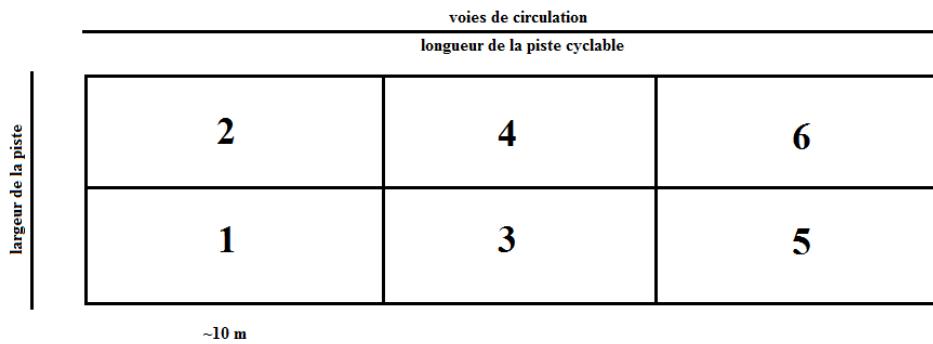


Figure 3.7-8 : séquence des passages de la souffleuse lors du scénario 5

3.7.5 Retour d'expérience pour le choix des équipements

Nous avons pu constater lors des essais du projet pilote que certains éléments sont importants pour le choix des équipements mécaniques, afin d'éviter des problèmes futurs lors de l'exécution des opérations de maintien :

3.7.5.1 Contrôle et mesure de l'épandage des produits solides et liquides

Un des problèmes rencontrés lors du projet pilote était l'impossibilité de mesurer de façon fiable la quantité exacte de produits appliqués, aussi bien liquide que solide. Pour l'épandeuse des produits liquides, le seul moyen de mesurer le débit appliqué était de mesurer la pression du jet de liquide, et calculer la quantité utilisée en mesurant le bac avant et après l'application des produits. Pour le cas de l'épandeuse des produits solides, il était impossible de régler le débit des produits et la quantité a été mesurée par rapport au nombre des sacs utilisés, ce qui ne donne pas une mesure précise des quantités.

Il serait pertinent de demander aux fournisseurs des équipements que les équipements soient munis des dispositifs pour contrôler et mesurer la quantité des produits de façon exacte et précise, et de le démontrer clairement avant d'adjudger un contrat de location ou achat des équipements.

3.7.5.2 Homogénéité de l'application des produits

Il a été constaté que l'application des produits n'était pas homogène ni uniforme, tant pour les produits solides et les produits liquides. Ceci ralentit la distribution du produit et le déglaçage de la neige ou de la glace sur toute la largeur de la piste, en créant des « rainures » ou traces où le produit est concentré. Il a été observé après quelques heures que les produits ont fini par dégeler la totalité de la piste, cependant la rapidité de la distribution peut varier d'un produit à l'autre. Donc, un système d'arrosage uniforme en forme d'éventail avec des buses à jet pourrait garantir un épandage homogène des produits.



Figure 3.7-9 : Remorque avec épanduse des produits liquides ; on observe le jet et la trace en forme des « rainures » sur la dalle

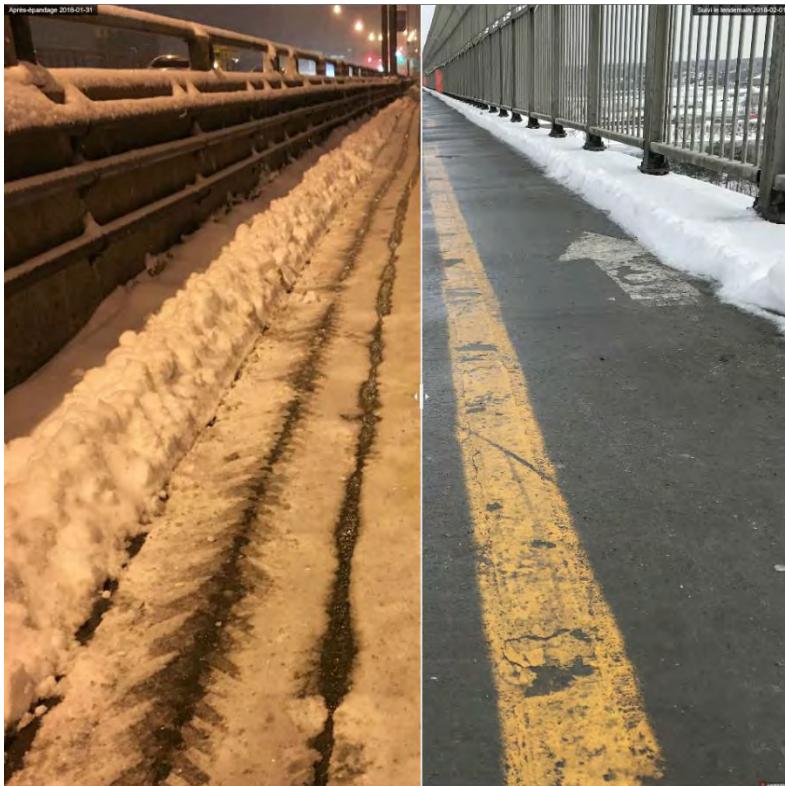


Figure 3.7-10 : Comparaison entre la surface de la dalle immédiatement après l'épandage des produits solides vs la condition de la surface 8 heures après. On observe que le produit s'est distribué graduellement sur toute la largeur de la dalle.



Figure 3.7-11 : Citerne pour l'aspersion des produits liquides (*Brine spreader*), Autoroute A1, R.-U. (source : XV International Winter Road Congress, 2018, Gdansk, Pologne).

3.7.5.3 Redondance et disponibilité des équipements

En effet, les caractéristiques très particulières des équipements de déneigement de la piste multifonctionnelle font que le remplacement de l'équipement ou d'une partie de celui-ci soit difficile, et la réparation desdits éléments prenne du temps. Un équipement de secours pourrait être également envisagé.

3.7.5.4 Déneigement mécanique des sections 3 et 7 de la piste multifonctionnelle

Le déneigement de la piste multifonctionnelle au niveau de la section 7 n'a pas fait l'objet d'un essai dans le cadre du présent projet pilote. Cependant, il devra se faire d'une façon planifiée et différente des autres sections du pont, car ces sections présentent des restrictions particulières :

- > Enclavement entre les clôtures anti-saut de chaque côté : du fait qu'il n'y a pas de glissière de sécurité du côté intérieur, la neige ne pourra pas être cumulée contre le côté intérieur comme pour les autres sections. En plus, la neige ne peut pas être soufflée dans les voies de circulation comme dans les autres sections ;
- > Structure du pont entre les voies et la piste : l'espace entre la piste et les voies pour la structure du pont crée un vide où la neige peut tomber accidentellement pendant les opérations de déneigement de la piste ou des voies routières du pont ;
- > Pente de la piste : le tablier de la piste est dirigé vers l'extérieur, au contraire des autres sections du pont. Ceci modifie le drainage du tablier, car l'eau se dirige naturellement vers l'amont du pont ;
- > Présence des belvédères de chaque côté de la pile 24 : du côté de la piste, la largeur totale est de 5800 mm.

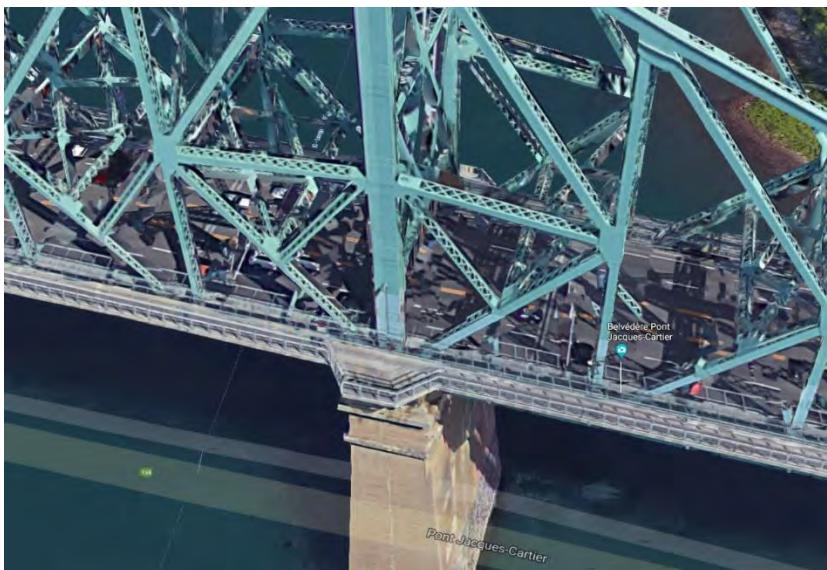


Figure 3.7-12 – Belvédère du côté de la piste, à la pile 24 de la section 7

Ces restrictions amènent une logistique spéciale pour le passage de la pelle à lame lisse et l'épandage des produits. Selon la quantité de neige cumulée, le passage de la pelle et autres équipements ne pourra pas se faire une seule fois, car le volume de neige sera tel que la pelle à lame lisse ne pourra pas la pousser en avant (la section 7 fait au total 590 m de longueur). Du fait de l'absence de la glissière de sécurité, la neige peut tomber dans le vide entre le tablier des voies et celui de la piste. Dans ces conditions, il faudra effectuer le passage de la pelle en continu durant les précipitations et à plusieurs reprises sur la section 7, afin de ne pas cumuler des volumes importants de neige qui puissent empêcher le poussage de la neige vers l'avant. Il sera peut-être nécessaire de considérer l'espace du belvédère pour faire le demi-tour des équipements ; le belvédère peut offrir l'espace suffisant, soit pour cumuler temporairement la neige venant du reste de la section 7, soit pour que la pelle à lame lisse puisse faire un demi-tour. Cependant les deux utilités ne peuvent avoir lieu simultanément. Il faudra toutefois vérifier la capacité portante de la structure en considérant le passage de l'équipement et l'accumulation de neige sur le belvédère. Cependant, la faisabilité de cette manœuvre devra être confirmée préalablement avec l'équipement de déneigement disponible. Un essai hors de la piste, avec la surface du belvédère marquée au sol, pourra être réalisé afin de confirmer cette option.

S'il est impossible de pousser la neige en avant en raison des accumulations sur la piste, alors il pourrait être possible de rejeter la neige directement dans le fleuve uniquement à la section 7 étant donné qu'un cas de rejet de neige non-contaminée ou transportée n'est pas abordé dans les réglementations environnementales (voir Section 5).

En outre, l'utilisation unique d'abrasifs (sable et graviers) sur la piste pourrait être un compromis afin d'assurer une adhérence suffisante pour les cyclistes tout en évitant des rejets dans le fleuve, limitant ainsi la pollution de la neige sur la piste. Des tests pourraient être effectués dans ce sens afin de confirmer l'efficacité des abrasifs.

La piste multifonctionnelle au niveau de la section 3 présente une typologie similaire ; cependant, grâce à sa courte longueur (75 m), il est possible que le déneigement puisse se

faire dans une seule direction, sans demi-tour, et cumuler la neige à chacune des extrémités de la section 3, aux axes 9 ou 10 en avançant tout droit. Il serait pertinent de confirmer la faisabilité de cette opération sur place et surtout en considération de la quantité de précipitation.

En général, il serait pertinent d'envisager une approche proactive lors des tempêtes majeures en se concentrant sur les sections 3 et 7 durant les précipitations. Cela pourrait faciliter les opérations futures en réduisant les accumulations de neige.

3.7.5.5 Cas particulier des tempêtes de verglas

Les précipitations du verglas doivent être traitées de façon différente aux précipitations de neige ou pluie, car le risque de glissance due aux conditions de surface gelée est, évidemment, plus élevé. L'objectif est d'éviter une condition de surface gelée ; tel qu'expliqué précédemment, il y a deux stratégies de maintien à être appliquées lors des tempêtes de verglas : le maintien préventif (dégagement de la surface et épandage des produits avant les précipitations), et le maintien curatif (dégagement de la surface et épandage des produits après les précipitations).

L'épandage des produits antigivrage en mode préventif a été essayé à deux reprises dans le cadre du projet pilote en utilisant le Produit E (liquide) ; cependant les résultats n'ont pas été concluants, car l'application n'a pas été réalisée sur une surface complètement sèche, et le produit n'a pas eu le temps de sécher non plus avant les précipitations. Ces deux exigences sont nécessaires pour qu'une opération antigivrage soit efficace. Même dans le cas des chaussées, où le passage des essieux des véhicules aide au séchage de la surface de roulement, le temps entre l'obtention d'une surface sèche et le temps pour que le produit soit sec est variable. Pour ces raisons, des opérations antigivrages réussissent rarement même sur une chaussée, et encore moins sur les trottoirs et pistes cyclables où il n'y a pas du trafic lourd pour aider l'assèchement de la surface.

La Ville de Montréal, par exemple, réalise l'épandage du sel et des abrasifs régulièrement sur une partie de leur réseau avant un épisode de verglas, mais il est pratiquement impossible d'éviter la formation du verglas pour tous les trottoirs de la Ville. Une des raisons est précisément l'absence d'activation mécanique du sel et du passage des essieux des véhicules, en plus du faible pouvoir antigivrant du sel.

Une possibilité est d'attendre la fin de l'épisode de verglas, en laissant la surface enneigée. Le verglas formera une couche de glace sur la neige, laissant une sorte de « sandwich de glace », qui est plus facile à enlever après avec la pelle à lame lisse, par rapport à la surface de la dalle glacée.



Figure 3.7-13 : Couche de neige couverte par une couche de glace, suite à la tempête de verglas du 23 janvier 2018.

Ce type d'intervention a été testée lors de la tempête de verglas du 23 janvier 2018. Une couche d'épaisseur entre 25 mm à 30 mm a été formée par-dessus de la neige. La piste multifonctionnelle a été dégagée suite au passage de la pelle à lame lisse ; cette opération a pris à peu près le double de temps pour le dégagement de neige seulement, car la couche de glace a été difficile à enlever. En plus, la glace s'est brisée en formant de grands blocs allant jusqu'au 2 x 1 pied, assez encombrants pour être dégagés rapidement. Quelques blocs de glace ont été cumulés au-dessous de la barrière dissuasive, dans l'espace entre la dalle et la lisse horizontale inférieure de la clôture. Des blocs de glace suspendus sont restés après le passage de la lame, parfois au-dessus des voies routières ou des zones avec du trafic piétonnier. Une solution potentielle serait d'ajouter une plaque métallique en dessous de la lisse horizontale de la clôture, et ceci dans toutes les zones qui se situent par-dessus des voies routières ou des zones piétonnières. Cette plaque métallique resterait également utile le long de l'année afin de protéger les usagers des voies sous-jacentes d'éventuelles chutes de débris, notamment pendant les opérations de nettoyage de la piste.

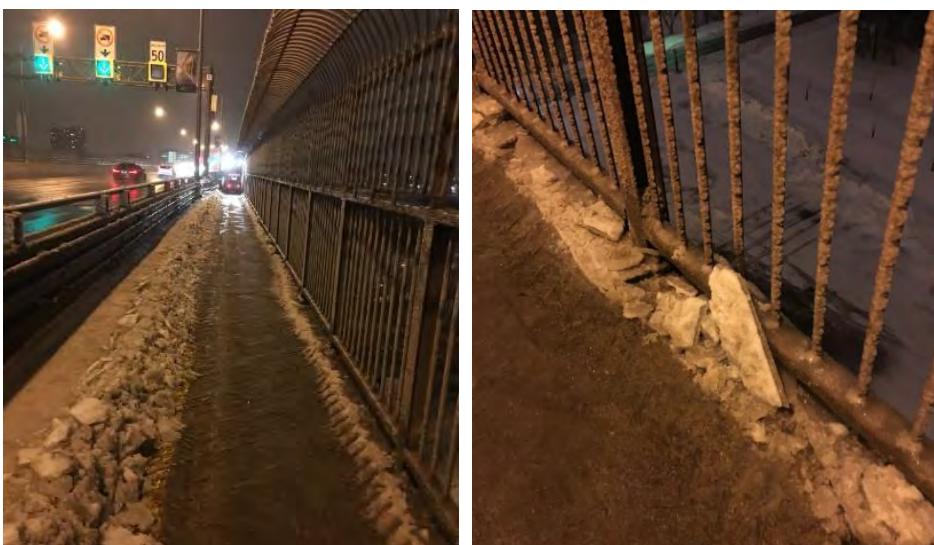


Figure 3.7-14 : Blocs de glace cumulés et accotés du côté de la glissière de sécurité et de la clôture anti-saut. Des blocs de grande taille ont été cumulés par-dessus de la lisse horizontale de la clôture.



Figure 3.7-15 : Clôture à neige installée par-dessus des voies routières, suite à la tempête de verglas du 23 janvier 2018.

Finalement, nous avons observé que les clôtures à neige installées au-dessus de la voie maritime et l'autoroute 132 se sont décrochées de leurs attaches et sont tombées sous le poids du verglas. Il faudra s'assurer que la clôture soit mieux attachée pour éviter qu'elle tombe en cas de tempête de verglas. Des ganivelles en bois ou tout autre matériau plus rigide pourraient être envisagés afin de prévenir leur chute sur la piste multifonctionnelle, en cas d'ouverture. Ceci n'exclut pas l'ajout de lisses en pied de clôture pour éviter que les blocs de glace tombent hors du pont.

3.8 Logigramme des opérations de maintien hivernal conventionnel

La réalisation du présent projet pilote nous a permis d'identifier les étapes du processus décisionnel pour la gestion hivernale de la piste multifonctionnelle, dans un logigramme stratégique (voir Figure 3.8-1).

Ce logigramme résume le processus de gestion interne que PJCCI pourrait adopter pour observer les conditions météorologiques et de la piste, les prévisions et alertes météorologiques, le suivi des conditions de surface, des précipitations, neige et glace sur la piste, la prise des décisions d'interventions nécessaires.

Ce logigramme porte un code de couleur selon la nature de l'activité concernée :

- > Bleu, activité de gestion interne : suivi météorologique, alertes et communications à la population, décision du type d'intervention, décision sur l'ouverture ou fermeture de la piste, suivi des conditions, etc.
- > Orange, composante météorologique : prévisions météorologiques, observations recueillies par la station météorologique, prévisions venant d'Environnement Canada.
- > Rouge, paramètres d'adhérence : État de la surface (condition de la surface et largeur utile), accumulation de neige et glace.
- > Magenta, mobilisation de la machinerie et équipements : grattage, soufflage, brossage, épandage des produits liquides ou solides.

LOGIGRAMME STRATÉGIQUE

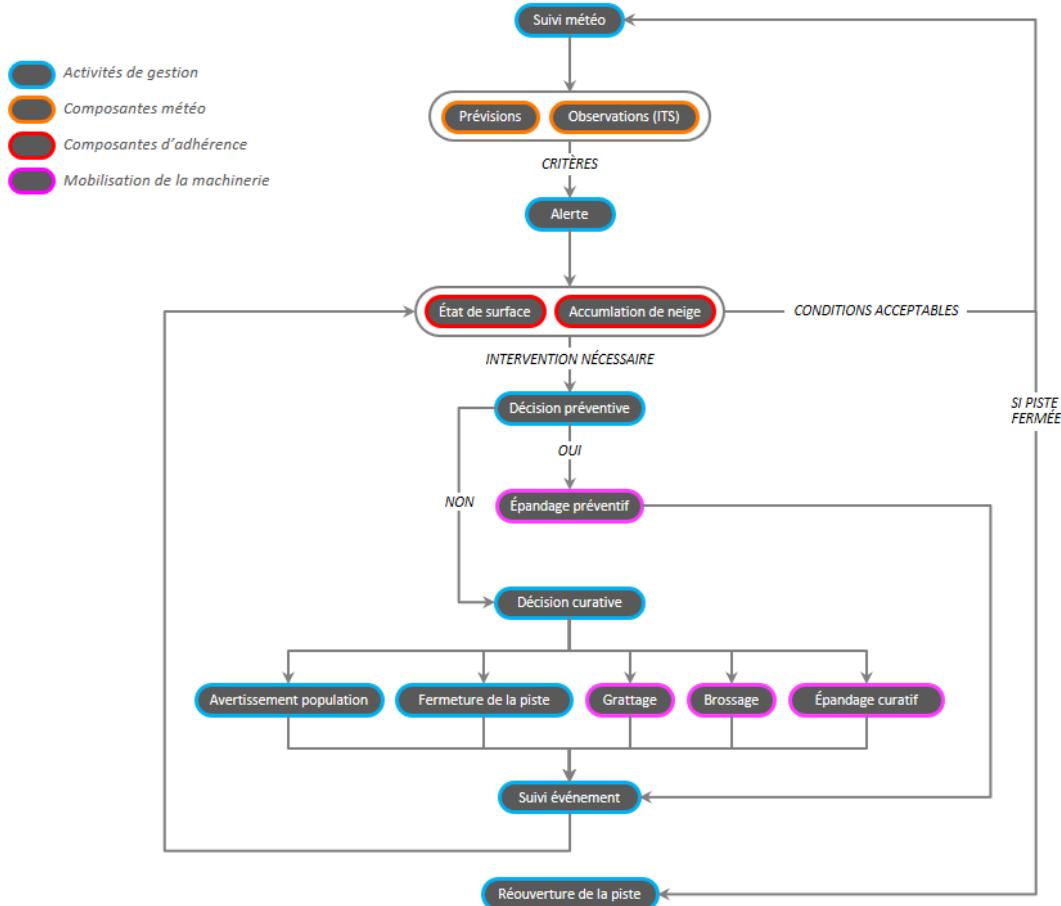


Figure 3.8-1 : Logigramme des opérations de maintien hivernal, au niveau stratégique

Les opérations d'épandage préventif et curatif, pendant et après les précipitations, sont résumées dans les logigrammes des Figure 3.8-2 et Figure 3.8-3. Les activités et composantes de ces logigrammes incluent le même code des couleurs que le logigramme stratégique.

Il est important de noter que nous avons aussi considéré l'épandage préventif des produits, c'est-à-dire, l'épandage des produits de déglaçage avant les précipitations. Cependant, tel qu'expliqué précédemment, l'application des produits de déglaçage de façon préventive s'avère généralement impraticable pour la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier.

Finalement, nos essais et interventions pour ce projet pilote ont été orientés vers l'épandage curatif après les précipitations ; il est recommandé pour les étapes à venir de considérer l'utilisation d'un balai rotatif afin de faciliter les opérations d'épandage curatif pendant les précipitations.

ÉPANDAGE PRÉVENTIF



ÉPANDAGE CURATIF (pendant les précipitations)

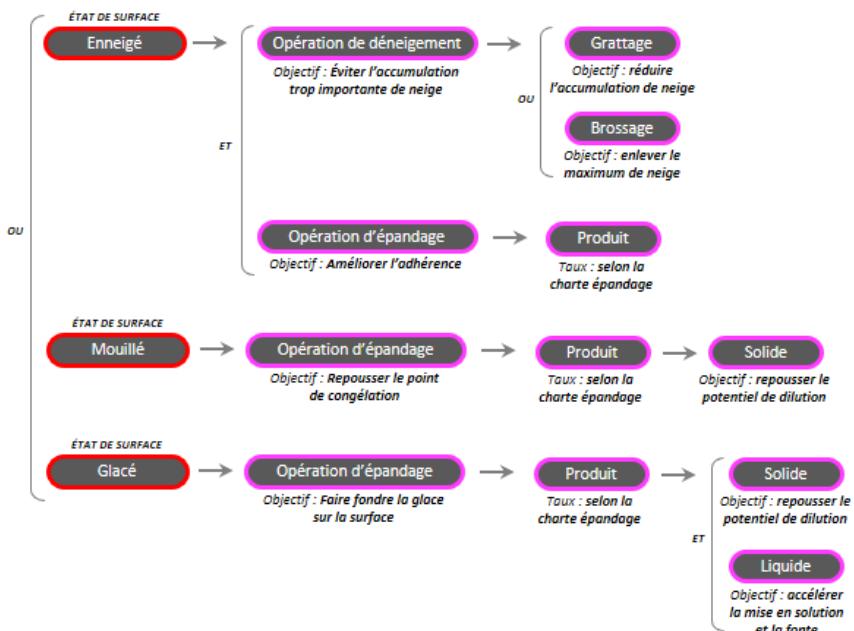


Figure 3.8-2 : Logigramme des opérations d'épandage préventif et curatif pendant les précipitations

ÉPANDAGE CURATIF (après les précipitations)

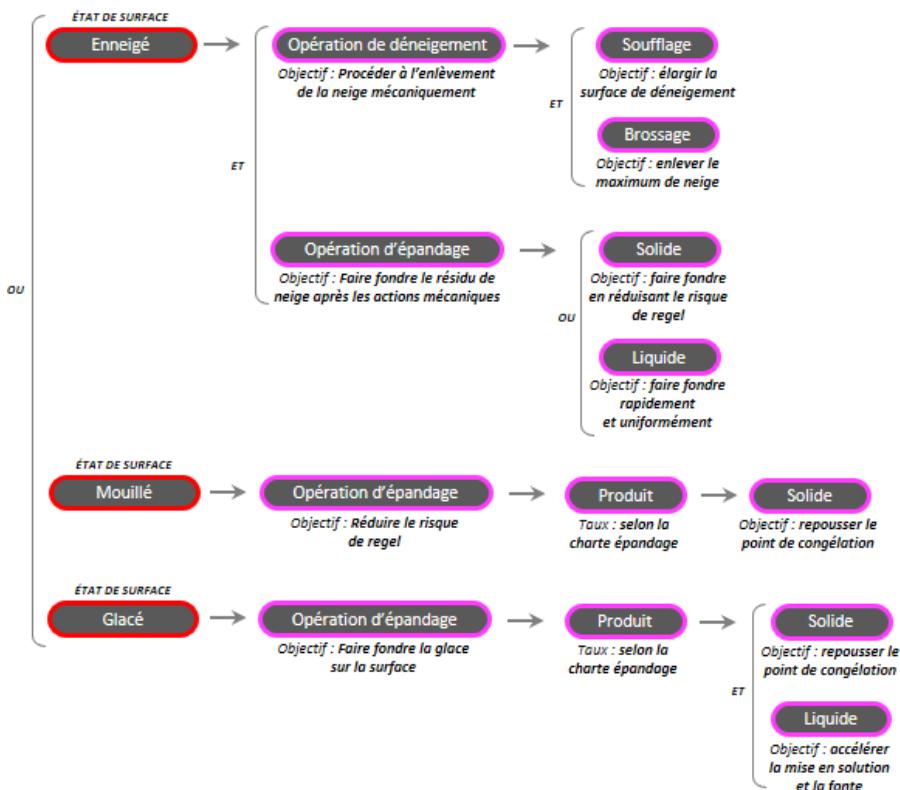


Figure 3.8-3 : Logigramme des opérations d'épandage curatif après les précipitations

3.9 Opérations de déneigement du trottoir

Le trottoir du pont Jacques-Cartier se trouve du côté aval du tablier, c'est-à-dire côté est. Le trottoir a une largeur utile de 1250 mm (mesurée à la section 6).



Figure 3.9-1 : Trottoir du pont Jacques-Cartier (Section 6)

Le présent projet pilote n'a pas comme objectif de tester la viabilité hivernale sur le trottoir du pont Jacques-Cartier. Cependant, si la décision de la Société est de procéder à l'ouverture du trottoir en hiver, il est préférable de commencer par des essais de déneigement sur le trottoir.

Les points suivants sont à prendre en considération lors de ces futurs potentiels essais :

- > **Condition de surface minimale :** il est nécessaire d'évaluer la condition de surface et l'adhérence associée qui seront nécessaires pour le trottoir en hiver. Il est entendu que les conditions d'adhérence pour le trottoir peuvent être moindres que celles exigées aux pistes cyclables, mais il est nécessaire d'estimer avec précision quelles sont les conditions de surface cible pour le trottoir. Selon la référence « *The assessment of pedestrian slip risk* », Health & Safety Laboratory, UK, les valeurs recommandées pour les mesures de glissance avec le pendule britannique pour assurer une adhérence en zone piétonnière sont les suivants :

Table 1 Slip risk classification, based on pendulum test values

Pendulum value	Slip risk
0-24	High
25-35	Moderate
36-64	Low
65 +	Extremely low

Figure 3.9-2 – Valeurs recommandées d’adhérence selon le pendule britannique et le risque de glissance en zone piétonnière, tirées de « *The assessment of pedestrian slip risk* », Health & Safety Laboratory, UK

- > **Largeur utile disponible :** tel que discuté en Section 2.3, la largeur disponible au trottoir est en deçà des normes, mais surtout, peut se révéler problématique pour la circulation et surtout le croisement de certains usagers. En conditions hivernales, en présence d'une forte quantité de neige, les dimensions réduites n'aideront pas au déneigement du trottoir et risquent ainsi de favoriser l'accumulation de neige ; d'autant plus du côté de la circulation routière à cause des projections des engins de déneigement sur voie (voir Section 7.3.2). Cette accumulation pourrait réduire davantage l'accessibilité du trottoir aux usagers.

Cependant, de manière similaire aux conditions d'utilisation des trottoirs en ville **dans les jours suivants une tempête**, l'accessibilité n'est pas toujours idéale pour tous les usagers. Étant donné l'achalandage très réduit qui en découle, la largeur utile nécessaire est très discutable. Il s'agira d'avantage d'enlever le maximum de neige afin de prévenir le risque de regel, ou d'accumulation trop importante, tout en conservant un « chemin » d'accès pour les usagers.



Figure 3.9-3 – État des trottoirs dans les jours suivants une tempête à Montréal -
<http://ville.montreal.qc.ca>

- > **Équipement approprié :** les dimensions de la lame et de la souffleuse utilisées actuellement par les services d'Opération Entretien de la Société sont plus larges que le trottoir (1300 mm). Dès lors une autre gamme d'équipement est nécessaire. Quelques exemples d'équipements sont montrés ci-après. Il faut envisager également des manœuvres et des opérations particulières sur les sections 3 et 7 où l'absence de la glissière de sécurité rend les opérations plus complexes, similairement à celles de la piste multifonctionnelle (voir section 3.7.5.4).



Figure 3.9-4 : Exemple de souffleuse de petit format, Équipements Motorisés St-Nicolas©



Figure 3.9-5 : Exemple d'épandeur à sel de petit format, aussi disponible en version liquide, EpandeuseGranby©

- > **Déneigement manuel :** si l'utilisation des équipements appropriés pour le déneigement mécanique du trottoir s'avère difficile, il sera pertinent de considérer le déneigement manuel. Une attention particulière devra être prise à la disponibilité de travailleurs et leur nombre, afin de déneiger le trottoir rapidement et assurer son ouverture au moment opportun.
- > **Rejet de neige dans le fleuve (sections 3 et 7) :** en fonction de la condition de surface et adhérence minimales et des équipements qui pourront accéder, il est envisageable d'avoir une stratégie de maintien hivernal avec un épandage réduit, voire nul, de produits chimiques. L'action combinée des équipements mécaniques et l'épandage d'abrasifs (sels, gravier) pourraient fournir une condition de surface satisfaisante dans la plupart des cas.
- > **Appliquer une membrane d'étanchéité,** en cas d'application de produits chimiques (voir Section 4.2 sur la durabilité).

- > **Capacité portante :** dépendamment de la stratégie employée, des études de capacité portante pourraient s'avérer nécessaires. Cependant la faible dimension disponible pour les engins de déneigement limite drastiquement la surcharge possible sur le trottoir.
- > **Comptages :** tel que recommandé pour la piste multifonctionnelle, afin d'estimer l'achalandage réel du trottoir et réviser la viabilité de l'ouverture hivernale, il pourrait être intéressant d'installer un compteur sur le trottoir.

4 Durabilité de la dalle de béton

4.1 Analyse qualitative – Évaluation des produits déglaçant et leurs effets sur la dalle

Cette section offre une évaluation sommaire des risques associés à l'utilisation de produits de déglaçage dans le cadre du présent mandat afin de potentiellement les employer sur la piste multifonctionnelle. Une comparaison, ainsi qu'une évaluation des risques liés à la détérioration du béton et à la corrosion des armatures ont été effectuées dans cette section.

Généralement, les produits de déglaçage utilisés sur les chaussées d'autoroute ou ponts contiennent des produits chimiques tels que du chlorure de sodium ou sel déglaçant (NaCl), chlorure de calcium (CaCl_2), chlorure de magnésium (MgCl_2), acétate de magnésium calcique (CAM), et autres. Les produits de déglaçage à base de chlorure ont un fort pouvoir corrosif sur les aciers ; ainsi les produits moins corrosifs tels que l'acétate alcalin et le formiate alcalin, généralement utilisés sur les aérodromes, ainsi que les produits de déglaçage alternatifs organiques et écologiques sont également considérés.

Il est important de mentionner que ces produits ont des effets nuisibles sur l'environnement. Une analyse environnementale plus poussée est fournie à la Section 5.

4.1.1 Mécanismes de détérioration

Les surfaces de béton recevant l'application d'agents chimiques déglaçant à base de chlorure sont sujettes à l'une des combinaisons de mécanisme de détérioration suivantes :

> Attaque du gel / dégel avec ou sans sel déglaçant

L'interaction entre le transfert de l'humidité et la formation de glace dans le béton favorise la fissuration (gel interne / dommage du dégel), l'écaillage (gel externe / dommage du dégel), ou les deux. Le gel / dégel combinés à une exposition aux sels déglaçant, lesquels sont concentrés dans les zones d'éclaboussures des structures routières, s'avèrent souvent plus dommageable que l'action seule du gel / dégel.

> Corrosion de l'armature causée par le chlorure

Dans le béton, l'armature est protégée contre la corrosion en raison de la haute alcalinité de la solution interstitielle. Une mince couche d'oxyde de fer, aussi appelée couche passive, est formée et protège l'armature. L'infiltration de chlorure provenant des sels déglaçant ou de l'eau saline peut détruire la couche passive si une concentration importante de chlorure atteint la surface de l'acier.

> Accélération de la réaction alcali-granulat causée par les alcalins extérieurs

La réaction alcali-granulat (RAG) cause des réactions chimiques dommageables entre les alcalis de la pâte de ciment et la silice ou carbonate retrouvé dans l'agrégat, menant à une expansion à l'intérieur du matériau, à l'écaillage, à la perte de résistance, et, dans des cas extrêmes, à la rupture. Pour favoriser la RAG, une combinaison d'agrégats réactifs, d'humidité adéquate, et d'alcalis doit être présente dans l'élément de béton.

S'il manque l'une ou plusieurs de ces conditions, la réaction sera évitée. Par contre, la présence d'un environnement humide et de surfaces exposées à l'application directe de déglaçant peuvent former une source externe d'alcalis pouvant initier et accélérer ces réactions expansives.

> Attaque chimique

Les solutions très concentrées d'agents déglaçant, particulièrement les chlorures alcalino-terreux (magnésium, calcium, etc.), ne causent pas de dommage par gel / dégel puisque les solutions interstitielles dans béton ne gèlent pas. Cependant, elles peuvent toujours causer des dommages par la formation de calcium et d'oxychlorures de magnésium. Dans ce cas, les sels déglaçant réagissent avec les composantes de la solution interstitielle. Les sels complexes qui en résultent peuvent produire une pression de cristallisation explosive qui à son tour entraîne l'écaillage et la fissuration des spécimens de béton.

Selon l'historique de construction du pont Jacques-Cartier, des fumées de silice ont été utilisées dans le béton du tablier lors de son remplacement. Celles-ci préviennent les mécanismes de détérioration 1) et 2) mentionnés ci-dessus.

Les spécifications techniques Réf. SMDB-014256-0000-40ES-01-Rev.2 datées du 15 mars 2001 spécifient les limites de composition du béton du tablier à utiliser :

Ciment de type 10SF

- > Résistance à la compression minimale : 50 MPa
- > Rapport e/c maximal : 0.34
- > Teneur en ciment minimale : 400 kg/m³
- > Teneur en air minimale : 3,0%
- > Facteur d'espacement : 230 µm (ASTM C457)
- > Perméabilité maximale des chlorures (essai rapide) : 800 coulombs à 28 jours (ASTM C1202)

Nous supposons que la phase de conception n'a pas tenu compte de l'effet de la RAG accélérée dû à l'apport externe d'alcalis des sels déglaçant et, plus encore, l'attaque chimique du béton en raison de la formation possible de calcium et d'oxychlorures de magnésium¹². Les sels complexes qui en résultent peuvent produire une pression de cristallisation explosive à même la surface du béton qui à son tour entraîne l'écaillage et la fissuration¹³.

Il est donc nécessaire d'évaluer le risque de la RAG accélérée et/ou d'attaque chimique induit par les agents proposés. Notez que la RAG accélérée n'est préoccupante que lorsque

¹² SDOT, Michigan Tech Transportation Institute, The Deleterious Chemical Effects of Concentrated Deicing Solutions on Portland Cement Concrete, Houghton, 2008.

¹³ VDZ Activity Report 2012–2015, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf.

l'un ou les deux types d'agrégats, fins et grossiers, utilisés dans le béton sont potentiellement réactifs.

4.1.2 Analyse des agents chimiques proposés

Le Tableau 4.1-1 présente une évaluation comparative de différents produits de déglaçage proposés et du chlorure de sodium (sel gemme), fréquemment utilisé, basée sur la littérature.

La littérature¹³ montre que :

- > Le chlorure de magnésium et le chlorure de calcium interagissent chimiquement avec la pâte de ciment portland durcie dans le béton, ce qui entraîne la fissuration due à l'expansion, la perméabilité augmentée, et la perte significative de résistance à la compression. Les bétons à fort taux de laitier granulé finement broyé de haut fourneau (GGBS) ont démontré une résistance à ces mélanges. (NB : d'autres sources suggèrent aussi que les bétons à fort taux de GGBS peuvent s'écailler sous les effets des cycles de gel / dégel) ;
- > Les mêmes effets ne sont pas observés avec les saumures de chlorure de sodium ; cependant, ces derniers ont le taux le plus élevé de diffusion dans le béton durci. Ce dernier fait est important en ce qui concerne le risque de corrosion des armatures d'acier et doit donc être considéré.

Tableau 4.1-1 : Facteurs de risques selon la littérature sur les études du WSDOT¹⁴ et SDOT

Nom du produit	Composant principal	Facteur de risque		
		RAG accéléré	Attaque chimique	Corrosion
Produit A (sel gemme)	Chlorure de sodium, NaCl	1	1	4
Produit B (saumure)	Chlorure de sodium, NaCl + Eau	1	1	3
Produit I	Chlorure de magnésium, MgCl ₂	0	3 ; 4 (avec agrégat dolomitique)	2 à 3
Produit J	Chlorure de calcium, CaCl ₂	0	2 ; 4 (avec agrégat dolomitique)	2 à 3
Produit C	Chlorure de sodium, NaCl ; Chlorure de magnésium, MgCl ₂ ; Chlorure de calcium, CaCl ₂	1	2	4
Produit D	Jus de betterave ; Chlorure de sodium, NaCl	0	0	2
Produit E	Jus de betterave ; Chlorure de sodium, NaCl	0	0	2
Produit G	Jus de betterave, maïs, soja	0	0	1
Produit F	Acétate de potassium, un composé breveté à base d'un Polyol	1	0	0
Produit H	Glycol et composants naturels non identifiés	0	0	0
Produit K	Chlorure de magnésium, MgCl ₂ + morceaux de bois	0	2 ; 3 (avec agrégat dolomitique)	2

Légende

Résultat	RAG accélérée	Attaque chimique	Corrosion
0	Aucune expansion	Aucune attaque	Aucune corrosion
1	Expansion réduite	Attaque réduite avec expansion limitée	Vitesse de pénétration réduite
2	Expansion modérée	Expansion et fissuration modérées	Vitesse de pénétration modérée
3	Expansion élevée	Expansion et fissuration élevées	Vitesse de pénétration élevée
4	Expansion extrême	Expansion et fissuration extrême en présence d'agrégats dolomiques	Vitesse de pénétration et niveau de corrosion élevée

Autres comparaisons¹⁴ WSDOT, Effect of chloride-based deicers on reinforced concrete structures, July 2010

Le Tableau 4.1-2 ci-dessous, montre une comparaison simplifiée des types de chlorures proposés. Il résume la performance des agents déglaçant en matière de nocivité, capacité de fonte de la glace, facteur de gaspillage, pouvoir déglaçant et prix.

Tableau 4.1-2 : Comparaison des différents produits de déglaçage

Ref. #	Désignation	Catégorie de déglaçant	Composition	Fonte de la glace	Forme	Gaspillage	Pouvoir déglaçant (-9 à 0 °C) ¹	Pouvoir déglaçant (-29 à -9 °C) ¹	Taux d'application estimé ³	Prix ⁴
1	Produit A (sel gemme)	Chlorures	Chlorure de sodium	Oui	Solide	N	O	N	85 - 350 kg/km-voie ¹	~ 70 USD/tonne
2	Produit B (saumure)	Chlorures	Chlorure de sodium	Oui	Liquide	O	O	N	dnd	~ 0.15 USD/gallon
3	Produit I	Chlorures	Chlorure de magnésium	Oui	Liquide	O	O	O	60 -100 L/km-voie ²	0.79 \$/kg
4	Produit J	Chlorures	Chlorure de calcium	Oui	Liquide	O	O	O	dnd	0.61 \$/kg
5	Produit K	Chlorures	Chlorure de magnésium + copeaux de bois	Non	Solide	N	dnd	dnd	dnd	dnd
6	Produit C	Chlorures	Chlorure de sodium avec traces de calcium et de magnésium	Oui	Solide	N	O	N	85 - 350 kg/km-voie ¹	dnd
7	Produit D	Bio	Jus de betterave et chlorure de sodium	Oui	Solide	N	O	O	85 - 350 kg/km-voie ¹	0.72 \$/kg
8	Produit E	Bio	Jus de betterave et chlorure de sodium	Oui	Liquide	O	O	O	45 L/km-voie (anti-givrage) ²	1.52 \$/kg
9	Produit G	Bio	Jus de betterave, maïs, soja	Oui	Solide	N	O	O	85 - 350 kg/km-voie ¹	3.11 \$/kg
10	Produit H	Bio	Glycol et composants naturels non identifiés	Oui	Liquide	O	O	O	115 L/km-voie ²	2.04 \$/kg
11	Produit F	Acétate	Acétate de potassium	Oui	Liquide	O	O	O	140 L/km-voie ²	dnd

Notes :

dnd – données non disponibles (aucune publication)

¹ Ministère des Transports de Colorado, 2001² recommandations des fournisseurs³ les taux d'applications, estimés pour des voies routières, varient selon la température de surface actuelle⁴ USD = dollar américain; \$ = dollar canadien

Réflexion sur la durabilité

De manière générale, la stratégie adoptée lors de la phase de conception d'infrastructure est de mettre l'emphase sur les bétons à hautes performances, moins perméable et présentant un risque de fissuration faible, en utilisant des adjuvants cimentaires (AC). Ceci favorise ainsi l'utilisation de produits déglaçant à base de chlorure plutôt que considérer des produits non corrosifs plus dispendieux.

Cependant, lors des opérations et phases d'entretien d'une structure existante, le degré de fissuration et les conséquences de rupture doivent malgré tout être pris en considération lors de la sélection d'agents déglaçant.

Agents déglaçant à base de chlorure pour le béton non fissuré

Bien que le tablier du pont ait été construit avec du béton microsilicé, il est impossible de confirmer que la formule du mélange contrôlera le risque de réactions expansives sans faire de test à cause de la formation de calcium et d'oxychlorure de magnésium. En cas d'utilisation de **chlorure de magnésium** liquide seul, l'installation d'une membrane de protection rigide est requise ; sinon, des études additionnelles et/ou des essais doivent être faits pour confirmer son impact.

Les déglaçant de **chlorure de calcium** aussi ne sont pas recommandés comme seul agent, mais il est possible qu'un faible pourcentage (environ 5-10%) puisse être utilisé en combinaison avec du chlorure de sodium, lequel est moins dommageable, afin d'augmenter le point de fusion de la glace à une température de -9°C, particulièrement de -15°C. Si le chlorure de sodium est utilisé sur du béton non recouvert, une analyse de durabilité devra être réalisée pour s'assurer que la durée de vie du tablier est atteinte.

La saumure de sel est alors recommandée pour optimiser la performance de déglaçage/dégivrage et pour minimiser les risques au béton, particulièrement une combinaison de chlorure de sodium avec du chlorure de calcium.

Une autre option serait d'utiliser un produit dont le mélange est à base de sucre de betterave avec une petite concentration de sel pour accélérer et améliorer la performance de déglaçage à une température de -15°C. Un produit similaire est utilisé dans la ville de Toronto (aussi mentionné dans *PJCCI 92003 Annexe 5 - Études d'alternatives aux sels de déglaçage*).

La recommandation d'agents déglaçant à base de chlorure ci-dessus est valide quand les surfaces ne sont pas fissurées et/ou les conséquences de ruptures, en cas de renforcement de corrosion, n'impliquent pas de perte économique substantielle ou de perte de durée de vie. D'autre part, les agents déglaçant à base de chlorure ne devraient pas être appliqués par-dessus des éléments pré- ou post-contraints, particulièrement si les surfaces sont fissurées en raison de risque d'effondrement immédiat.

Alternatives ou produit de déglaçage à base d'acétate pour béton fissuré

Les agents déglaçant à base d'acétate tel que l'acétate de potassium (KAc) et l'acétate de calcium-magnésium (CMA) sont utilisés sur certaines routes pendant la saison hivernale en tant qu'alternatives non corrosives au chlorure dans le béton armé. Le KAc, en particulier, est utilisé pour contrôler la neige et la glace sur les pavés d'aérodromes puisqu'il offre un faible risque de corrosion aux avions.

Certaines études^{15 16} montrent que le KAc et CMA peuvent attaquer le béton (notez que ces études ne sont pas toutes en accord). Le KAc peut aussi être induire une expansion de RAG si les agrégats sont réactifs. Cependant, il est supposé que le laitier de ciment pourrait atténuer et contrôler la réaction d'expansion. Finalement, le CMA cause généralement la perte de section (attaque chimique).

Les acétates de potassium (KAc) ne sont pas corrosifs à l'acier doux, mais sont corrosifs à l'acier galvanisé. D'autre part, les CMA ne sont pas corrosifs à l'acier galvanisé.

De plus, les acétates ne sont pas recommandés d'être utilisés comme produit de déglaçage pour les pavés d'asphalte. En fonction du type de liant d'asphalte, la dégradation et la désintégration du pavé d'asphalte, le ramollissement du liant d'asphalte, et l'arrachage de l'asphalte par abrasion accélérée du trafic sont des paramètres importants à considérer.

En termes de risque environnemental, les acétates sont généralement considérés toxiques pour l'environnement aquatique puisqu'ils réduisent les niveaux d'oxygène dissous dans les eaux de surfaces et réduisent donc l'oxygène dissous disponible pour les organismes aquatiques. C'est pour cette raison qu'un contrôle adéquat des décharges doit être mis sur pied.

Les agents déglaçant à base d'acétate, particulièrement le KAc est recommandé considérant que l'on assume que la majorité des surfaces exposées sont fissurées et sont donc prédisposées à la rupture causée par la corrosion de l'armature. Par contre, avant d'utiliser un produit KAc, il serait pertinent d'effectuer :

- > Une évaluation de risque environnemental soit effectuée ;
- > L'application de KAc n'affecte pas les pavés d'asphalte avoisinant ;
- > KAc ne soit pas appliqué sur l'armature galvanisée puisqu'il est autant corrosif que les déglaçant de chlorure.

Les agents déglaçant CMA peuvent être utilisés à condition que des tests spécifiques démontrent qu'il n'y a pas d'attaque chimique ni de perte de section, notamment :

- > Taux de rebond (adhérence insuffisante à la route, particulièrement si celle-ci est inclinée) ;
- > Couleur du déglaçant (connaissance d'application récente) ;
- > Grosseur du grain d'un déglaçant sous forme solide ;
- > Pouvoir de fonte de la glace ;
- > Caractéristiques de friction du déglaçant sur différentes surfaces de roulement.

Il serait également pertinent d'adopter une approche proactive pour l'inspection et l'entretien et faire un suivi des éléments suivants afin que les problèmes de corrosion soient détectés le plus tôt possible :

¹⁵ SDOT, Michigan Tech Transportation Institute, The Deleterious Chemical Effects of Concentrated Deicing Solutions on Portland Cement Concrete, Houghton, 2008.

¹⁶ WSDOT, Effect of chloride-based deicers on reinforced concrete structures, July 2010

- > Aux joints de construction où une armature non inoxydable a été utilisée (imperméabiliser ces régions si nécessaire) ; et
- > Au niveau du système de drainage et aux éléments alentours.

4.2 Analyse quantitative – Analyse de durabilité

Dans cette section, les risques de détérioration du béton, et corrosion des armatures dans les dalles en béton sont évalués.

Les documents d'exécution et les spécifications du contrat de fabrication des dalles en béton ont été utilisés pour illustrer la progression de la pénétration des ions chlorure dans le béton et estimer la durée de vie des éléments analysés.

À l'exception des observations de fissures dans les dalles, aucune autre inspection relative à la durabilité des dalles n'a été effectuée. Le rapport a été écrit en fonction de ceci.

Ce rapport d'évaluation de la durabilité adresse les points suivants :

- > Décrire les conditions d'exposition environnementale affectant les éléments en béton de la piste multifonctionnelle ;
- > Identifier les mécanismes de détérioration principaux responsables de la rupture d'éléments ;
- > Proposer des stratégies durables afin d'éviter ou de retarder la corrosion des éléments en béton armé tel que requis pour la gestion de la durée de vie ;
- > Propositions de raffinement des calculs de durabilité en tenant compte de données d'inspection telles que l'enrobage des armatures, le profil chlorhydrique, et les données d'instrumentation spécifique à la propagation de la corrosion.

Les dessins tels que construits¹⁷ et les spécifications du contrat pour le béton¹⁸ ont été utilisés afin de développer cette analyse.

4.2.1 Exposition au climat et au milieu

Les éléments en béton constituant la piste multifonctionnelle sont exposés aux conditions météorologiques de la ville de Montréal, au méso- et microclimat ainsi qu'aux conditions du milieu extérieur environnant associées à la structure et ses éléments.

L'exposition au milieu environnant peut impliquer les mécanismes de détériorations suivants :

- > Attaque du gel/dégel avec ou sans sels déglaçant ;
- > Corrosion de l'armature causée par le chlorure ;

¹⁷ Lot 6A – Standard Approach Panels Reinforcement (Jacques-Cartier Deck Replacement 2000-2002)

¹⁸ Technical specifications for Jacques-Cartier Deck Replacement (2000-2002)

- > Attaque chimique par les produits déglaçant, incluant l'accélération de la réaction alcali-silice ;
- > Corrosion de l'armature causée par la carbonatation.

Ils sont décrits plus en détail dans la Section 4.1.

4.2.1.1 Conditions météorologiques

La ville de Montréal a un climat continental humide, avec des précipitations annuelles d'environ 1000 mm, incluant 220 cm de chute de neige entre les mois de novembre et mars. L'humidité relative varie typiquement entre 60% à plus de 75%, avec une moyenne de 70%, et la température moyenne mensuelle varie entre -10°C à 20°C selon les normales climatiques.

Un sommaire des normales climatiques pour la ville de Montréal est montré dans le Tableau 4.2-1.

Tableau 4.2-1 : Normales climatiques de Montréal, données 1981-2010 de l'aéroport international Montréal

	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moyenne ou Total	Écart type
Température moyenne journalière (°C)	-12	-9.5	-3.6	5.4	12.4	17.4	19.8	18.7	14.1	7.3	0.6	-7.1	5.3	10.9
Chute de neige (cm)	55.8	43.1	38.5	14	0.3	0	0	0	0	3.1	22.8	51.3	228.8	-
Précipitation (mm)	87.9	64.6	70.4	88	86.8	103	91.9	96	91.7	96.5	103	87.6	1067.7	-
Nombre de jours avec pluie > = 5 mm	5.5	4.2	4.5	5.5	5.3	5.6	6	5.3	5.3	5.5	6.1	5.3	64.1	-
Nombre de jours avec chutes de neige > = 1 cm	30.9	28	28.9	7.7	0	0	0	0	0	0.42	7.5	25.1	128.4	-
Vent Direction la plus fréquente	NE	NE	NE	NE	NE	SW	SW	SW	SW	W	NE	NE	W	-
Humidité HR [%]	70.2	67.3	66.4	63.2	64	69.4	72.5	74.1	75.6	74.5	76.5	76	70.8	4.4

4.2.1.2 Exposition aux sels déglaçant à base de chlorure

Présentement, les surfaces des éléments structuraux sont sujettes à une exposition cyclique aux chlorures, tout particulièrement là où les produits de déglaçage sont utilisés pendant la saison hivernale. Les ions chlorure en surface ne sont pas seulement transportés en profondeur par diffusion : d'autres effets comme la succion capillaire, le lessivage, et autres, jouent aussi un rôle. La profondeur de béton exposée dépend aussi d'autres paramètres comme sa perméabilité et la durée des cycles d'exposition aux chlorures.

Pour illustrer l'impact potentiel des chlorures, trois classes d'exposition sont considérées pour adresser la sévérité de l'exposition (voir Tableau 4.2-2). Ces classes dépendent de différents paramètres tels que la géométrie de l'élément, sa distance à la source de chlorures, son imperméabilité et la présence d'asphalte.

Tableau 4.2-2 : Classes d'exposition liées aux ponts – exposition aux produits déglaçant à base de chlorure, selon des sources diverses, notamment le fib 76 (ref 2), CAN/CSA A23.

Désignation CAN/CSA A23.1	Définition Béton exposé au gel et dégel, saturé et avec produits déglaçant	Exposition liée au pont		
		Exposition	Description	Distance horizontale/verticale à la source
C-1	Béton exposé au gel et dégel, saturé et avec produits déglaçant	C-1.1	Surfaces de béton sèches à modérément humide avec chlorures en suspension	>10 m horiz. ou, >5 m vert.
		C-1.2	Surfaces de béton mouillées, rarement sèches, sujettes au chlorure en suspension ou à l'eau de ruissellement	<10 m horiz. ou <5 m vert.
		C-1.3	Surfaces de béton exposées à des cycles secs / mouillés, et sujettes aux éclaboussures de chlorure	<1,5 m

Cette évaluation considère que les surfaces de béton de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier sont exposées aux produits de déglaçage à base de chlorure et sont sujettes aux classes d'expositions suivantes :

- > C-1.2 : Surfaces horizontales et verticales exposées aux chlorures des routes avoisinantes (généralement jusqu'à distance de 10 m) ou surfaces horizontales exposées aux chlorures appliqués directement ou exposées aux surfaces de ruissellement.
- > C-1.3 : Surfaces verticales avec cycles humides et secs (sel provenant des routes avoisinantes, généralement à une distance de 1,5 m)

La corrosion induite par le chlorure est le principal mécanisme de détérioration considéré pour évaluer la durée de vie restante des éléments structuraux qui constituent le tablier de la piste multifonctionnelle.

4.2.1.3 Exposition aux cycles de gel/dégel

La répétition du gel / dégel de l'eau dans le béton (avec ou sans la présence de sels déglaçant) est reconnue comme étant un facteur important dans la détérioration mécanique du béton.

La fréquence du gel/dégel est le nombre de fois que la température enregistrée tombe au-dessous du point de congélation après une période où la température était égale ou au-dessus. La fréquence moyenne annuelle de gel / dégel à Montréal est d'environ 64 cycles. Cependant, avec le changement climatique, la fréquence annuelle pourrait augmenter.

À mesure que le nombre de cycles de gel/dégel augmente, le potentiel de perte de surface et d'écaillage augmente également, en particulier lorsque des produits de déglaçage sont présents en raison de l'augmentation du degré de saturation de la surface du béton.

En ce qui concerne les différentes conditions d'exposition environnementale dans la structure du pont, l'influence de l'attaque de gel/dégel dépend :

- > De l'existence de cycles de gel et de dégel ;
- > Du degré de saturation de la surface ; et
- > De la présence de chlorures.

Afin de mieux résumer ces conditions, les classes d'exposition environnementale applicables au gel et au dégel selon les normes CAN/CSA A23.1 et CAN/CSA S6 sont présentées au Tableau 4.2-3.

Tableau 4.2-3: Classes d'exposition du béton au cycle gel/dégel

Désignation CAN/CSA A23.1	Définition	Exposition reliée au pont		
		Exposition	Description	Exemples
C-1	Béton exposé au gel/dégel, saturé et avec produits de déglaçage	C-1.2	Surfaces horizontales de béton exposées au gel et aux produits de déglaçage ; directement, par projection ou par ruissellement (forte saturation en eau)	Surfaces de roulement, rampes d'accès, etc.
		C-1.3	Surfaces de béton exposées aux produits de déglaçage ; directement, par projection ou par ruissellement	Surfaces verticales comme des murs, colonnes, etc.

4.2.1.4 Mécanismes de détérioration

Voir Section 4.1.1 pour la description des mécanismes.

4.2.1.5 Exposition au dioxyde de carbone

Bien que la norme CAN/CSA A23.1 ne fasse pas explicitement référence à la carbonatation dans les classes d'exposition, la norme CAN/CSA S6 considère la protection contre la corrosion induite par carbonatation sans chlorure, en donnant une limite au rapport eau /

ciment (E/C) du béton. Cependant, le risque de corrosion des éléments de pont induite par carbonatation est considérablement plus faible que le risque de corrosion induite par le chlorure.

En règle générale, la corrosion induite par la carbonatation pourrait être négligée si la qualité du béton et les épaisseurs d'enrobages nécessaires pour atténuer la corrosion induite par le chlorure ont été considérées lors de la conception du tablier.

4.2.1.6 Sommaire des conditions d'exposition

Les valeurs d'exposition (charge de chlorure) des structures de ponts dépendent du milieu externe environnant, tel qu'indiqué au Tableau 4.2-4.

Les analyses de durée de vie utile se servent de méthodes probabilistes appliquées uniquement au mécanisme de détérioration par corrosion en présence de chlorures.

Le brouillard salin (*spray*), le ruissellement (*run-off*) et les éclaboussures (*splash*) de chlorures sont pris en compte, incluant des classes d'exposition spécifiques au projet en fonction de la distance d'où les sels déglaçant sont appliqués. Cela permet d'apporter des améliorations à la désignation d'exposition donnée par CAN/CSA A23.1. Cette approche décrit complètement l'exposition de la piste multifonctionnelle au milieu environnant.

La concentration de chlorure de surface, C_s , adoptée dépend du niveau d'exposition. Des valeurs plus élevées sont assignées aux surfaces à proximité du milieu routier ou aux surfaces recevant directement les chlorures. Cependant, les régions exposées au brouillard salin ont un C_s plus faible.

La moyenne et l'écart type considérés sont dans la plage recommandée par le fib bulletin no. 76¹⁹, ce qui donne :

- > C-1.2 - Zones de pulvérisation : 2,0% wt/cem (moyenne), 95^e percentile de 4,5% wt/cem.
- > C-1.2 - ruissellement de pont / surface : 4,0% wt/cem (moyenne), 95^e percentile de 8,92% wt/cem.
- > C-1.3 - glissières, cycles humides / secs : 3,0% wt/cem (moyenne), 95^e percentile de 6,69% wt/cem.

À titre de comparaison, la concentration de surface moyenne trouvée dans la base de données de *Life-365* [3] pour les ponts routiers urbains à Montréal est de 0,85% wt/conc (béton) ou d'environ 5,1% / wt/cem (ciment).

Les modèles utilisés pour vérifier la durabilité de conception ne sont applicables que dans les cas où un seul mécanisme domine la détérioration de la structure. Par exemple, la corrosion induite par le chlorure ; sans considération de la corrosion induite par carbonatation.

¹⁹ fib bulletin no. 76, Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards: Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides, International Federation for Structural Concrete (fib), Case Postale 88, CH-1015 Lausanne, Switzerland. 2015

Afin de mieux décrire le processus de pénétration des ions chlorure, on considère que la piste subit différentes attaques du milieu :

- > Dans un premier temps, au cours des 15 premières années : la piste est sujette aux produits de déglaçage provenant de la route avoisinante (C-1.2)
- > Dans un second temps, $t \geq 15$ ans : la voie cyclable est sujette à une application directe de sels, afin de faciliter son déneigement.

Il est important de noter que la deuxième situation est vérifique seulement en cas d'entretien hivernal de la piste. De plus, elle ne considère aucune présence d'une protection quelconque comme par exemple une membrane d'étanchéité.

Ces classes d'exposition sont représentées sur une coupe transversale typique du pont à la Figure 4.2-5 ($\text{âge} < 15$ ans) et à la Figure 4.2-6 ($\text{âge} > 15$ ans) respectivement. La modification des conditions d'exposition de la piste est importante ; elle est maintenant soumise à une charge de chlorure plus élevée, estimée en moyenne à 4,0%.

Tableau 4.2-4 : Classes d'exposition généralisées pour les éléments du pont

Classe d'exposition (CAN/CSA A23.1)	Classe d'exposition spécifique au projet	Description	Distance verticale et horizontale de la source de chlorures (m)	Charge du milieu (valeurs moyennes)			
				Charge de chlorure, Cs (%wt.c)	Gel / dégel ⁽ⁱ⁾ (-)	Attaque chimique ⁽ⁱ⁾ (-)	Accélération du RAG ⁽ⁱ⁾ (-)
C-1	C-1.2	Surface mouillée exposée au brouillard salin	> 10 m horiz. ou, >5 m vert.	2.0	Oui	Oui	Oui
C-1	C-1.2	Application directe, ruissellement	Application directe	4.0	Oui	Oui	Oui
C-1	C-1.3	Éclaboussure, mouillé/sec (Glissières)	< 1,5 m	3.0	Oui	Oui	Oui

(i) Modèle non dépendant du temps avec consensus international général avec une base de données libre est disponible pour ce processus de détérioration ; la méthode Probabiliste Complète (voir la Section 4.2.2) pour la conception de la durée de vie n'est donc pas réalisable.

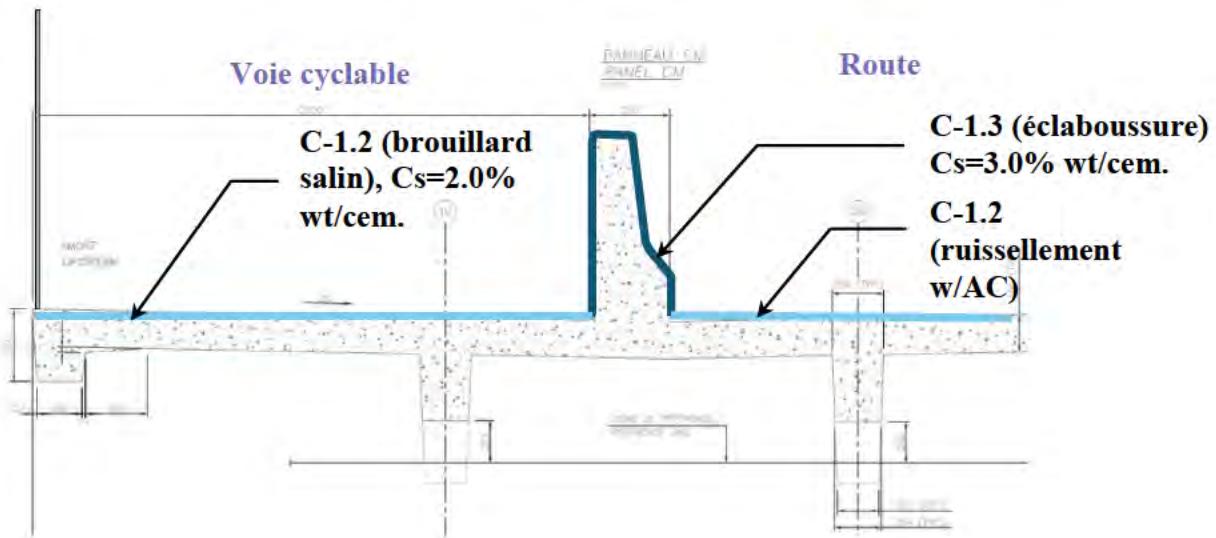
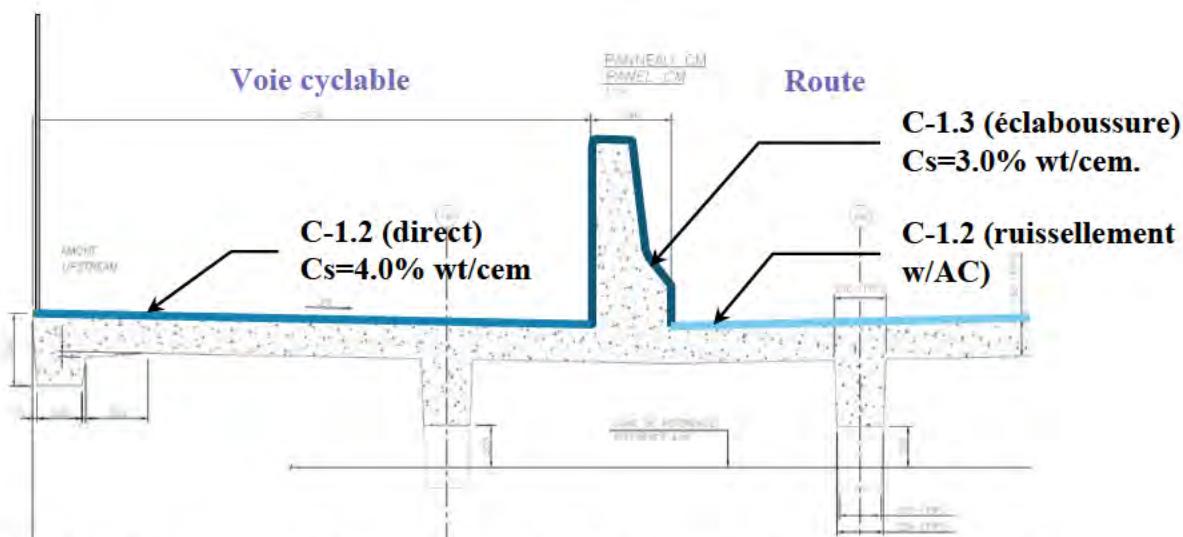


Figure 4.2-5: Environnements d'exposition spécifique pour le PJC : Voie cyclable et route (durée de vie < 15 ans)



4.2.2 Méthode de vérification de la durée de vie utile

L'adoption d'une méthode Probabiliste Complète (*Full Probabilistic method, FP*) est utile pour vérifier si la conception initiale et la nouvelle étude rencontrent un état limite acceptable pour les mécanismes qui dominent la détérioration de la structure par exemple, la corrosion induite par les chlorures, en particulier pour les surfaces de la voie cyclable.

Les mécanismes supplémentaires comme le gel-dégel, la RAG et l'attaque chimique sont vérifiés par l'adoption de méthodes Réputées Satisfaisantes (*Deemed to Satisfy methods, DS*). Dans notre cas par le biais d'analyses supplémentaires en laboratoire et/ou d'instrumentation. Ces méthodes sont basées sur des études antérieures de la *Strategic Highway Research Program (SHRP)*, de la *Federal Aviation Administration (FAA)*, du *Canadian Standards Association (CAN/CSA)*, du *American Concrete Institute (ACI)*, et autres.

Les effets d'interaction physique ne sont pas pris en compte dans une approche par modélisation ; par exemple la fissuration et l'entartrage dus à la corrosion du renfort combinée à des actions de gel / dégel.

4.2.2.1 Exposition aux chlorures par des sels déglaçant

Un modèle mathématique est utilisé pour déterminer la période d'initiation en estimant la concentration de chlorure, en fonction du temps et de sa profondeur dans le béton $C(x, t)$. Il est basé sur la seconde loi de diffusion de Fick (unidimensionnelle). Une description détaillée de la méthodologie est incluse à l'Annexe 4.1.

Le changement dans la charge de chlorures du milieu entre les deux cas considérés est décrit par la fonction en escalier illustrée à la Figure 4.2-7.

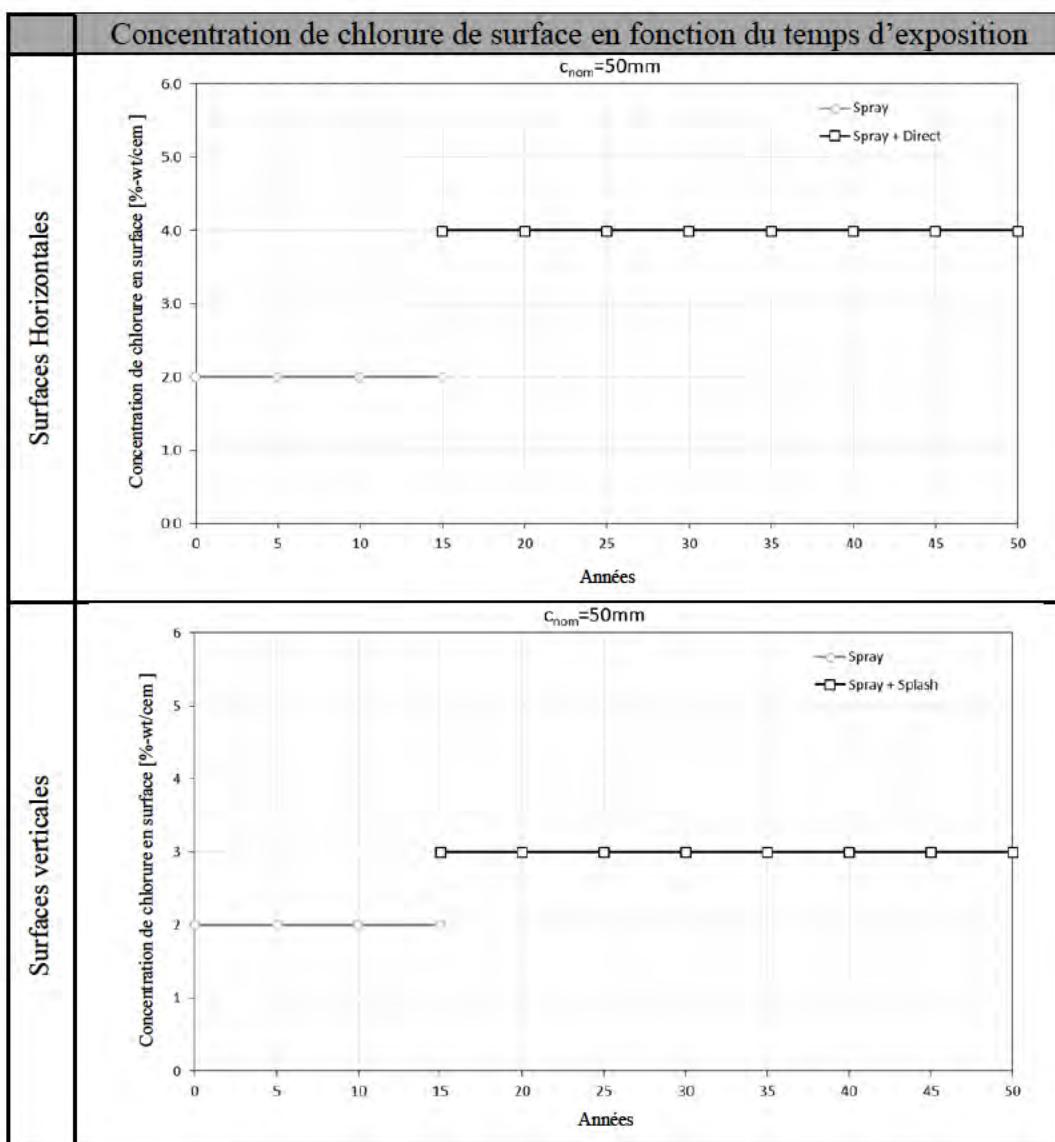


Figure 4.2-7: Concentration de chlorure en surface avant et après le déglaçage de la piste multifonctionnelle.

4.2.2.2 Exposition aux autres mécanismes

Il n'y a pas d'analyse temporelle (*time-history*) qui fait consensus à l'échelle internationale, pour les autres mécanismes de détérioration (RAG, attaque chimique et action du gel-dégel).

Sur la base des études antérieures du SHRP, de la FAA, etc., il est recommandé d'adopter les procédures d'essai données dans le Tableau 4.2-8 afin de confirmer les effets d'exposition aux produits de déglaçage.

Tableau 4.2-8 : Procédures d'essai recommandées pour confirmer les effets de l'exposition au dégivreur sur le béton

Mécanisme	Essai proposé
Accélération de la RAG	Essai en laboratoire et sur le terrain : (1) Déterminer la pénétration du produit de déglaçage selon ASTM C1556 (au cœur du terrain) et conduire un examen EDX-SEM pour déceler la RAG (essai d'accélération) (2) Examen SEM-EDX au cœur du terrain depuis le tablier chaque 2 ans pour les 6 premières années et chaque 5 ans par la suite.
Attaque chimique	Essai modifié selon SHRP H2015.8 ou alternative appropriée à définir.
Action du gel/dégel	Extraire des carottes et déterminer les paramètres des vides interstitiels selon ASTM C457. Mesures des pertes de béton causes par le gel/dégel selon SHRP H205.8

4.2.2.3 État Limite de Service, ou État Limite Ultime

Typiquement, la dépassivation des barres d'armature elle-même n'entraîne pas de conséquences importantes et est donc considérée comme un état limite de service. Mais, en fonction des conséquences de la défaillance et de la facilité / absence d'inspection, elle peut être considérée comme un état limite ultime.

Dans notre cas, la dépassivation de l'armature due à la corrosion induite par les chlorures est définie comme étant un **État Limite de Service** pour les raisons suivantes :

- > Des inspections récurrentes de la structure (par exemple annuellement) ont lieu ;
- > La redondance des éléments structuraux au niveau de la piste multifonctionnelle et leur réparation possible ;
- > Les câbles de post-tension transversale sont protégés par des gaines

Dans cette étude, l'enrobage de béton est définie comme la résistance, et la concentration en chlorure en tant que charge. Puisque la concentration de chlorure varie avec le temps, cette variable de charge doit être définie en fonction du temps.

4.2.2.4 Réévaluation de la durabilité

L'évaluation de la durabilité des **nouvelles structures** prend en considération un grand nombre de données de conception (identification du mécanisme principal de détérioration, état limite opérationnel, quantification statistique des variables matérielles et environnementales...).

Pour les **structures existantes**, les informations détaillées n'existent généralement pas et doivent être collectées à partir de plans, spécifications, données de stations

météorologiques, d'inspections et toute autre source possible. Le cas échéant, l'information sur la pénétration de chlorures, mesurée après 15 ans d'exposition pourrait être utilisée pour réviser la probabilité d'initiation de la corrosion.

Comme les données d'inspection ne sont pas disponibles, la réévaluation de la durabilité permettrait de déterminer si l'entretien ou la réparation sera nécessaire à l'avenir pour assurer la durée de vie utile de l'élément.

Application détaillée

Pour déterminer la probabilité de défaillance basée sur l'état limite, la fonction d'état limite doit être analysée dans un mode probabiliste, en prenant en compte toutes les variables de charge et de résistance avec leur variabilité. Pour plus de détails sur le modèle de détérioration, la fonction d'état limite adoptée et la quantification de la probabilité d'amorçage de la corrosion, se reporter à l'Annexe 4.1. La nouvelle conception a été réalisée avec un script de calcul probabiliste élaboré par *Arup*.

L'augmentation de la probabilité de dépassivation avec le temps, sur une période d'exposition de 75 ans, est illustrée à la Figure 4.2-9.

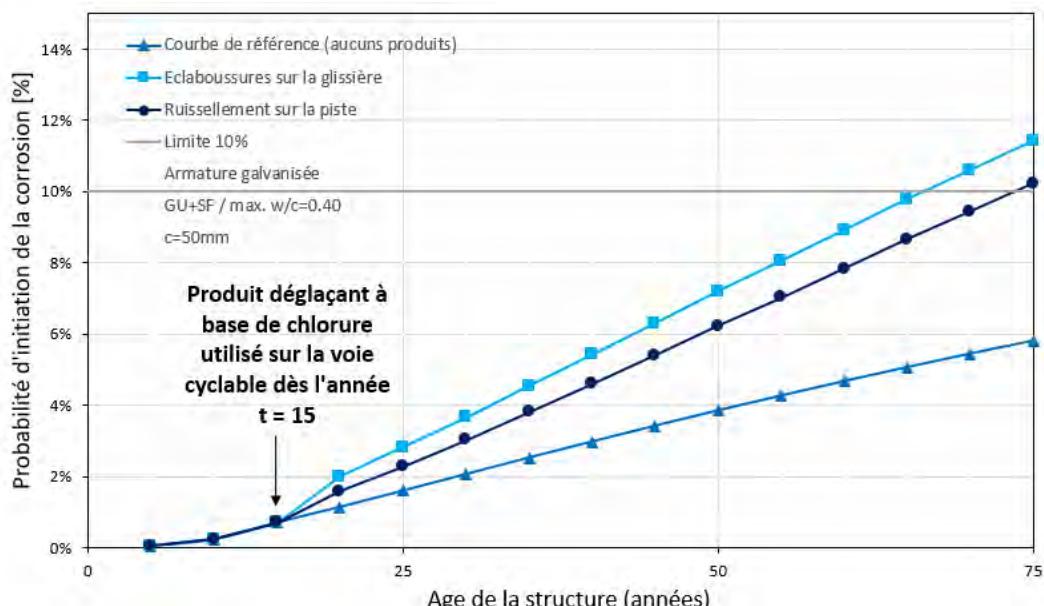


Figure 4.2-9: Progression de l'état limite dépendante du temps basée sur la probabilité de rupture

Il faut noter que la courbe de référence (aucuns produits) suppose qu'il n'y a pas de projections de produits sur la piste (provenant de la route) actuellement, ce qui n'est pas le cas comme nous l'avons vu.

4.2.2.5 Commentaires sur la fissuration locale de dalles

Dans le cadre du Contrat 62576 des fissures localisées ont été remarquées sur certaines dalles de la piste. Leur épaisseur peut atteindre 0,8 mm dans de rares cas. Certaines ont déjà été scellées.

Malgré une probabilité d'initiation de la corrosion un peu au-dessus de la valeur cible de 10% (voir section suivante), la présence de ces fissures ne demande pas une révision intégrale de la présente analyse.

En effet, il est normal d'avoir quelques fissures dans les dalles et le scellage des fissures de plus de 0,2 ou 0,3 mm prolongera la durée de vie des dalles. Il est recommandé de sceller les fissures dès que possible afin de réduire tout risque d'initiation de la corrosion.

L'installation d'une membrane élastique pourra jouer le rôle de scellant, ou simplement ajouter une protection supplémentaire.

En l'absence de ces mesures et en cas de doute, sur la durée de vie de la dalle (75 ans dans cette analyse) alors il serait préférable dans un premier temps de confirmer l'épaisseur de l'enrobage de béton (théoriquement 50 mm).

4.2.3 Résultats et commentaires

En supposant qu'à l'année « 15 », la piste multifonctionnelle commence à recevoir une concentration de chlorure plus élevée en raison de l'application directe de produits de déglaçage, les résultats de la nouvelle étude probabiliste indiquent un risque faible ou négligeable de ne pas respecter l'état limite de durabilité pour les surfaces horizontales, et un risque négligeable pour l'initiation à la corrosion pour les surfaces de glissière, voir Tableau 4.2-10.

Tableau 4.2-10: Probabilité d'initiation de la corrosion à la fin de la durée de vie utile, valeurs cibles et valeurs calculées

Surface / Exposition	État limite	Probabilité d'initiation de la corrosion à la fin de la durée de vie utile	
		Valeur cible	Valeur calculée
Horizontal (tablier) / C-1.2	État limite de service	10%	10%
Vertical (glissière) C-1.3	État limite de service	10%	<u>12%</u>

En comparant les résultats de la nouvelle conception (fiabilité calculée à la fin de la durée de vie) avec l'exigence d'une limite de viabilité de 10%, on peut conclure que l'action combinée **d'instrumentation, inspections, analyses, entretien et réparations**, peuvent être nécessaires pour offrir une protection suffisante contre la dégradation du système. Les actions suivantes seraient donc recommandées :

- > **Action préventive** : installation d'une protection de surface / membrane d'étanchéité ;
- > **Suivi / instrumentation** : système de suivi de la corrosion. Ce système mesure l'initiation de la corrosion ainsi que le niveau de corrosion ;
- > **Inspection** : inspections de routine (fréquence à définir) afin de :
 - vérifier la nécessité d'entretien ou réparations / supplémentaires ;
 - définir le profil chlorhydrique en profondeur.

- > **Analyse** : la présente analyse pourrait être mise à jour en utilisant les techniques d'inférence bayésienne²⁰ et à l'aide des données d'inspection récoltées telles que :
- les concentrations de chlorures en surface, mesurée à des endroits stratégiques (surfaces horizontales et verticales) ;
 - des mesures in situ de la profondeur d'enrobage des armatures, la confirmation du type de ciment et une vérification de la présence ou non d'adjuvants minéraux (par pétrographie) ;
 - la détermination du coefficient de diffusion du chlorure, par carottage et/ou par fluorescence à microrayons X (μ XRF) selon l'efficacité de chaque méthode, voir Figure 4.2-11) ;
 - les résultats des procédures d'essai pour confirmer les effets de l'exposition aux produits de déglaçage sur le béton, ci-dessous.

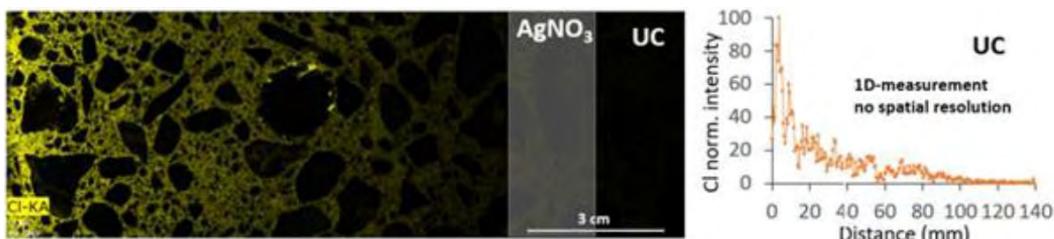


Figure 4.2-11: Analyse μ XRF pour déterminer la propagation des ions chlorures dans le béton

- > **Entretien / réparation** : établir un plan d'entretien, notamment en ce qui concerne les éléments de la structure qui sont sensibles à la corrosion, afin d'assurer une durée de vie utile 75 ans.

La présente analyse ne s'est pas penchée sur l'effet des produits déglaçant sur les garde-corps pour les raisons suivantes :

- > Les garde-corps sont des éléments secondaires du pont et peuvent facilement être remplacés en cas de détérioration ;
- > La corrosion des garde-corps a des conséquences esthétiques dont les critères ont besoin d'être définis spécifiquement ;
- > La corrosion des ancrages en particulier est difficile à étudier sans monitnage constant.

Ainsi il est recommandé de continuer leur inspection régulière et si une détérioration de leur condition est notée suite à un potentiel déneigement alors des mesures pourraient être prises ou des analyses plus précises faites.

²⁰ L'inférence bayésienne est une méthode d'inférence permettant de déduire la probabilité d'un événement à partir de celles d'autres événements déjà évalués. Elle s'appuie principalement sur le théorème de Bayes

5 Environnement

5.1 Revue réglementaire

5.1.1 Introduction

Bien que le pont Jacques-Cartier et le fleuve Saint-Laurent soient sous juridiction fédérale, la revue réglementaire inclut également la législation provinciale et municipale applicable pour les activités de déneigement, ainsi que le rejet de la neige dans un cours d'eau et l'usage de produits déglaçant.

Il est à noter que les observations et recommandations faites dans le présent rapport ne remplacent pas un avis légal concernant l'application des lois et règlements au Québec et au Canada, tel que pourrait le fournir un avocat spécialisé en environnement. Les obligations qui découleraient de leur application changeraient la portée des travaux à réaliser.

5.1.2 Méthode

La revue de littérature débutera par la consultation des sites internet des divers paliers de gouvernement afin de prendre connaissance des lois, règlements, politiques et guides associés au déneigement, à l'épandage de produits déglaçant ainsi qu'à la protection de l'environnement et du milieu aquatique. La liste suivante énumère les principaux organismes, législations et documents à consulter :

- > Environnement et Changement climatique Canada (*Environnement Canada*) : Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999), Loi sur les pêches ; Code de pratique : la gestion environnementale des sels de voirie ;
- > Pêches et Océans Canada (MPO) ;
- > Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME) : Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection de la vie aquatique ;
- > Association des transports du Canada (ATC) ;
- > Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de Lutte contre les Changements climatiques (*Ministère de l'Environnement*) : Loi sur la qualité de l'environnement, Règlement sur les lieux d'élimination de neige ;
- > Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (*Ministère des Transports*) : Guide des bonnes pratiques d'épandage, Plan ministériel de gestion environnementale des sels de voirie, plan d'action 2017-2020 ;
- > Gouvernement du Québec : Stratégie québécoise pour une gestion environnementale des sels de voirie,
- > Ville de Montréal : Règlement 08-055, Politique de déneigement ;

- > Ville de Longueuil : Règlement CO-2008-554 relatif au déneigement des propriétés privées.

5.1.3 Résultats

5.1.3.1 Déneigement

Selon les recherches menées à ce jour, il n'y a pas de loi ni de règlements fédéraux qui se prononcent clairement sur la possibilité ou non de rejeter de la neige dans un cours d'eau ou un lac.

Au Québec, le transport et le dépôt de la neige sont encadrés par le Règlement sur les lieux d'élimination de neige (chap. Q-2, r. 31), sous la responsabilité du Ministère de l'Environnement. L'article 1 de ce règlement stipule :

« La neige qui fait l'objet d'un enlèvement et d'un transport en vue de son élimination ne peut être déposée définitivement que dans un lieu d'élimination autorisé par le ministre en vertu de l'article 22 de la Loi sur la qualité de l'environnement (chapitre Q-2). »

Nul ne peut établir, agrandir, modifier ou exploiter un lieu d'élimination de neige à moins d'obtenir préalablement un certificat d'autorisation, conformément au premier alinéa. »

En d'autres mots, le règlement encadre la neige qui est chargée et transportée et non pas celle qui est tout simplement poussée par la machinerie sur les routes et dans les stationnements par exemple. Par conséquent, la neige qui est poussée ou soufflée lors du déneigement de la piste multifonctionnelle peut être dirigée vers le fleuve, à condition qu'elle ne soit pas chargée ni transportée par camion entretemps. L'étude portant sur la viabilité hivernale de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier (Cima, 2016) confirme cette interprétation du règlement et souligne également que le Ministère des Transports effectuait en 2016 le déneigement de la passerelle piétonnière du pont de Québec en soufflant la neige directement dans le fleuve. Enfin, selon les résumés d'échanges téléphoniques avec ce ministère, il est précisé que l'article 20 de la Loi sur la Qualité de l'Environnement (LQE) s'appliquerait si un projet de cette nature devait être soumis à une autorisation en vertu de cette loi. En effet, cet article stipule que :

« Nul ne doit émettre, déposer, dégager ou rejeter ni permettre l'émission, le dépôt, le dégagement ou le rejet dans l'environnement d'un contaminant au-delà de la quantité ou de la concentration prévue par règlement du gouvernement. »

La même prohibition s'applique à l'émission, au dépôt, au dégagement ou au rejet de tout contaminant, dont la présence dans l'environnement est prohibée par règlement du gouvernement ou est susceptible de porter atteinte à la vie, à la santé, à la sécurité, au bien-être ou au confort de l'être humain, de causer du dommage ou de porter autrement préjudice à la qualité du sol, à la végétation, à la faune ou aux biens. »

Enfin, il est mentionné que le processus d'approbation serait long et complexe et que le Ministère de l'Environnement exigerait des informations supplémentaires liées aux effets de cette activité sur la qualité de l'eau.

Nous souhaitons aussi souligner qu'un autre article de la LQE pourrait être applicable si le projet est assujetti à la législation provinciale et il s'agit de l'article 22 :

« Nul ne peut ériger ou modifier une construction, entreprendre l'exploitation d'une industrie quelconque, l'exercice d'une activité ou l'utilisation d'un procédé industriel, ni augmenter la production d'un bien ou d'un service s'il est susceptible d'en résulter une émission, un dépôt, un dégagement ou un rejet de contaminants dans l'environnement ou une modification de la qualité de l'environnement, à moins d'obtenir préalablement du ministre un certificat d'autorisation. »

En résumé, la LQE ne proscrit pas formellement l'activité de rejeter de la neige dans le fleuve, mais interdit le rejet de tout contaminant dans l'environnement qui est susceptible d'avoir un effet néfaste ou de détériorer la qualité de ce dernier (voir Annexe 5.1).

La législation fédérale aborde le problème de manière similaire avec la Loi sur les pêches et son article 36, voir Annexe 5.1. La législation, tant provinciale que fédérale, vise donc davantage le rejet de neige contaminée avec des produits de déglaçage, dont le chlorure de sodium, des matières en suspension ou des produits pétroliers.

La ville de Montréal a mis en place en 2015 une Politique de déneigement, mais cette dernière ne s'applique pas pour les voies relevant du gouvernement provincial ou fédéral. Quant au Règlement 08-055 de la ville de Montréal, il spécifie que l'enlèvement de la neige doit être réalisé soit en la chargeant dans des camions, soit en la soufflant sur les terrains riverains à la rue ou au trottoir. La neige qui a été chargée dans des camions doit alors être éliminée dans un site de disposition conforme au Règlement sur les lieux d'élimination de neige. Quant à la ville de Longueuil, le seul document congruent trouvé est le Règlement CO-2008-554 et il ne vise que le déneigement des propriétés privées. Les documents municipaux consultés ne font pas référence à des mesures particulières à prendre lorsque le déneigement ou l'épandage s'effectue à proximité des cours d'eau.

5.1.3.2 Épandage de produits déglaçant

Bien que des lois et règlements interdisent le rejet ou l'émission de contaminants dans l'environnement, des guides de bonnes pratiques ont été élaborés afin de bien encadrer l'épandage de produits déglaçant et particulièrement à proximité des cours d'eau et des plans d'eau.

Cette discussion sur les effets environnementaux et les mesures d'atténuation pour l'épandage de sels de déglaçage est un résumé d'une note technique écrite en anglais le biologiste senior [REDACTED] et présentée dans son intégralité à l'Annexe 5.2.

Contaminant ou non

Depuis le 1^{er} décembre 2001, le Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME) a publié une liste de substances d'intérêt prioritaire pour les sels de voirie. Ce

rapport concluait que les sels de voirie de toutes natures entraînaient un impact sur l'environnement et qu'ils devaient être considérés comme une substance nocive. Puisque ces sels sont couramment employés l'hiver au pays pour de multiples raisons (coût, efficacité et disponibilité), il a été décidé pour des raisons de sécurité de plutôt encadrer leur utilisation.

Bonne pratique

Un premier guide de bonne pratique sur l'épandage des sels de voirie a vu le jour quelques années plus tard par Environnement Canada (2004). Depuis, toutes les municipalités ou institutions qui possèdent des ponts doivent produire un plan de gestion environnementale dans le cas où plus de 500 tonnes de sel sont appliquées annuellement. Le guide propose plusieurs approches pour réduire les quantités utilisées. Un suivi de la situation a démontré que certains milieux sensibles devraient faire l'objet d'une attention particulière. En ce sens, les lacs et les milieux humides peuvent subir des impacts, surtout leur faune aquatique. La contamination possible des eaux souterraines est aussi notée. Le principal critère retenu est celui de l'exposition de longue durée qui ne devrait pas dépasser 120 mg/l de chlorures pour les eaux de surface douces (CCME, 2011).

Puisqu'il n'y a pas de modification à l'habitat du poisson dû à l'effet de dilution, le Ministère n'a pas à être impliqué dans le processus.

Le gouvernement du Québec a élaboré *La Stratégie québécoise pour une gestion environnementale des sels de voirie* ainsi qu'un plan d'action visant la gestion environnementale des sels de voirie pour la période 2017-2020. Deux guides ont également été préparés pour aider les gestionnaires du réseau routier à mettre en œuvre les meilleures pratiques lors des activités d'entreposage et d'épandage des sels de voirie et des activités d'élimination de la neige contaminée. Il s'agit du *Guide des bonnes pratiques d'épandage* et du *Guide de gestion des zones vulnérables aux sels de voirie* (Ministère des Transports, 2013).

Le *Guide de gestion des zones vulnérables aux sels de voirie* (Ministère des Transports, 2013) a été élaboré à l'intention des municipalités du Québec dans le cadre de la Stratégie québécoise pour une gestion environnementale des sels de voiries et les aider à mettre en œuvre de bonnes pratiques lors de l'entretien hivernal des routes, sans compromettre le fonctionnement du réseau et la sécurité des usagers. Ce guide propose des mesures d'atténuation pour protéger les zones vulnérables aux sels de voiries et réduire ainsi leurs effets sur l'environnement. Une section du guide porte sur les produits de remplacement au sel et indique que les recherches n'ont pas encore donné de résultats acceptables à tous points de vue. Toutefois, certains produits méritent une attention particulière et devraient être considérés selon les conditions locales. Il s'agit des abrasifs et des produits à base d'acétate (acétate de calcium-magnésium et acétate de potassium). Selon les nombreuses études menées avec l'acétate de calcium-magnésium, il serait considéré comme étant la meilleure solution de recharge environnementale au sel, bien que le coût d'achat élevé soit leur principale contrainte. L'acétate de potassium serait par contre plus performant et le produit le plus utilisé dans cette catégorie.

Cas de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier

Le pont Jacques-Cartier traverse le fleuve Saint-Laurent à un endroit de fort courant et de très grand débit, affichant un écoulement moyen de 9 000 m³/s. Ces deux conditions réunies

placent ce milieu récepteur à l'autre bout du spectre de sensibilité à l'épandage de produit de déglaçage. Enfin, soulignons que des produits déglaçant sont actuellement utilisés sur le pont Jacques-Cartier et que les eaux de drainage provenant des sections 3 et 7 de la voie de circulation automobile et de la piste multifonctionnelle, soit les sections au-dessus du fleuve et de la Voie maritime, se dirigent éventuellement dans le fleuve Saint-Laurent. Cette situation est probablement la même sur la majorité des ponts d'envergure qui traversent une rivière.

5.1.3.3 Conclusion

Cette revue réglementaire montre que le déneigement et le déglaçage sont une nécessité dans nos contrées et que ses effets délétères sont plutôt encadrés dans des guides de bonnes pratiques. En effet, la neige au contact d'une voie de circulation deviendra un produit contaminé en regard des produits de déglaçage, des matières en suspension ou des produits pétroliers auxquelles elle se mélange. Selon la réglementation québécoise, la neige sera cependant traitée comme un contaminant seulement si elle fait partie d'un enlèvement et d'un transport. En résumé, la législation québécoise et canadienne cible davantage le rejet de neige contaminée avec des produits de déglaçage, mais n'interdit pas formellement l'activité de rejeter le déblaiement de la neige (sans transport) dans un cours d'eau ou un lac. Au niveau fédéral, les rejets sont en deçà des limites fournies par Environnement Canada, ainsi les rejets sont tolérés pour des raisons de sécurité.

Récemment, il y a une tendance à déterminer les zones sensibles à l'épandage des sels de voiries. Pour ce qui est des plans d'eau dont les lacs et les étangs font partie, ces zones correspondent à celles à forte valeur écologique et dont le temps de renouvellement est long. Le fleuve Saint-Laurent, de par son fort volume d'écoulement, ne correspond pas à cette définition.

En recommandation, Il serait pertinent d'obtenir un avis formel du Ministère de l'Environnement si le Projet est assujetti à la LQE ; et ce, bien que le pont et le fleuve soient sous juridiction fédérale. De plus, Environnement Canada et le ministère des Pêches et Océans pourraient confirmer cette approche.

De plus, au-delà de la problématique des rejets liés à la piste multifonctionnelle, il serait pertinent de réaliser une caractérisation des eaux de drainage sur l'ensemble du pont Jacques-Cartier, et particulièrement celles qui se dirigent au fleuve ; pour ainsi connaître la concentration en chlorure, entre autres paramètres, et les comparer aux critères applicables.

5.2 Analyse environnementale des produits déglaçant

Cette section s'attarde à l'analyse des produits déglaçant d'un point de vue environnemental, c'est-à-dire leurs possibles effets sur le milieu aquatique. Elle débute par la présentation des produits sélectionnés dans le cadre du projet puis explique l'outil d'analyse et le choix des critères qui en découle. Le résultat de l'analyse est un tableau dont le total des cotes renseigne sur les produits à privilégier ou non.

5.2.1 Introduction

Le tableau Tableau 5.2-1 énumère les produits de déglaçage à l'étude (voir aussi la section 3.3). On remarquera que le Produit A (sel gemme) est analysé uniquement à titre de référence. En effet, il est considéré que ce minéral utilisé comme tel ne convient pas à un pont sensible à la corrosion. Par ailleurs, le Produit C, principalement à base de chlorure de sodium (sel gemme), ne figure pas dans la liste de produits analysés en raison de sa composition chimique très similaire à celle du Produit A. Le Produit K, quant à lui, est constitué de copeaux imbibés soit de chlorure de magnésium (composant principal du Produit I), soit de chlorure de calcium (composant principal du Produit J) et aura donc le même effet que ces derniers.

Tableau 5.2-1 : Liste des produits déglaçant sélectionnés par PJCCI et Arup

Nom du produit	Principal composant	Commentaire
Produit A (sel gemme)	Chlorure de sodium	Produit de référence
Produit I	Chlorure de magnésium	Chlorure de magnésium corrosif À ne pas utiliser non dilué
Produit J	Chlorure de calcium	Chlorure de calcium corrosif À ne pas utiliser non dilué
Produit D	Sucres	Sel traité avec des dérivés naturels
Produit E	Sucres	Produit mieux utilisé comme agent proactif (antigivrage) ou mélangé avec de la saumure de sel pour dégeler
Produit G	Composants biologiques issus de produits de culture	Betterave, maïs et soja. Idéalement dilué avec de la saumure (en proportions 30 : 70), mais reste efficace jusqu'à -30°C
Produit F	Acétate de potassium	Produit mieux utilisé comme agent proactif (antigivrage) Peut être très efficace, mais produit coûteux
Produit H	Glycol, polyol et composants naturels	Produit à base de composants biologiques et apparemment complètement biodégradables Contient cependant du glycol qui peut être dangereux pour l'environnement

Les produits déglaçant feront l'objet d'une analyse d'un point de vue strictement environnemental. Qui plus est, seulement l'impact sur le milieu aquatique sera pris en compte. Cette limitation provient du milieu récepteur anticipé. Après consultation des plans de drainage fournis par PJCCI, la piste multifonctionnelle possède un système de captage des eaux dirigées soit vers les égouts, soit vers le sol, soit directement dans le fleuve. Dans le cas d'un égout sanitaire, les eaux seront traitées alors que dans le cas des égouts pluviaux, les eaux retourneront vers le fleuve sans traitement. La possible contamination des eaux souterraines apparait faible dans ce contexte au vu des quantités rejetées spécifiquement par la piste. Les autres sections du pont sont celles qui traversent le fleuve et la Voie

maritime. Dans ce dernier cas, la piste multifonctionnelle est détachée du pont et son drainage est dirigé directement vers le plan d'eau.

5.2.2 Méthode

La matrice décisionnelle à pondération numérique est l'outil d'analyse choisi. Elle met en relation les substances sélectionnées et les possibles effets environnementaux. Le choix des critères repose sur les principaux effets délétères que peut poser l'ajout d'une substance dans le milieu aquatique. *A priori*, les substances ne sont pas connues pour poser une contamination bactériologique, mais seulement biochimique. Le tableau Tableau 5.2-2 énumère les critères retenus et indique la réversibilité des effets appréhendés. Du point de vue de Smoll (2008), on peut considérer cette contamination comme ponctuelle malgré son aspect linéaire puisqu'elle peut être contrôlée ou circonscrite.

La pondération accordée entre les effets se fonde grandement sur la réversibilité et la toxicité envers les organismes vivants. L'échelle va de 1 à 5, ce qui correspond à une pondération qui va de faible à forte. Une pondération forte indique une importance majeure du critère par rapport aux autres critères.

Tableau 5.2-2 : Liste des critères et pondération des effets sur le milieu aquatique

Effet	Description	Réversibilité/toxicité	Pondération
Salinisation	Accumulation des sels dans l'eau, généralement le chlorure de sodium. Elle a pour principales conséquences une augmentation de la pression osmotique.	Complète à court ou moyen terme/ sans effet chronique sous la concentration de 120 mg/l ⁽¹⁾	2
Consommation d'oxygène	Décomposition des matières organiques ou oxydables qui nécessitent une certaine quantité d'oxygène. Le processus va appauvrir le milieu naturel en oxygène.	Complète à moyen terme/ sans effet chronique au-dessus de la concentration de 8 mg/l à 0°C ⁽²⁾	3
Toxicité	Capacité de la substance à provoquer des effets néfastes pour la santé ou la survie chez toute forme de vie	Irréversible si mortalité/ La toxicité de chaque produit est évaluée à partie de la DL50 orale chez le rat selon l'échelle de Hodge et Sterner ⁽³⁾	5
Bioaccumulation, persistance et biodégradation	Capacité de certains organismes à absorber et concentrer dans tout ou une partie de leur organisme la substance	Variable/ La persistance est évaluée selon des valeurs de demi-vie globale	3
Eutrophisation	Enrichissement des eaux par les substances nutritives. L'accroissement des populations de macrophytes et de phytoplancton peut modifier complètement la composition de la faune aquatique présente. L'hypoxie ou l'anoxie est également un corolaire de cet effet.	Incomplète et à long terme/ La biodiversité est affectée autant par la prolifération d'espèces plus tolérante, la turbidité que le déficit en oxygène	4
Quantité épandue pour le déglaçage	Moins grande est la quantité à épandre pour le déglaçage, moins grande sera l'impact de l'ensemble des effets sur le milieu aquatique.	Non applicable	3

(1) Ministère de l'Environnement (2018)

(2) CCME (2011)

(3) CCHST (2013)

Par la suite, une cote est attribuée à chaque cellule de la matrice pour qualifier l'importance de leur action sur les effets sur le milieu aquatique. L'échelle va de 1 à 5, ce qui correspond à la pire ou à la meilleure substance, les unes comparées aux autres sélectionnées. Une cote élevée n'implique pas qu'il n'y a aucun effet, mais qu'ils sont moins sévères que ceux des autres.

Le meilleur choix possible pour l'environnement est la substance qui récolte le plus haut total. À noter qu'elle ne tient pas compte la très grande dilution du fleuve (voir la discussion à ce sujet à la fin de la Section 5.1.3.2).

5.2.3 Résultats

Le tableau Figure 5.2-3 montre les résultats de l'évaluation des produits déglaçant d'après la matrice multicritère décrite en méthodologie. Le total du pointage favorise grandement le sel gemme. Exception faite de la salinisation, cette substance occasionne les effets les plus faibles parmi les critères retenus pour la protection du milieu aquatique. Les substances défavorisées sont celles sucrées qui occasionneront la plus grande demande en oxygène et celle contenant de l'acétate qui montre le plus long temps de biodégradation. Pour l'acétate, le temps est court dans l'air, mais dépasse une semaine dans l'eau en condition aérobie et

à 25 °C (NCBI, 2018). Il est à noter qu'à défaut de connaître la toxicité de certaines substances, une cote neutre a été attribuée. Parfois, la toxicité des divers composants était connue de manière individuelle, mais non pour le mélange en tant que tel.

Un dernier critère de comparaison est celui de la quantité épandue pour le déglaçage. Le calcul a été élaboré en fonction de la quantité suggérée par le fabricant. Lorsqu'une plage de valeur était proposée, la valeur médiane a été utilisée. Dans le cas du Produit E, ce n'est pas à proprement dit un déglaçant, mais plutôt un antigivrant, et une cote neutre lui a été attribuée.

Nom du produit	Critère							Total
	Salinisation	Consommation d'oxygène	Toxicité	Bioaccumulation, persistance et biodégradation	Eutrophisation	Quantité épandue pour le déglaçage		
Pondération	2	3	5	3	4	3		
Produit A (scl gemme)	1	5	4	5	5	4	84	
Produit I (cl. de magnésium)	5	4	2	4	4	5	75	
Produit J (cl. de calcium)	5	4	2	4	4	5	75	
Produit D	2	2	3*	4	3	4	61	
Produit E	4	1	3*	3	3	3*	56	
Produit G	5	2	5	3	2	4	70	
Produit F	5	4	3*	2	4	1	62	
Produit H	5	3	3	3	3	2	61	

* en l'absence d'information, une cote neutre a été donnée

Échelle	
Pondération	Critère
5	Forte pondération – Importance majeure du critère par rapport aux autres critères
4	Pondération moyenne à forte – Importance notable du critère par rapport aux autres critères
3	Pondération moyenne – Importance équivalente du critère par rapport aux autres critères
2	Pondération faible à moyenne – Importance moindre du critère par rapport aux autres critères
1	Pondération faible – Importance mineure du critère par rapport aux autres critères

Cote	Critère
5	C'est le meilleur produit. Ceci n'implique pas qu'il n'y a aucun effet, mais qu'ils sont moins sévères que ceux des autres produits.
4	Les effets de ce produit sont légèrement plus sévères que ceux du meilleur produit
3	Entre 2 et 4
2	Les effets sont considérablement plus sévères que ceux du meilleur produit
1	Les effets négatifs sont majeurs par rapport à ceux du meilleur produit



Figure 5.2-3 : Évaluation des produits déglaçant sélectionnés dans le cadre du projet selon leurs caractéristiques environnementales

5.2.4 Conclusion

Les résultats de l'évaluation des produits déglaçant selon leurs caractéristiques environnementales indiquent un certain avantage aux Produits I et J.

En recommandation, il est suggéré que les analyses globales et subséquentes n'attribuent qu'un faible poids à la composante de l'environnement en regard de la très grande dilution occasionnée par le milieu récepteur. Notons que le facteur de dilution entre en ligne de compte dans l'évaluation environnementale effectuée par plusieurs ministères, celui du calcul et interprétation des objectifs environnementaux de rejet (OER) pour les contaminants du milieu aquatique demandé par le Ministère de l'Environnement ou pour l'étude du suivi des effets sur l'environnement demandée par Environnement Canada en sont des exemples.

5.3 Cas similaires

5.3.1 Introduction

Afin de connaître ce qui est effectué ailleurs au Québec au sujet de l'entretien hivernal des ponts, le principal acteur dans le domaine du déneigement a été contacté, soit le Ministère des Transports. Les faits saillants de cette démarche sont résumés ci-après.

5.3.2 Méthode

La direction de l'environnement du Ministère des Transports de différentes régions a été contactée pour discuter des sujets suivants :

- > Les techniques de déneigement des ponts et de leur piste multifonctionnelle ;
- > Les produits déglaçant privilégiés pour des infrastructures situées en bordure de cours d'eau ou de lac.

5.3.3 Résultats

5.3.3.1 Ministère des Transports

Un entretien téléphonique s'est tenu avec trois (3) directions de l'environnement du Ministère des Transports : la région Laurentides/Lanaudière, la région Métropolitaine et la région de Québec. Les représentants des deux premières régions ont spécifié que le déneigement des ponts n'est généralement pas effectué par le Ministère des Transports, mais bien délégué aux municipalités. De plus, ils ne connaissent pas de piste multifonctionnelle, sous la responsabilité du Ministère des Transports, qui demeurent ouvertes en hiver dans leur secteur. Quant aux produits déglaçant, la majorité des municipalités et des entrepreneurs utilisent le sel gemme et mise sur une saine gestion des produits abrasifs et des fondants par l'entremise des différents guides du Ministère des Transports. Quelques produits alternatifs sont connus, notamment ceux à base de jus de

betterave, et font l'objet de projets pilotes. Pour en connaître davantage sur le sujet, ces deux représentants nous ont recommandés à leur collègue de la région de Québec qui est le principal auteur du *Guide de gestion des zones vulnérables aux sels de voirie*. Ce dernier a confirmé que des projets pilotes ont lieu actuellement à Trois-Rivières et Sherbrooke où un mélange de sel et de saumure (jus de betterave ou chlorure de sodium) est appliqué sur les routes. Un projet pilote a aussi débuté sur un pont en Beauce avec l'acétate de potassium (voir Section 5.3.3.2). Par ailleurs, l'acétate de calcium-magnésium serait peu utilisé, car il provient des États-Unis et est dispendieux. Enfin, l'auteur du guide a précisé que le Ministère des Transports ne recommande pas l'usage de certains produits dans ses devis de déneigement, mais exige plutôt des résultats en termes de sécurité routière. De plus, les produits à base de chlorure étant les plus utilisés et dont les impacts sont les plus connus, le Ministère des Transports vise plutôt à développer des outils de référence qui limiteront les quantités d'épandage. À titre d'exemple, il y a les stations météo-routières, les chartes de base d'épandage et les guides produits par le ministère.

En ce qui concerne les techniques de déneigement des ponts, l'auteur a mentionné que des discussions ont eu lieu avec le Ministère de l'Environnement et qu'une certaine tolérance est acceptée pour des cas particuliers. Ainsi, pour les grands ponts, il est possible de souffler la neige sur la rive au début et à la fin de la structure. Par ailleurs, il a confirmé que la neige accumulée sur la piste multifonctionnelle du pont de Québec est soufflée directement au fleuve.

5.3.3.2 Pont en Beauce : déglaçage automatisé avec jet

Le pont du Père-Antonio-Poulin (rivière Gilbert) sur l'autoroute 73, en Beauce, bénéficie aujourd'hui d'un système de déglaçage automatique^{21,22}. Un total de 44 gicleurs dans la route projette un produit de déglaçage pour prévenir la formation de la glace noire sur le pont. L'installation du système a coûté 2,7 millions de dollars. Ce système est le fruit d'un projet pilote d'une durée de trois ans réalisé avec le Ministère des Transports. Le produit choisi pour prévenir la formation de la glace est l'acétate de potassium moins corrosif que les sels de déglaçage utilisés normalement. Selon les renseignements présentés par Transports Québec, ce liquide est moins dommageable pour la structure et pour l'environnement.

5.3.4 Conclusion

Les représentants des ministères de la province essaient de minimiser l'impact des produits de déglaçage sur l'environnement plutôt que de proposer une sélection de produits alternatifs. Un projet en Beauce utilise l'acétate de potassium pour le déglaçage automatisé avec jet d'un pont autoroutier. Quant à la possibilité de souffler la neige directement au fleuve, cette pratique est tolérée par le Ministère de l'Environnement pour la piste multifonctionnelle du pont de Québec.

¹⁶ L'inférence bayésienne est une méthode d'inférence permettant de déduire la probabilité d'un événement à partir de celles d'autres événements déjà évalués.

5.4 Impact potentiel sur la faune

La présente section évalue l'impact potentiel sur la faune des activités traitées dans ce mandat (déneigement, rejet de la neige dans un cours d'eau et usage de produits déglaçant). À cet effet, les populations concernées sont les oiseaux qui vivent sur la structure du pont et la faune aquatique environnante. Compte tenu de l'analyse précédente, il est peu probable que le milieu aquatique soit affecté d'une façon ou d'une autre. Ainsi, les poissons, macroinvertébrés ou autre faune aquatique ne seront pas examinés à la présente section. Par ailleurs, des cohortes comme l'herpétofaune qui vivent en milieu riverain ne seront pas étudiées puisque le milieu hydrique ne constitue pas leur espace vital. En somme, seule l'avifaune est considérée, incluant les espèces sous la juridiction de la Loi sur les espèces en péril (LEP) et les espèces sur le territoire de PJCCI selon l'Inventaire de la biodiversité sur le territoire de la société (2016).

Ainsi, la connaissance de la faune aviaire du pont Jacques-Cartier et des effets envisagés des produits déglaçant permet d'en évaluer l'impact potentiel.

5.4.1 Méthode

Les derniers relevés de la nidification seront utilisés afin de tenir compte de l'impact potentiel de l'entretien hivernal des pistes cyclables sur la faune aviaire. Il s'agit de ceux réalisés par Services Environnement Faucon (SEF) en octobre 2016 pour le Faucon pèlerin (*Falco peregrinus*, Figure 5.4-1) et de l'Hirondelle à front blanc (*Petrochelidon pyrrhonota*, Figure 5.4-2).



Figure 5.4-1 : Faucon pèlerin, Radio-Canada



Figure 5.4-2 : Hirondelle à front blanc, FindNature.com

5.4.2 Résultats

5.4.3 État actuel des populations nicheuses

Quelques espèces d'oiseaux utilisent le pont Jacques-Cartier comme structure pour leur nidification. Selon les plans de suivi effectué par Faucon Services Environnementaux, il s'agit principalement du Faucon pèlerin (*Falco peregrinus*) et de l'Hirondelle à front blanc (*Petrochelidon pyrrhonota*). Dans le premier cas, il s'agit d'une espèce préoccupante sous la LEP mais qui semble avoir délaissé ce site pour sa reproduction. Cette structure était toutefois reconnue pour offrir un site qui connaissait un bon succès de nidification (Poulin et al., 2005). Dans le deuxième cas, il s'agit d'une espèce grégaire et migratrice qui niche en colonie ; elle fait aussi partie des oiseaux migrants au sens de la Loi de 1994 sur la convention concernant les oiseaux migrants (LCOM). Environ 75 nids ont été recensés en 2016. D'autres espèces protégées par la LCOM s'y trouvent selon Daniel Néron qui a dirigé les inventaires des propriétés de PJCCI en 2011 (comm. pers.). Il s'agit du Grand Corbeau (*Corvus corax*) et du Merle d'Amérique (*Tundrus migratorius*).

5.4.4 Impact potentiel d'un déglaçant

On peut présumer qu'une interaction directe du déneigement et de l'utilisation d'un déglaçant n'est possible que pour les nicheurs hâtifs. Dans le cas présent, cela concerne le faucon et le corbeau. Ces derniers nichant sous le tablier et assez au centre de la structure, le dérangement ou une possible contamination du nid apparaît assez improbable. Les deux espèces nichant parfois sur une falaise face à la mer, elles ne devraient pas être sensibles au phénomène des embruns salins. Qui plus est, ce phénomène existe actuellement à cause de l'entretien des voies de circulation actuelles, et l'ajout d'un déglaçant pour la piste multifonctionnelle n'entrainera qu'une légère augmentation d'embruns.

Les autres espèces citées débuteront leur nidification lorsque le printemps est bien entamé et ne pourraient subir que des effets indirects, comme des traces de déglaçant sur les parois. Selon [REDACTED] l'Hirondelle à front blanc affectionne les parois de béton sous la chaussé, particulièrement les recoins en corniche bien à l'abri et plus éloignés des rebords

(comm. pers.). Puisque la conception du drainage du tablier fait en sorte que des canalisations évacuent les eaux loin des structures de béton, une interaction indirecte s'avère peu plausible.

5.4.5 Conclusion

En définitive un impact potentiel négligeable, voire nul, du déneigement est prévisible sur l'avifaune, et ce, de l'une ou l'autre des méthodes préconisées.

Références

- (1) Cima+ (2016) Analyse de la viabilité hivernale de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier, projet no. 62065, 71 pages et 5 Annexes
- (2) CCHST [Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail] (2013) Qu'est-ce que DL50 et CL50? Fiches d'information Réponses SST, Site internet : <http://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/l50.html> consulté le 30 janvier 2018
- (3) CCME [Conseil canadien des ministres de l'environnement] (2011) Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection de la vie aquatique - chlorures. Fiche d'information du Conseil canadien des ministres de l'environnement, Winnipeg.
- (4) Environment Canada (2012) Five-year review of progress: Code of practice for the environmental management of road salts. Site internet : [https://www.ec.gc.ca/sels-salts/default.asp? lang=En &n=45D464B1-1#sec_exec](https://www.ec.gc.ca/sels-salts/default.asp?lang=En&n=45D464B1-1#sec_exec) consulté le 5 février 2018
- (5) Environnement Canada (2004) Code de pratique pour une gestion environnementale des sels de voirie. Ottawa, Environnement Canada, Rapports du service de la protection de l'environnement no SPE 1/CC/5, 18 pages
- (6) Hébert, S. (2016) La qualité de l'eau du secteur fluvial – Paramètres physico-chimiques et bactériologiques - 4e édition (PDF, 2,3 Mo), Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec, Fiche d'information de la collection « Suivi de l'état du Saint-Laurent », 4 pages
- (7) Association québécoise des transports (AQTr) (2014-09-21) Système de déglaçage automatisé - Transports Québec, No projet 154820013, No dossier 6603-12-1102, No document 161, Clauses techniques, Direction de la Chaudière-Appalaches, 21 septembre 2014. <https://aqtr.com/association/actualites/systeme-deglacage-automatise>
- (8) Ministère de l'Environnement [Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec] (2011) Critères de qualité de l'eau de surface. Site internet : http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/index.asp consulté le 12 février 2018
- (9) Ministère des Transports [Québec. Ministère des Transports du Québec] (2013) Guide de gestion des zones vulnérables aux sels de voirie. Réalisé par la Direction de l'environnement et de la recherche et édité par la Direction des communications du Ministère des Transports, 35 pages et 6 annexes

- (10) NCBI [National Center for Biotechnology Information] (2018) PubChem Compound Database ; CID=7904, Site internet : <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7904> consulté le 5 février 2018
- (11) Poulin, M., S. Beaudet, L. Deschênes, P. Fradette, B. Gagnon, I. Gauthier, A. Lachapelle, J. Lapointe et F. Shaffer (2006) Huitième inventaire quinquennal du Faucon pèlerin, *falco peregrinus*, au Québec (2005). Produit par l'Équipe de rétablissement des oiseaux de proie avec la participation du ministère des Ressources naturelles et de la Faune, de l'Association québécoise des groupes d'ornithologues, du Service canadien de la faune et d'Hydro-Québec, 16 pages et 1 annexe
- (12) Smoll, John P. (2008) Pollution of Lakes and Rivers: A Paleoenvironmental Perspective. Wiley-Blackwell, 2nd Edition, 383 pages

6 Système de chauffage

L’objectif d’installer ou incorporer un système de chauffage sur la piste multifonctionnelle a pour but de maintenir la piste multifonctionnelle ouverte le plus longtemps possible jusqu’à ce que les conditions climatiques rendent leur accès non sécuritaire et afin de considérer des alternatives aux méthodes de déneigement conventionnelles. Ainsi, divers types de systèmes de chauffage ont été considérés, étudiés et mis à l’essai sur le tablier du pont Jacques-Cartier.

L’application d’un système de chauffage sur une piste multifonctionnelle en hiver n’est pas nouvelle. En effet, plusieurs projets pilotes de petites envergures ont été effectués dans le passé à différents endroits sur la planète. Le chauffage de tablier de pont est parfois proposé ou implanté à petite échelle comme alternative au déneigement conventionnel par machinerie et / ou par application de produit de déglaçage. Toutefois, aucune application de ce type de technologie n’a jamais été répertoriée pour un pont de l’envergure du pont Jacques-Cartier.

Il est à noter que le principe de chauffer une dalle de tablier de pont est bien différent de celui de chauffer un trottoir sur sol ou un espace de stationnement. Ces derniers sont généralement de petites épaisseurs et bénéficient des propriétés isolantes du sol sous-jacent. À l’opposé, une dalle de tablier est généralement de plus grande épaisseur et souvent exposée à l’air sur tous ses côtés. L’exposition à l’air ainsi que la plus grande épaisseur de la dalle signifient que plus d’énergie est nécessaire pour atteindre la même température de surface afin de fondre la neige accumulée. De plus, le comportement dynamique de la dalle sous les charges vives de la route adjacente pourrait entraîner un mécanisme de détérioration accéléré et des frais d’entretien accrus. Il est également pertinent de considérer la logistique plus complexe d’installer un tel système, ainsi que ses composantes, sur un pont.

Cette section documente les divers types de systèmes de chauffage considérés, étudiés ainsi que les observations et les résultats qui ont été obtenus lors des essais effectués sur le pont Jacques-Cartier.

6.1 Technologies chauffantes alternatives

Historiquement, plusieurs technologies ont été considérées et testées pour chauffer une dalle de tablier de pont. Parmi celles-ci, la plupart consistent en un système de chauffage incrusté et intégré à la dalle structurale du pont tel que des fils électriques chauffants ou un système de tubes qui fait circuler du glycol chauffé à l’intérieur de la dalle. Une brève description de certaines de ces technologies est présentée dans les sous-sections suivantes.

6.1.1 Système à fils chauffants intégrés dans le béton

Le système à fils chauffants intégrés à la dalle consiste en une série de fils conducteurs de cuivre qui sont encastrés à l’intérieur et en surface de la dalle de béton. Cette dernière peut être la dalle structurale elle-même ou une mince dalle de recouvrement de béton d’environ 70 mm de profondeur qui est ajouté au-dessus de la dalle structurale. Dans l’option où le système à fils chauffants intégrés dans le béton est installé comme dalle de recouvrement à

la dalle structurale, une couche d'isolation sous-jacente peut être ajoutée afin de maximiser la transmission de chaleur vers la surface supérieure et réduire l'énergie nécessaire à son bon fonctionnement. Les fils électriques de cuivre sont protégés par une gaine de cuivre afin que ces derniers ne soient pas endommagés lors de la coulée de béton. Lorsque le courant électrique circule dans les fils électriques, ces derniers offrent une résistance au courant, ce qui cause une perte d'énergie sous forme de chaleur. La chaleur produite est directement proportionnelle au voltage, courant et à la résistance que confère le matériel du fil conducteur.

Ce type de système n'est généralement pas considéré sérieusement dans les essais puisque plusieurs problématiques y sont inhérentes. Ce système requiert considérablement d'énergie, de l'ordre de 400 à 750 W/m², afin de chauffer la surface du tablier suffisamment²³. De plus, les coûts d'installation et d'entretien sont considérablement élevés. De surcroit, puisqu'une dalle de tablier de pont vibre et fléchit constamment sous des effets dynamiques, il est probable que la durée de vie d'un tel système ne soit que de courte durée de temps avant qu'un fil se rompe ou qu'un embranchement se déconnecte. Par sa conception, les travaux de réparations pour tout bris interne à la dalle sont laborieux et difficiles.

²³ Elle s'appuie principalement sur le théorème de Bayes. Transportation – Federal Highway Association. Publication No. FHWA-RD-99-158

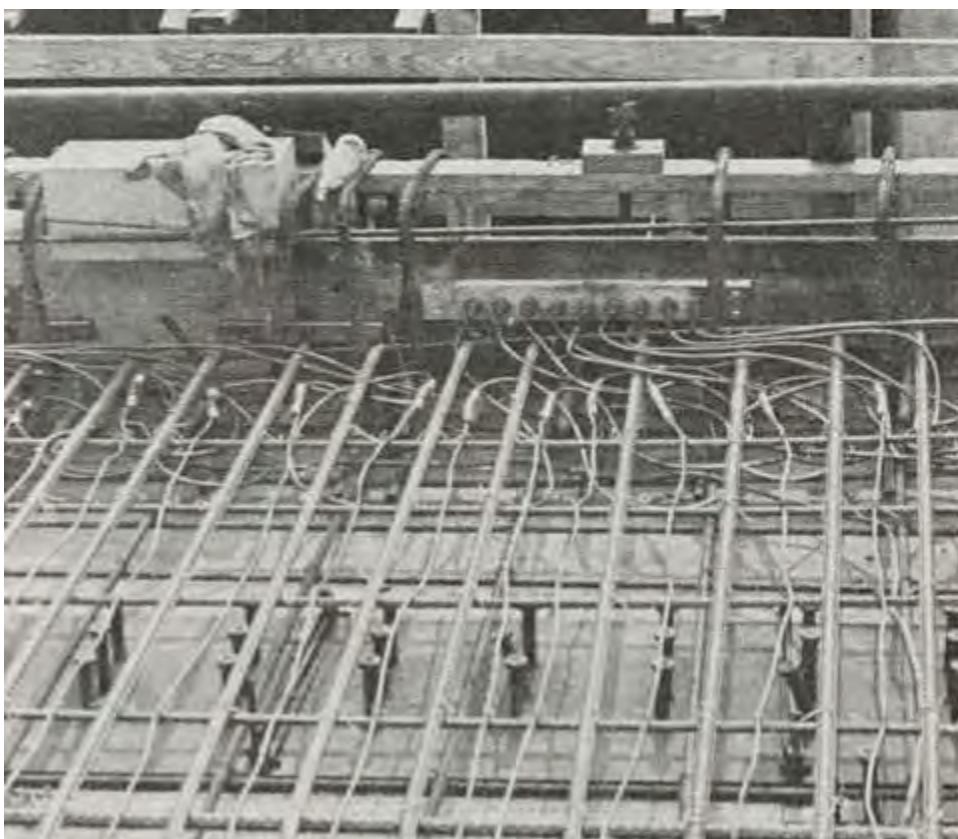


Figure 6.1-1 : Système à fils chauffants intégrés dans une dalle avant la coulée du béton (James, Havens, et al. *Heating Bridge Decks by Electrical Resistance*, 1978, Kentucky Department of Transportation)

6.1.2 Système de chauffage hydronique

Le système de chauffage hydronique consiste en une série de tuyaux encastrés dans une dalle de béton où circule une solution chaude d'eau et de glycol qui chauffe la dalle et fait fondre la neige et la glace qui s'y dépose. Similairement au système à fils chauffants intégrés à la dalle, le système peut être la dalle structurale elle-même ou une mince dalle de recouvrement de béton d'environ 70 mm de profondeur qui est ajouté au-dessus de la dalle structurale. Dans le cas où le système de chauffage hydronique est installé comme dalle de recouvrement à la dalle structurale, une couche d'isolation sous-jacente peut être ajoutée afin de maximiser la transmission de chaleur vers la surface supérieure et réduire l'énergie nécessaire à son bon fonctionnement. En fonction de l'étendue de son application et de la pression requise pour faire circuler le liquide dans un circuit fermé, une ou plusieurs centrales de pompage sont nécessaires pour assurer le fonctionnement du système.

En général, les systèmes hydroniques peuvent être plus durables que les systèmes électriques. Néanmoins, le système n'est pas à l'abri des fuites de liquide, de bris et défaillance du système de pompage. La consommation énergétique de ces systèmes est hautement variable, entre 100 à 700 W/m², mais se situe habituellement aux environs de 400 W/m². Plusieurs essais de petites envergures ont été réalisés sur des ponts de petites portées en Amérique du Nord tel que sur le pont piétonnier près du stade de l'université de

Nebraska-Lincoln²⁴. Selon notre expérience et selon la documentation consultée, ce type de système n'a jamais été appliqué sur un pont de l'envergure du pont Jacques-Cartier.

En principe, ce système est applicable au tablier du pont Jacques-Cartier comme présenté à la Figure 6.1-4. Cependant, la logistique pour instaurer des stations centrales de chauffage et de distribution serait onéreuse et complexe techniquement vu l'envergure du pont ainsi que la pression hydraulique nécessaire pour combler le différentiel important de hauteur du pont par rapport au sol.

²⁴ "Heated Bridge Technology" (1999). U.S. Department of Transportation – Federal Highway Association. Publication No. FHWA-RD-99-158

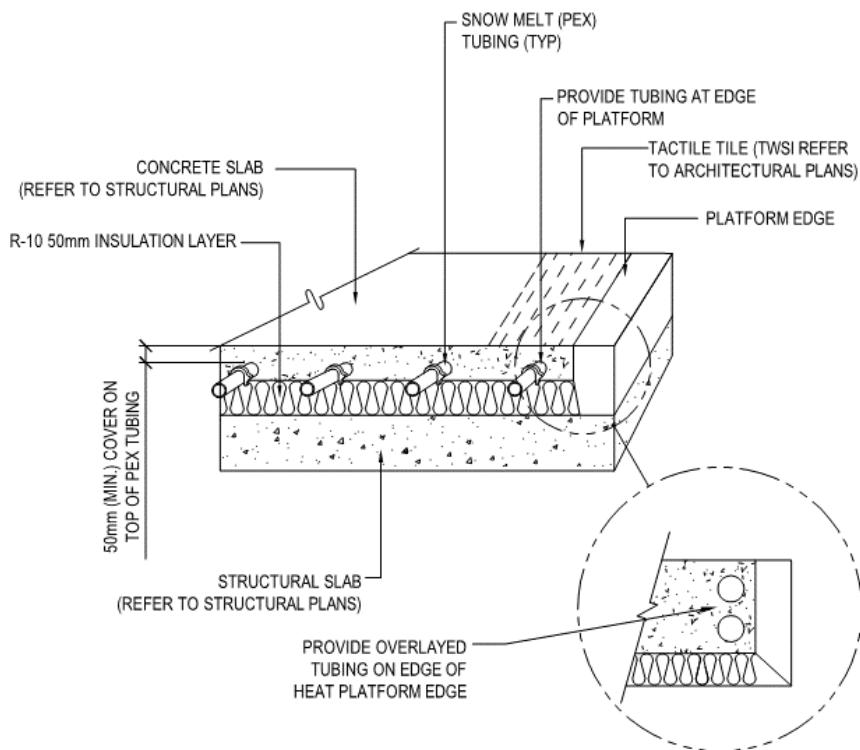


Figure 6.1-2 : Coupe type d'un système de chauffage hydronique sur dalle structurale

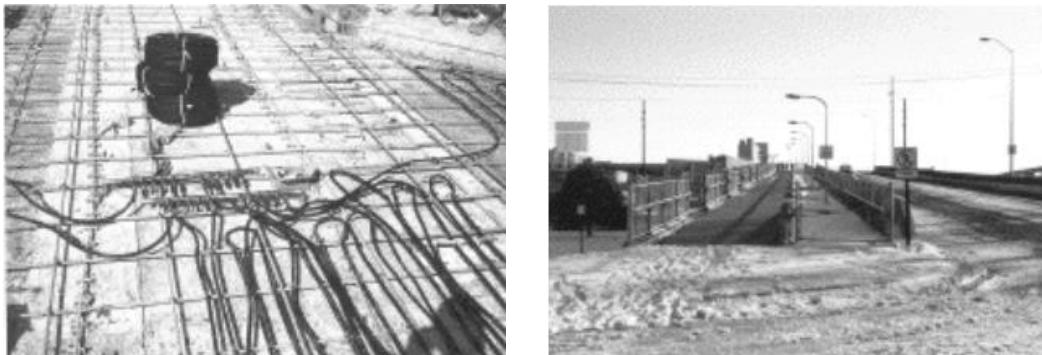


Figure 6.1-3 Pont piétonnier de l'université de Nebraska-Lincoln (à gauche : système de distribution des tubes hydronique, à droite : condition du tablier 31 heures après son activation suite à un épisode de neige)²⁴

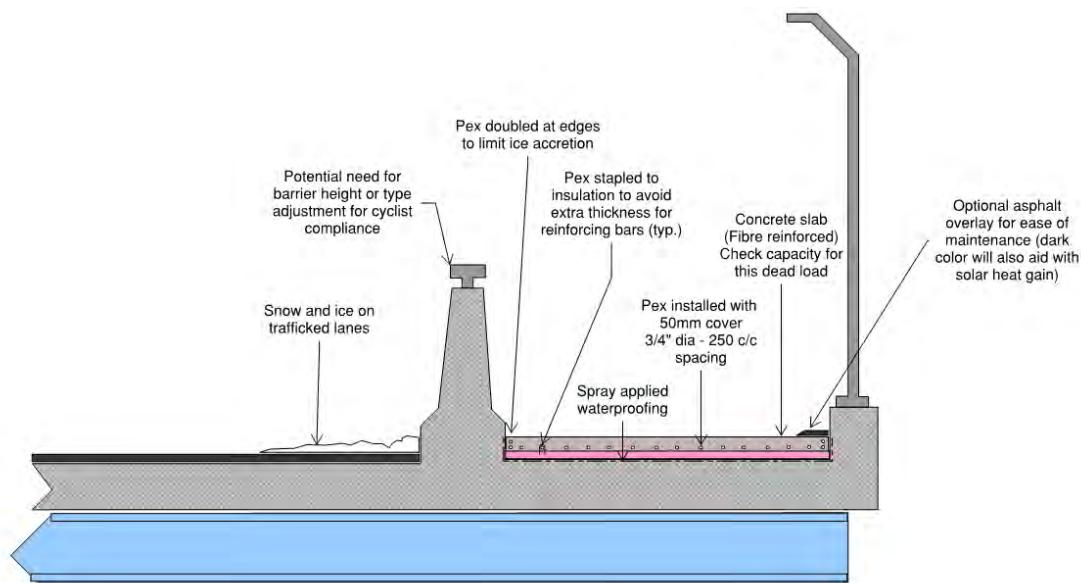


Figure 6.1-4 : Coupe - Intégration théorique du système de chauffage hydronique au pont Jacques-Cartier

6.1.3 Système de chauffage à béton conducteur

De nouvelles recherches se poursuivent actuellement qui utilisent un béton conducteur d'électricité afin de chauffer les dalles de tablier. Ce béton respecte les critères de performances structurales et de durabilité demandés par la norme et les concepteurs lors de nouvelles conceptions. Le béton conducteur contient du carbone, fibres d'acier et des produits de graphite afin de transmettre l'électricité.

Un système électrique composé de conduits électriques et de boîtes de jonction est intégré dans la dalle structurale du pont, qui est non conductrice, où des électrodes en ressortent vers le haut. Une surépaisseur de béton conducteur est alors superposée à la dalle ce qui permet au courant de circuler entre les électrodes et chauffer la dalle par principe de résistance et conversion d'électricité en chaleur.

Toutefois, les recherches en sont toujours à leurs premiers pas et un nombre limité d'applications a été réalisé jusqu'à présent. Selon nos recherches, le pont Roca Spur, au Nebraska, est la seule application en ponts à utiliser cette technologie²⁵.

²⁵ Tuan, Christopher Y. et Yehia, Sherif A., "Implementation of Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing at Roca, Nebraska" (2004). Civil Engineering Faculty Proceedings & Presentations. Paper 3.



Figure 6.1-5 : Intégration des conduits électriques, boîtes de jonctions et électrodes à la dalle structurale du pont Roca Spur, Nebraska



Figure 6.1-6 : Électrodes qui dépassent de la dalle structurale du pont Roca Spur, Nebraska



Figure 6.1-7 : Coulée du béton conducteur en surépaisseur à la dalle structurale du pont Roca Spur, Nebraska



Figure 6.1-8 : Essai de fonte avec le béton conducteur sur le pont Roca Spur, Nebraska

6.1.4 Appel d'expression d'intérêt

Afin d'évaluer le maximum d'options et permettre à de nouvelles technologies de se manifester pour chauffer la dalle de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier, PJCCI a publié un appel d'expression d'intérêt à l'automne 2017. Deux entreprises ont répondu à cet appel d'expression d'intérêt :

- > La première offrant une technologie de tapis chauffants qui sont apposés sur la dalle du tablier ;
- > L'autre offrant une technologie de membrane chauffante qui combine le produit à une membrane d'usure et d'imperméabilisation.

6.1.5 Technologie de tapis chauffants

Les tapis chauffants consistent en une plaque métallique chauffante enrobée d'une ou plusieurs couches de résine à base de polyuréthane, polyurée, aliphatiques et hybrides. La plaque métallique du système est chauffée par des fils électriques qui, par résistance, convertissent le courant électrique en chaleur. Le système de chauffage est formé d'un assemblage de plusieurs tapis branchés individuellement et déposés directement sur la dalle du pont.

Initialement développés pour sécuriser les marches d'escalier qui s'enneigent et s'englacent en hiver, ces tapis chauffants ont été appliqués sur des projets commerciaux de faible envergure où une géométrie sur mesure a été conçue afin de répondre aux exigences propres à ces projets.

Selon le fournisseur, aucun ancrage n'est nécessaire pour son système de chauffage puisque le poids propre de ces derniers les empêche de se déplacer. Toutefois, le passage de véhicules d'entretien sur la piste multifonctionnelle et les effets dynamiques d'une dalle de tablier de pont sous le passage de véhicules n'ont pas été considérés lors de la conception initiale des tapis. Afin que les tapis chauffants soient bien adaptés aux conditions et besoins du pont Jacques-Cartier, certaines modifications ont dû être apportées à leur conception (voir Section 6.4.1.4).



Figure 6.1-9 : Exemple de tapis chauffants

6.1.6 Technologie de membranes chauffantes

Le système de membrane chauffante consiste en une pellicule de carbone chauffant flexible installé à même une membrane d'étanchéité et d'usure.

La pellicule de carbone est déposée et intégrée entre les diverses couches d'application de la membrane d'étanchéité et d'usure. Cette pellicule est adaptée aux environnements extérieurs où il est souhaitable de prévenir la formation de neige et de glace.

Selon la fiche technique de la membrane d'étanchéité et d'usure, celle-ci offre une grande flexibilité ce qui lui permet de recouvrir des fissures allant jusqu'à 3,5 mm de largeur sans être endommagé. De plus, cette membrane a une résistance élevée aux impacts ce qui lui confère une durabilité accrue et une résistance aux ripages des lames de déneigeuses. La membrane est chimiquement et physiquement inerte aux agressions des ions de chlorures et adhère très bien aux surfaces de béton. Une finition rugueuse peut être appliquée sur la couche finale de la membrane afin d'assurer une bonne adhérence.

La membrane d'étanchéité et d'usure a été appliquée sur de nombreux ponts à travers le monde, mais jamais combinée avec un film chauffant. Une application a été effectuée en 2017 sur le pont piétonnier qui enjambe la rue South Reserve Street à Missoula, au Montana, avec une autre variante d'une pellicule chauffante qui s'apparente beaucoup à la pellicule étudiée dans ce rapport, tous deux des produits du même fournisseur. Toutefois, ce pont, qui est présenté à la Figure 6.1-12, est très récent et donc très peu de données sont disponibles sur l'efficacité de son système de chauffage. Néanmoins, selon des données partagées par le fabricant des dalles composites chauffantes de ce pont, la membrane

chauffante de 600 W/m^2 installée sur ce pont permet d'obtenir un différentiel de température de 33°C après 50 minutes d'activation. Selon le fabricant, le système a bien performé sous tous les conditions de neige encourues lors de l'hiver 2017-18. Les seuls problèmes qui se sont produits impliquent le système d'activation automatique qui a nécessité des modifications aux réglages afin de bien mesurer les conditions environnantes et assurer l'activation du système de chauffage lorsque les seuils d'activation sont atteints. La Figure 6.1-13 présente un comparatif entre la surface enneigée du pont piétonnier de la rue South Reserve Street lors de précipitation de neige et la surface sèche et dégagée suite aux intempéries.

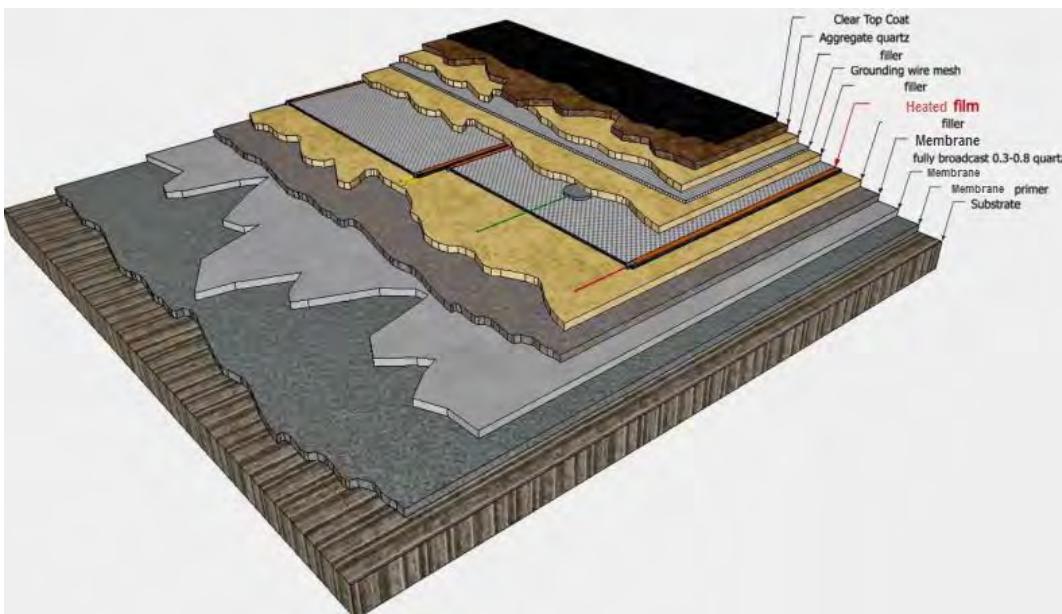


Figure 6.1-10 : Coupe de la membrane chauffante



Figure 6.1-11 : Exemple de membrane d'étanchéité appliquée sur un pont sans pellicule chauffante



Figure 6.1-12 Pont piéton de la rue South Reserve Street ou le (<http://www.dci-engineers.com/project/reserve-street-pedestrian-bridge>)



Figure 6.1-13 Surface enneigée lors de précipitations (à gauche) et surface sèche et dégagée suite aux précipitations (à droite) du pont piéton de la rue South Reserve Street

6.2 Contraintes spécifiques au projet

Puisque le pont Jacques-Cartier est un pont existant et non une nouvelle infrastructure en cours de conception, plusieurs contraintes doivent être considérées afin d'identifier les systèmes de chauffage les mieux adaptés pour ce cas particulier. Ces contraintes permettent aussi d'identifier les technologies pour lesquels des travaux additionnels sur la structure existante devront être effectués afin de les accommoder.

6.2.1 Capacité portante du pont

Selon l'évaluation de la capacité portante de la piste multifonctionnelle effectuée par Tetratech en 2017 lors du contrat 62408, les sections 5, 8 et 9 du pont Jacques-Cartier ne possèdent pas la capacité portante suffisante pour supporter la charge combinée provenant de l'équipement de déneigement et de la neige lors des opérations de déneigement.

Il va donc de soi que toute augmentation du poids propre du tablier dû à l'installation d'un système de chauffage doit faire l'objet d'une analyse de la capacité portante afin de déterminer si un renforcement de la structure existante est nécessaire. Ceci ne se limite pas seulement aux sections 5, 8 et 9 du pont et devra prendre en considération les charges vives des véhicules d'entretien et de déneigement, si requis.

6.2.2 Dégagement vertical

Une barrière dissuasive est présente le long de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier. Le dégagement vertical sous cette barrière est de 2,55 m. La norme de conception des pistes cyclables du Ministère des Transports du Québec spécifie un dégagement vertical minimal de 2,5 m afin d'assurer la sécurité des cyclistes lorsque ceux-ci pédalent en position verticale. Toute surépaisseur de plus de 0,05 m résulterait donc en un dégagement vertical non conforme selon les critères du MTQ.

6.2.3 Éclaboussure de produit de déglaçage

Une glissière de sécurité sépare la piste multifonctionnelle des voies de circulation du pont. Celle-ci a une hauteur de 900 mm du côté de la piste multifonctionnelle et de 840 mm du côté des voies de circulation et est munie d'un rail métallique de 275 mm de hauteur qui est superposé sur la glissière de béton.

Même si aucun produit de déglaçage n'est épandu sur la piste multifonctionnelle, la circulation des voitures ainsi que le passage des déneigeuses sur les voies de circulation adjacente projettent du sel de déglaçage par-dessus la glissière de sécurité et sur la piste multifonctionnelle (voir Section 7.3.2). Le système de chauffage devra donc être résistant aux produits de déglaçage qui pourraient provenir de la route adjacente ou d'un épandage de produits de déglaçage sur la piste multifonctionnelle.

6.2.4 Ancrage à la dalle

La dalle du pont Jacques-Cartier est fortement armée d'armatures et contient des gaines de post-tension ce qui limite le type d'ancrage que le système de chauffage peut employer. Si

le système de chauffage requiert un perçage de la dalle afin de s'ancrer, le fournisseur devra démontrer qu'aucune barre d'armature ou gaine de post-tension n'est sectionnée par le processus et que l'intégrité structurale ainsi que la durabilité de la dalle sont maintenues.

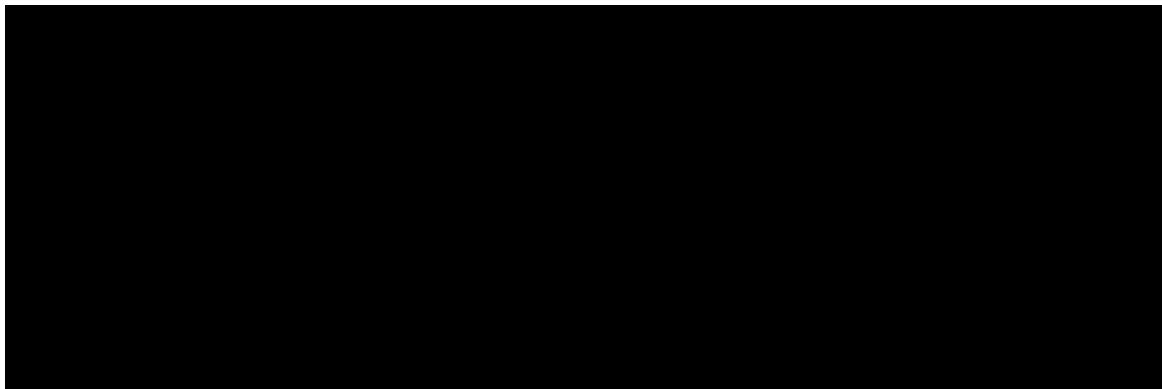


Figure 6.2-1 Coupe type de la dalle du tablier du pont Jacques-Cartier

6.2.5 Joint de dilatation

Plusieurs joints de dilatation croisent le tracé de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier. Ceux-ci créent des irrégularités dans la surface de roulement et sont propices à des accumulations d'eau qui ont le potentiel de geler en hiver. Le système de chauffage devra permettre l'intégration d'un détail particulier au niveau des joints de dilatation afin d'assurer un passage sécuritaire des usagers sans dénivellation considérable dans la surface de roulement.

6.2.6 Drainage

Lors de son opération, le système de chauffage de la piste multifonctionnelle risque de générer un volume important d'eau de fonte. L'eau de fonte se trouvera près du point de congélation lors de son déversement dans les drains du pont. Si ceux-ci ne sont pas chauffés, l'eau de fonte risque de geler à l'intérieur des drains créant un risque de les boucher et par conséquent, une accumulation d'eau et de glace sur la chaussée.

Pour qu'un système de chauffage fonctionne efficacement et que celui-ci ne génère pas des risques de formation de glace sur la chaussée de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier, une solution devra être formulée afin de bien drainer l'eau de fonte et s'assurer qu'elle ne gèle pas à l'intérieur des drains.

De plus, le devers de la piste multifonctionnelle change de direction à différents endroits sur le pont Jacques-Cartier. Parfois, le devers est orienté vers la glissière de sécurité qui sépare la circulation routière de la piste multifonctionnelle. À d'autres endroits, le devers est orienté vers l'extérieur du pont. De surcroit, certains points bas existent sur la chaussée de la piste multifonctionnelle où de l'eau s'accumule et ne se déverse vers aucun drain. La conception du système de chauffage devra donc considérer ces réalités et envisager une solution pour que l'eau de fonte s'évacue adéquatement sans entraîner une formation de glace sur la chaussée ou de glaçons sur la paroi extérieure du pont. Cela pourrait présenter un risque de sécurité à la circulation de voitures, piétons et cyclistes sous-jacents.

6.2.7 Combinaison aux méthodes de déneigement conventionnel

Les systèmes de chauffage ne sont pas infaillibles. En effet, par leurs différentes conceptions, les systèmes de chauffage sont sujets à l'usure, au vandalisme, au défaillance et au bris qui pourraient les rendre moins efficaces ou même complètement non opérationnels. Afin de mitiger les conséquences de ces situations imprévisibles, il est préférable de prévoir des mesures afin de ne pas réduire le service offert aux utilisateurs, c'est-à-dire, prévenir la fermeture complète de la piste multifonctionnelle jusqu'à la réparation du système de chauffage. En soi, le déneigement par méthode conventionnelle permettrait de pallier au mauvais fonctionnement d'un système de chauffage. En conséquence, il est important pour tout système de chauffage d'être en mesure d'être combiné aux méthodes de déneigement conventionnel sans en affecter sa durabilité ou son fonctionnement.

6.2.8 Rapidité de fonte

Les systèmes de chauffage font fondre la neige et la glace par principe de transmission de conduction de chaleur, c'est-à-dire par le contact avec sa surface chaude. Si les précipitations de neiges sont peu intenses et l'accumulation de neige s'effectue lentement, les systèmes de chaleur peuvent faire fondre la neige au fur et à mesure que celle-ci se dépose sur sa surface.

Toutefois, si les précipitations de neige sont fortes et rapides lors d'une tempête, de la neige pourrait s'accumuler sur la surface du système de chauffage et augmenter en épaisseur si ce dernier ne transmet pas suffisamment de chaleur. Si un tel scénario devait se produire, le système de chauffage pourrait s'avérer inefficace puisqu'une couche de neige mouillée pourrait se former entre la surface du système de chauffage et la couche de neige fraîche. La neige mouillée, étant plus dense, requiert une quantité importante d'énergie avant de changer à la phase liquide. Cette neige mouillée agit comme un isolant thermique et ralentit la fonte de neige.

Afin de prévenir une fermeture prolongée de la piste multifonctionnelle suite à un tel événement, le système de chauffage devra transmettre suffisamment de chaleur pour performer adéquatement lors d'épisode de précipitation intense ou devra se combiner aux méthodes de déneigement conventionnelles pour pallier ses limitations.

6.2.9 Effets thermiques sur la dalle

L'effet d'un différentiel thermique sur le tablier devra être considéré lors d'une implémentation d'un système de chauffage pour opération à long terme. Pour bien comprendre ses effets thermiques et leurs conséquences sur la dalle structurale de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier, se référer à la Section 6.6 qui adresse ce sujet en profondeur.

6.3 Comparaison des différents systèmes de chauffage pour implantation sur le pont Jacques-Cartier

Le Tableau 6.3-1 présente une comparaison et identifie les divers enjeux et/ou limitations des différents systèmes de chauffage couverts par la présente étude et présentés à la Section 6.1 pour une implantation sur le pont Jacques-Cartier. Suite à la compréhension des contraintes du projet et des limitations de chacun des systèmes, il a été conclu que certaines technologies de chauffage ne sont pas considérées comme solution envisageable à court terme pour le tablier de la piste cyclable du pont Jacques-Cartier. Les sous-sections ci-dessous récapitule les enjeux majeurs que certaines technologies possèdent.

6.3.1 Système à fils chauffants intégrés dans le béton

Pour le système à fils chauffants intégrés dans le béton, plusieurs problématiques expliquent que ce système n'est pas propice à l'infrastructure existante du pont Jacques-Cartier :

- > Pour l'option où les fils chauffants seraient intégrés dans la dalle structurale du pont, ceci implique des modifications considérables du système structural de la dalle du tablier du pont Jacques-Cartier ;
- > Quant à l'option où les fils seraient intégrés dans une surépaisseur de béton, celle-ci rehausserait le niveau de la piste entraînant une non-conformité du dégagement vertical de la piste ainsi qu'un ajout de poids propre considérable sur la dalle de béton existante. De plus, le poids propre additionnel, dans l'ordre de 170 kg/m², qui serait ajouté à la structure nécessiterait une évaluation approfondie de la capacité structurale du pont et l'élaboration de travaux de renforcement afin de supporter ce système ;
- > En outre, à notre connaissance, le système est susceptible aux bris et aux défaillances. Par sa conception, ce système est difficilement réparable dans l'éventualité d'un bris ou d'une défaillance du système.

Pour ces raisons, nous ne considérons pas le système à fils chauffants intégrés dans le béton approprié pour l'infrastructure existante du pont Jacques-Cartier. Cependant, cette solution pourrait être envisagée en cas de remplacement de la dalle du pont Jacques-Cartier.

6.3.2 Système de chauffage hydronique

Pour le système de chauffage hydronique, plusieurs projets ont été effectués dans le monde qui démontre que ce système fonctionne convenablement sur des ponts de petite envergure. Toutefois, plusieurs problématiques expliquent que ce système n'est pas propice à l'infrastructure existante du pont Jacques-Cartier :

- > Ce type de système n'a jamais été appliqué sur des ponts de longues portées et de hauteurs significatives. Ceci est dû à la problématique de pompage de liquide qui doit surmonter le différentiel de hauteur manométrique ainsi que la pression nécessaire pour le faire circuler le liquide chauffant sur de grandes

longueurs, des réalités bien réelles et difficiles à surmonter pour le pont Jacques-Cartier ;

- > Similairement au système à fils chauffants intégrés dans le béton, ce système peut être implanté directement dans la dalle structurale du pont ou dans une surépaisseur de béton qui est ajouté à la dalle de béton existante. Les problématiques reliées au système à fils chauffants intégrés dans le béton s'appliquent donc aussi pour cette conception ;
- > Par sa conception, ce système est difficilement réparable dans l'éventualité d'un bris, d'une fuite ou d'une défaillance du système.

Pour ces raisons, nous ne considérons pas le système de chauffage hydronique approprié pour l'infrastructure existante du pont Jacques-Cartier. Cependant, cette solution pourrait être envisagée en cas de remplacement de la dalle du pont Jacques-Cartier.

6.3.3 Système de chauffage à béton conducteur

Pour le système de chauffage à béton conducteur, plusieurs problématiques expliquent que ce système n'est pas propice à l'infrastructure existante du pont Jacques-Cartier :

- > Ce système requiert l'intégration du système à la dalle structurale du pont ;
- > Par sa conception, ce système est difficilement réparable dans l'éventualité d'un bris ou d'une défaillance du système ;
- > De plus, la nature récente de cette technologie et le peu de données disponibles sur sa performance n'en font pas une technologie attrayante pour un pont de l'envergure et de l'importance du pont Jacques-Cartier ;

Pour ces raisons, nous ne considérons pas le système de chauffage à béton conducteur approprié pour l'infrastructure existante du pont Jacques-Cartier. Cependant, cette solution pourrait être envisagée en cas de remplacement de la dalle du pont Jacques-Cartier.

6.3.4 Membrane chauffante et tapis chauffant

La membrane chauffante et les tapis chauffants peuvent être accommodés, adaptés et installés sur le pont Jacques-Cartier. Suite à la réception des formulaires de déclaration d'intérêt de ces entreprises, PJCCI a mandaté ces entreprises afin de mettre à l'essai leur produit sur le pont Jacques-Cartier pour mieux évaluer leurs performances. Ceux-ci sont traités en plus amples détails aux Sections 6.4.1 et 6.4.2 respectivement.

Tableau 6.3-1 Tableau comparatif des différents systèmes de chauffage

	Système à fils chauffants intégrés dans le béton	Système de chauffage hydronique	Béton conducteur	Membrane Chauffante	Tapis Chauffant
Encastrement dans la dalle	Peut être encastré dans la dalle structurale ou superposé sur la dalle	Peut être encastré dans la dalle structurale ou superposé sur la dalle	Encastré dans la dalle structurale	Superposé sur la dalle	Superposé sur la dalle
Surépaisseur	~ 70 mm si ajoutés en surépaisseur	~ 70 mm si ajoutés en surépaisseur	Non applicable puisque intégré à la dalle structurale elle-même	~ 11 mm	20 à 30 mm
Poids propre	~ 170 kg/m ² si ajoutés en surépaisseur	~ 170 kg/m ² si ajoutés en surépaisseur	Non applicable puisque intégré à la dalle structurale elle-même	~ 25 kg/m ²	19 kg/m ² à 58 kg/m ² ³
Consommation énergétique du système¹	540 à 645 W/m ²	325 à 700 W/m ² (~ 400 W/m ² typ.)	~ 515 W/m ²	520 à 605 W/m ²	540 à 970 W/m ²
Capacité énergétique requise	480 V	Varie selon les spécifications des pompes et bouilleurs	200 V	208 V	30 V
Enjeux et limitations	<ul style="list-style-type: none"> • La structure pourrait ne pas pouvoir soutenir un poids propre si élevé² • Le système est prone au bris et défaillance • Les bris et défaillance sont difficilement réparables • Demande énergétique élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • La structure pourrait ne pas pouvoir soutenir un poids propre si élevé² • La surépaisseur résulterait en un dégagement vertical non conforme • Logistique d'implantation complexe due à l'envergure et la hauteur du pont • Les bris, fuites et défaillances sont difficilement réparables • Demande énergétique élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • Le système doit être intégré dans la dalle structurale elle-même. • Les bris et défaillance sont difficilement réparables • Nouveau système avec très peu de données • Demande énergétique élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • Système combiné jamais testé sur des tabliers de pont • Les bris et défaillance sont difficilement réparables • Demande énergétique élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • Système jamais appliqué sur des tabliers de pont • Garantie faible • Les tapis doivent être retirés à la fin de l'hiver • Fixation au tablier problématique • Bas voltage nécessitant transformateur particulier • Résistance faible à l'usure dû aux lames de déneigeuses • Demande énergétique élevée

¹ : Ajustable selon le besoin² : Selon l'étude de capacité portante du pont Jacques-Cartier effectué par Tetra Tech/Structura lors du contrat 62408³ : Tel que conçu lors du projet pilote, les tapis chauffants pesaient plus de 100 kg/m²

6.4 Systèmes testés – Projet pilote

6.4.1 Tapis chauffant

6.4.1.1 Description

Pour le projet pilote du pont Jacques-Cartier, certaines modifications au tapis chauffant conventionnel ont été nécessaires afin d'adapter le système aux enjeux et nécessités du pont Jacques-Cartier. La plaque d'aluminium chauffante a été remplacée par une plaque d'acier de 3/16" pour supporter le poids des véhicules d'entretien et de déneigement et la géométrie des tapis a été adaptée afin que ceux-ci s'emboîtent et se vissent l'un dans l'autre afin de prévenir leurs déplacements. Il demeure néanmoins questionable si les vis vont demeurer en place sous les vibrations et le fléchissement constant du pont sous les charges vives des véhicules en circulation.

Puisque la température de surface des tapis est contrôlée par la longueur et la taille des fils qui chauffent la plaque métallique des tapis, les tapis chauffants ne fonctionnent qu'à une seule puissance. Afin d'évaluer la performance de ces tapis et de déterminer la puissance optimale pour le bon fonctionnement du système, trois différentes puissances de tapis chauffants ont été mises à l'essai, 50 W/pi², 70 W/pi² et 90 W/pi² (ce qui équivaut à 540 W/m², 750 W/m² et 970 W/m² respectivement) comme présentés à la Figure 6.4-1 ci-dessous.

Dans le cadre du projet pilote, dix-huit tapis chauffants de 3 * 4 pieds ont été installés entre la pile 27 et la pile 26 de la section 8 du pont Jacques-Cartier. Six de ces tapis étaient de puissance 50 W/pi², six autres étaient de puissance 70 W/pi² et les six derniers étaient de puissance 90 W/pi². Pour consulter l'agencement général des tapis chauffants mis à l'essai sur le pont, se référer à l'Annexe 6.1.

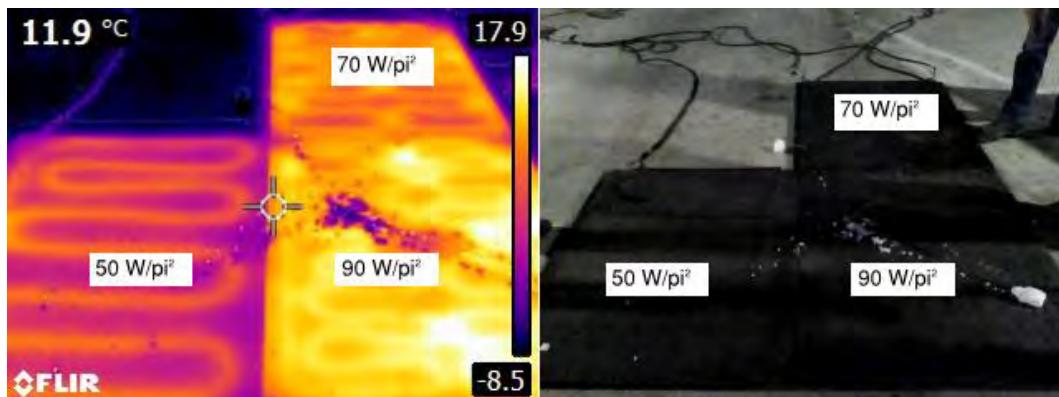


Figure 6.4-1 : Photo infrarouge (à gauche) et optique (à droite) des variantes de puissances des tapis chauffants mis à l'essai en atelier

6.4.1.2 Essai en atelier

Le 6 février 2018, trois prototypes de tapis chauffants ont été installés et testés à l'intérieur du pavillon de l'Île Sainte-Hélène. Ces derniers avaient une puissance de 50 W/pi²,

70 W/pi² et 90 W/pi². La présente section détaille les observations ainsi que les performances mesurées du système de chauffage dans un environnement protégé, sans aucun effet du vent. Pour consulter le rapport complet de cet essai, se référer à l'Annexe 6.2.

Un test mécanique où le camion de déneigement de la piste multifonctionnelle utilisé lors des essais de déneigement par méthode conventionnel circule sur les tapis chauffants a été effectué. Une légère déformation au centre des tapis a été observée ainsi qu'un soulèvement des coins des tapis. Cette déformation semble donc indiquée que sans ancrage, il est vraisemblable que les vis des tapis chauffants se détachent et que ceux-ci se déplacent lors du passage régulier des équipements de déneigement et d'entretien.

Des essais de puissance (c.-à-d. fonte de neige) ont été effectués sous différentes quantités de neige (voir la Figure 6.4-2). Comme prévu, le tapis à 90 W/pi² chauffe plus rapidement et atteint un différentiel de température plus important que les autres tapis, autour de 45°C contre 36°C pour le tapis de 50 W/pi². Il est à noter que ce différentiel de température a été mesuré dans un environnement contrôlé et sans vent et que ce différentiel devrait vraisemblablement être réduit lors des essais sur le pont en conditions réelles et non contrôlées.

Il a été observé que sous une mince poudrerie de neige, les tapis fondent la neige aisément, surtout le tapis de 90 W/pi². Ceci simule la situation où les tapis sont activés avant une tempête de neige.

Sous une charge plus importante de neige, les tapis peinent à faire fondre la neige. Ceci simule la situation où les tapis sont activés après une tempête de neige et une forte accumulation de neige. Après 25 minutes de chauffe, un monticule de neige était toujours présent sur chacun des tapis. Il a été observé qu'une couche de neige mouillée se formait au contact des tapis chauffants (voir la Figure 6.4-3). Cette neige mouillée, étant plus dense, requiert une quantité importante d'énergie avant de changer à la phase liquide et agit en quelque sorte d'isolant thermique qui prévient la fonte de neige rapide. Néanmoins, le diamètre du monticule s'est réduit avec le temps aux endroits où l'épaisseur de neige était moindre. Il est donc privilégié d'activer les tapis avant un épisode de neige ou de combiner les tapis chauffants à un déblayage mécanique.

Il a été observé que de l'eau se forme sur les tapis suite à la fonte de la neige. Avec le temps, cette eau s'évapore progressivement des tapis. Le tapis de 90W/pi² s'assèche considérablement plus rapidement que le tapis de 50 W/pi² (voir les Figure 6.4-2 et Figure 6.4-3). Il est donc suggéré que lors des essais, les tapis demeurent activés suite à la fonte de la neige et suite aux tempêtes pour permettre aux tapis de s'assécher et prévenir la formation de glace.



Figure 6.4-2 : Test de fonte sous une quantité importante de neige



Figure 6.4-3 : Section d'un monticule de neige après 25 minutes de fonte

6.4.1.3 Connexions électriques et câblage

Pour alimenter les tapis chauffants sur le pont Jacques-Cartier dans le cadre du projet pilote, une source d'alimentation a été acheminée au tablier du pont à partir du panneau de distribution existant situé au pied de la pile 26. L'alimentation triphasée de 600 V a été acheminée à un séparateur de phases. Ce dernier était lui-même connecté à trois différents transformateurs monophasés qui convertissaient la tension électrique de 600 V à 30 V. Trois transformateurs individuels ont été utilisés à la place d'un seul transformateur plus grand afin de minimiser la taille du câblage à basse tension. Chaque transformateur alimentait les trois diverses sections de chauffage composées de six tapis chauffants de puissances différentes.

Le plus gros défi au niveau électrique et de connectivité des tapis chauffants était la gestion des appels de courants excessifs de ces derniers. Bien que le système de tapis chauffants ait une consommation énergétique comparable à celle de la membrane chauffante aussi mise à l'essai sur le pont Jacques-Cartier, le système de chauffage avec tapis chauffants utilise significativement plus de courant électrique dû à sa basse tension de 30V contre 208V pour la membrane chauffante.

Un autre défi au niveau électrique et de connectivité est que les tapis chauffants ne sont pas branchés en séries, ce qui veut dire que chaque tapis chauffant doit se connecter aux transformateurs via un ou deux fusibles en fonction de sa capacité de chauffage. Le grand nombre de connexions augmente donc le nombre de fusibles nécessaires ce qui a la conséquence d'augmenter à son tour la taille du boîtier électrique.

Pour plus de détails sur le système de distribution électrique pour le projet pilote des tapis chauffants, se reporter au schéma électrique de l'Annexe 6.1.

6.4.1.4 Installation au site

Les tapis chauffants ont été installés sur le pont Jacques-Cartier le 14 février 2018. Les tapis chauffants ont été déposés sur des coussins de caoutchouc qui ont été apposés directement sur la dalle du tablier. Les tapis ont ensuite été vissés dans les coussins de caoutchouc et branchés à des fils de rallonge qui se connectent aux boîtiers électriques.

La durée d'installation des dix-huit tapis n'a pris qu'une heure trente minutes. Il est à noter que cette installation ne comprenait pas l'installation des boîtiers électriques ainsi que le branchement de ces mêmes boîtiers [REDACTED]

Les boîtiers électriques, contenant les transformateurs et fusibles, ont été installés contre la glissière de sécurité et connectés [REDACTED] du pont Jacques-Cartier le 26 février 2018. À compter de cette date, les tapis chauffants étaient alimentés et fonctionnels.



Figure 6.4-4 : Les tapis chauffants sont déposés sur des coussins de caoutchoucs apposés directement sur la dalle

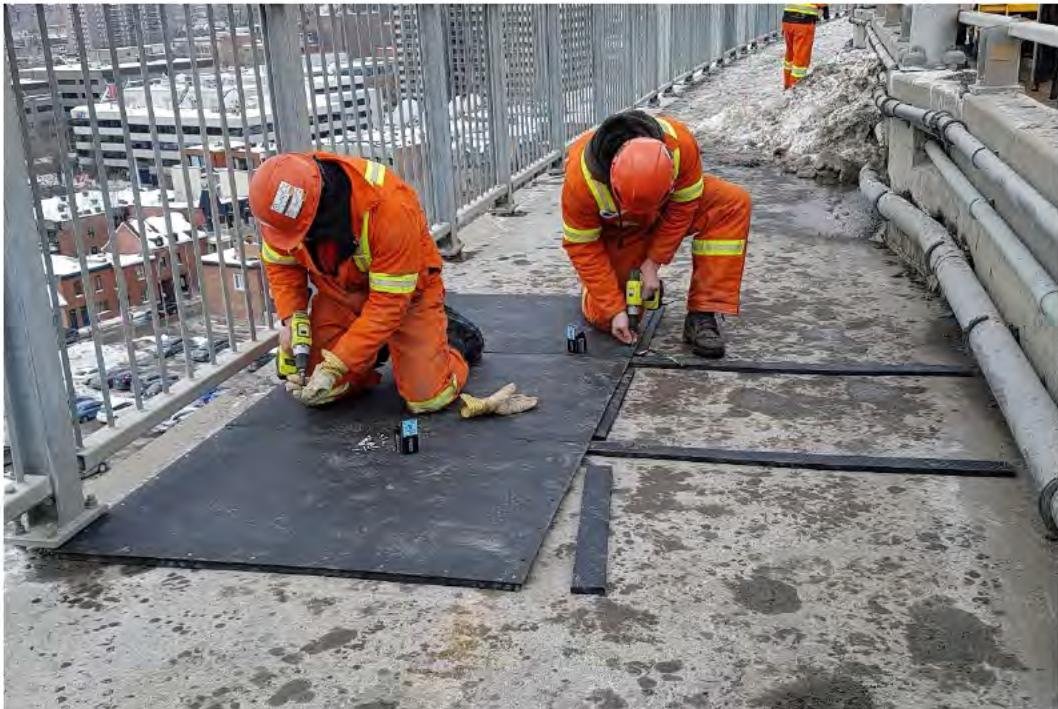


Figure 6.4-5 : Les tapis chauffants sont vissés dans les coussins de caoutchoucs

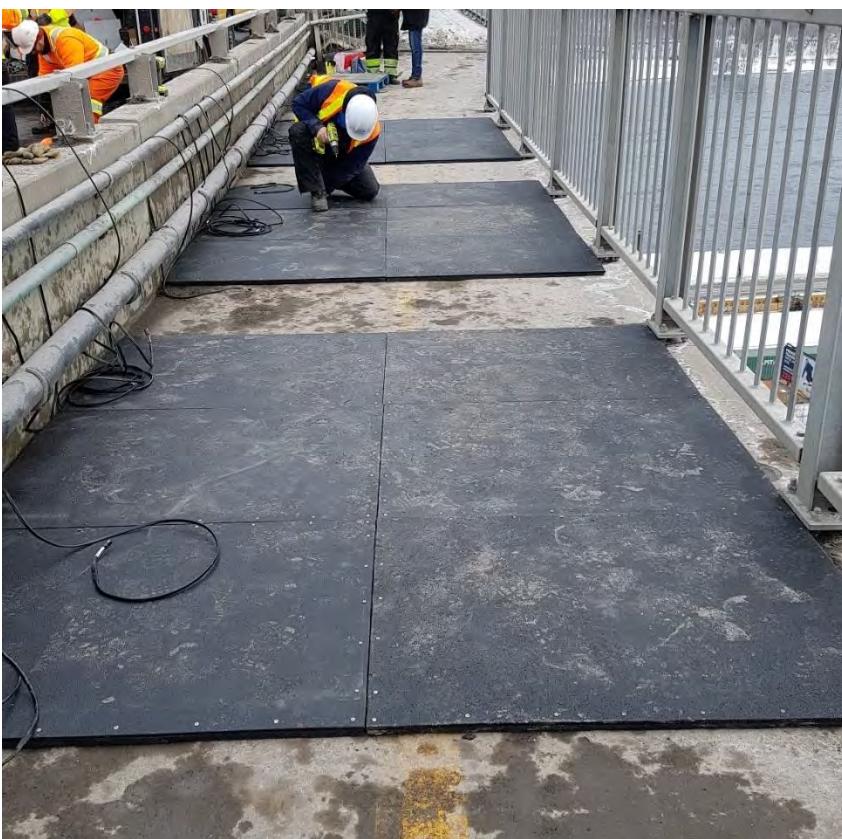


Figure 6.4-6 : Installation des tapis chauffants complétée

6.4.2 Membrane chauffante

6.4.2.1 Description

Dans le cadre de ce projet pilote, une superficie de 9,2 m de long par 1,5 m de largeur du système de membrane chauffante fut appliquée sur le trottoir, entre la pile 23 et la pile 22 de la section 6, du pont Jacques-Cartier. Se référer à l'Annexe 6.3 pour l'agencement général de l'installation de la membrane chauffante dans le cadre du projet pilote.

La membrane chauffante a été subdivisée en deux sections de superficie égale (4,6 m par 1,5 m). L'une d'entre elles est régulée par des capteurs qui prennent des mesures de température de surface, d'humidité de surface ainsi que de température environnante. Cette section nommée « section autorégulée » s'active donc par elle-même selon des paramètres prédéfinis par le fournisseur afin de faire fondre toute neige et glace qui est perçue par les capteurs. L'autre section fonctionne par activation manuelle, c'est-à-dire qu'elle ne chauffe qu'à un seul réglage lorsqu'elle est activée par un individu. Cette section est nommée « section à activation manuelle » ci-après.

Une puissance moyenne de 560 W/m² circule dans la membrane chauffante installée sur le pont Jacques-Cartier.

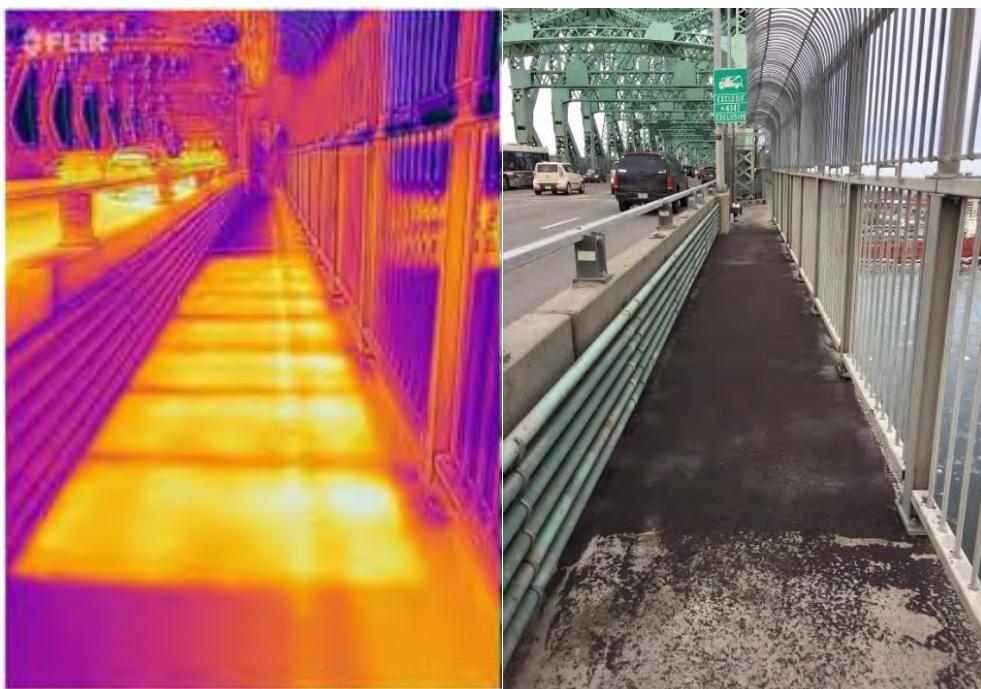


Figure 6.4-7 : Vue infrarouge de la membrane chauffante installée sur le trottoir

6.4.2.2 Connexions électriques et câblage

La membrane chauffante utilise une tension de 208V. L'alimentation à la membrane chauffante a été acheminée de façon similaire aux tapis chauffants via une source d'alimentation triphasée de 600V [REDACTED] du pont Jacques-Cartier. La tension électrique a été convertie de 600V à 208V par le biais d'un seul transformateur qui achemine la puissance électrique aux deux différentes sections de la membrane chauffantes à travers d'un répartiteur de 70A et de deux fusibles. La section à activation manuelle a été branchée directement au répartiteur tandis que la section autorégulée a été connectée à un contrôleur intelligent afin de réguler l'activation de la section selon les conditions environnantes. Le contrôleur intelligent devait quant à lui, être connecté à deux capteurs, l'un de condition d'air ambiant et l'autre de condition de surface. Étant donné que le capteur de surface doit être à niveau avec la surface de roulement et que ceci n'était pas convenable dans le cadre du projet pilote, puisqu'aucun perçage de la dalle n'est permissible, le capteur de surface a été conçu comme amovible.

Puisque que les tapis chauffants nécessitent environ 6,9 fois plus de courant que la membrane chauffante afin de fonctionner pour une même superficie, trois différentes branches de distribution ont été conçues à la place d'une seule afin de minimiser la taille du câblage à basse tension, la taille des transformateurs et permettre une installation plus facile compte tenu des conditions étroites du site.

À l'inverse des tapis chauffants, les deux différentes sections de la membrane chauffante ne requéraient qu'un seul point de connexion de 208V. Ceci signifie que beaucoup moins

de longueurs de câbles étaient nécessaires et que ces derniers pouvaient être de plus petites tailles.

Pour plus de détails sur le système de distribution électrique, se reporter au schéma 2 de l'Annexe 6.3.

6.4.2.3 Installation au site

Lors de l'installation de la membrane chauffante, il est impératif que la surface de béton sous-jacente soit sèche. De plus, les ouvriers doivent assécher le tablier au chalumeau afin de garantir qu'aucune humidité ne subsiste sur la dalle. Suite à l'assèchement de la dalle, les ouvriers augmentent ensuite la rugosité de la dalle à l'aide d'un jet de sable (voir la Figure 6.4-9).

Lorsque ces préparations de surface sont complétées, les ouvriers peuvent ensuite épandre les diverses couches de la membrane d'étanchéité en commençant par le primer et ensuite des couches isolantes de résine. Environ au centre de ces couches est déposée la pellicule chauffante (voir Figure 6.4-10). Une pellicule de mise à la terre est ensuite superposée et recouverte à nouveau par le membrane d'étanchéité. Lors de l'application de la dernière couche de la membrane, des agrégats de quartz sont épandus sur la surface afin de procurer une bonne adhérence. Se référer à la Figure 6.4-8 ci-dessous pour mieux comprendre l'application des diverses couches de la membrane chauffante.

Il est à noter que la membrane chauffante a été installé à deux reprises. La première installation de la membrane chauffante s'est déroulée le 17 février 2018.

Une deuxième installation de la membrane chauffante fut nécessaire puisque le premier système de chauffage a été victime de vandalisme moins d'une journée après son installation. L'entrepreneur a jugé que les câbles coupés rendaient impossible la réparation du système et qu'une nouvelle installation du système était nécessaire. La deuxième installation de la membrane chauffante a été effectuée le 19 mars 2018. Le retard encouru pour la mise en service de la membrane chauffante a donc limité la possibilité d'essai de la membrane en condition hivernale lors de l'hiver 2017-18.

La première installation de la membrane chauffante a duré 12 heures tandis que la deuxième installation a duré 9 heures pour la même longueur et dans des conditions météorologiques similaires ce qui semble indiquer que la durée d'installation diminue avec le degré de familiarité des ouvriers du processus d'installation.

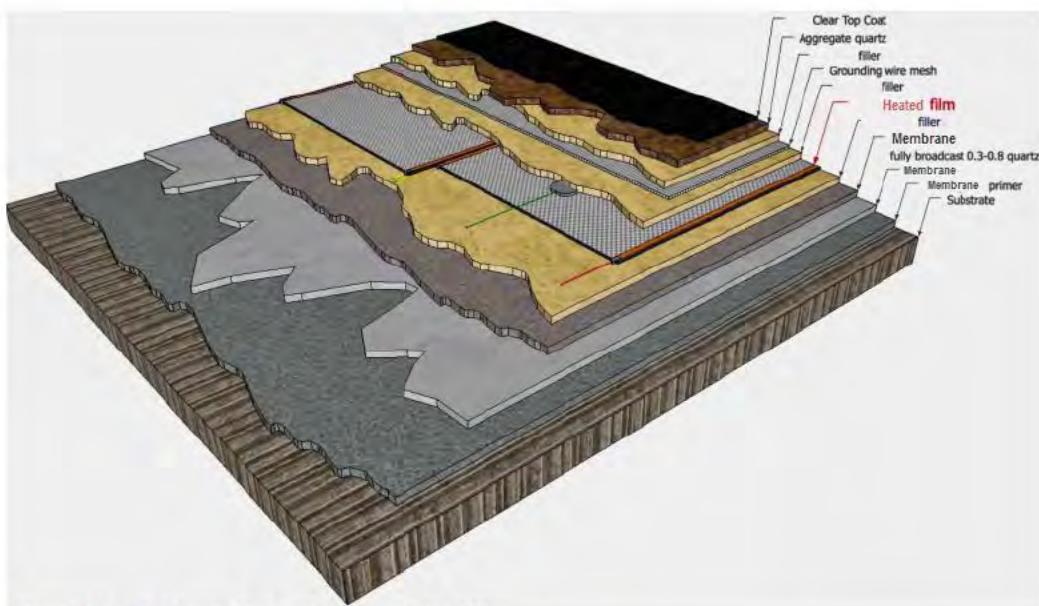


Figure 6.4-8 : Coupe de la membrane chauffante

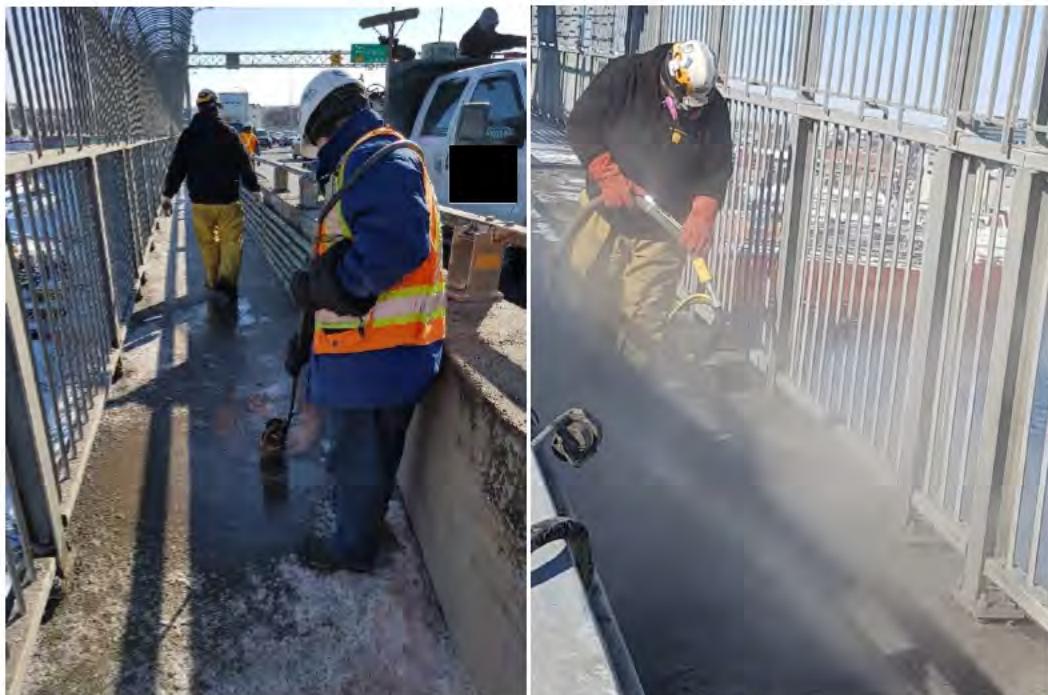


Figure 6.4-9 : Préparation de la surface au chalumeau et au jet de sable



Figure 6.4-10 : Application de la membrane et installation de la pellicule chauffante

6.4.3 Fiche de contrôle

Afin d'évaluer la performance des deux systèmes de chauffage à l'étude sur le pont, plus précisément, les tapis chauffants et la membrane chauffante, une fiche de contrôle a été formulée. Cette dernière avait pour but de standardiser les prises de mesures effectuées lors de chaque visite sur le pont. Ces mesures, de nature autant qualitative que quantitative, portent sur les critères de performance jugés importants pour un système de chauffage. La fiche de contrôle pour les systèmes de chauffage prend notamment en considération, sans toutefois s'y limiter, les données suivantes :

- > Météorologie : température extérieure, vitesse du vent, précipitations actuelles, etc. ;
- > Scénario d'activation du système de chauffage : pro actif versus réactif ;
- > Température de surface de la piste versus Température de surface du système de chauffage ;
- > Rapidité de fonte du système ;
- > Rapidité d'assèchement de la surface ;
- > Condition de surface du système de chauffage ;
- > Niveau de sécurité de la surface pour le passage des cyclistes ;
- > Autres observations telles que :

- Condition environnante au système de chauffage, telle que formation de glace suite à la fonte de la neige
- Ruissellement de l'eau de fonte vers les drains
- Conditions des drains, ces derniers sont-ils obstrués
- Toute autre observation jugée pertinente

La fiche de contrôle peut être consultée à l'Annexe 6.4 de ce rapport.

Pour les prises de températures, une caméra à imagerie thermique infrarouge de type FLIR-E6930 a été utilisée. Une juxtaposition d'une photo à une image thermique est démontrée à la Figure 6.4-11. Les données recueillies à l'aide de cet appareil ont été comparées à la donnée récoltée par le capteur de température monté sur la structure de signalisation LS3 du pont Jacques-Cartier. La calibration de l'appareil a donc été confirmée²⁶.



Figure 6.4-11 Image thermique obtenu à partir de la caméra FLIR-E6930

6.4.4 Résultats de suivi

6.4.4.1 Tapis chauffants

Les tapis chauffants ont été testés à cinq occasions suite à leurs installations. Lors de quatre de ces cinq suivis, les tapis chauffants ont été activés avant le début de la tempête de neige. Quant au suivi numéro 4, la section de 70 W/pi² a été activée suite à une accumulation de neige d'environ 2,5 cm (c.-à-d. de façon réactive).

Le Tableau 6.4-12 ci-dessous présente la météorologie lors des divers suivis qui ont été effectués. Il est à noter que tous les suivis ont été effectués lorsque la température extérieure était supérieure à -2°C. Aucun suivi n'a plus été effectué lors d'une journée froide puisque les visites ont été effectuées suite aux mois les plus ardu斯 de l'hiver 2017-2018.

²⁶ Courriel « RE: JCAP0015/CT62576: Fiche de contrôle - système de chauffage » envoyé par Omar Moussa, 2018-03-01

Tableau 6.4-12 Météorologie lors des divers suivis de performance

Numéro de suivi	Date	Température de l'air ambiant	Vent	Précipitation en cours lors de la visite	Précipitations totales lors de la journée (mm)	Neige présente sur la piste
1	8 Mars 2018 (PM)	-1°C	Faible (10km/h)	Poudrerie	5	Neige poudreuse
2	8 Mars 2018 (Soir)	-2°C	Faible (10km/h)	Neige légère	5	Neige légère
3	9 Mars 2018	-1°C	Faible (10km/h)	Aucune	15	Neige légère
4	14 Mars 2018	1°C	Faible (10km/h)	Neige forte et pluie verglaçante	11	Neige légère et "gadoue" (sloche)
5	15 Mars 2018	2°C	Faible (10km/h)	Aucune	3	Neige sale (projection depuis la route) et neige légère

Le graphique ci-dessous présente les températures mesurées de l'air ambiant, de la surface de la piste multifonctionnelle ainsi que des diverses sections lors des suivis. Tel que prévu, les températures moyennes de surface des diverses sections augmentent proportionnellement selon la puissance fournie. Lors des suivis numéro 1, 3 et 5, aucune ou très peu de précipitations étaient en cours lors des prises de température. Ceci explique pourquoi les températures de surfaces des tapis sont supérieures à celles des suivis numéro 2 et 4 où des précipitations de neige étaient en cours et refroidissaient donc la surface des tapis. Lors du suivi numéro 4, la température de la section 50 W/m² était légèrement supérieure à celle de la section 70 W/pi² puisque cette dernière a été activée suite à une accumulation de 2,5 cm de neige et de la neige y subsistait toujours (voir Figure 6.4-13).

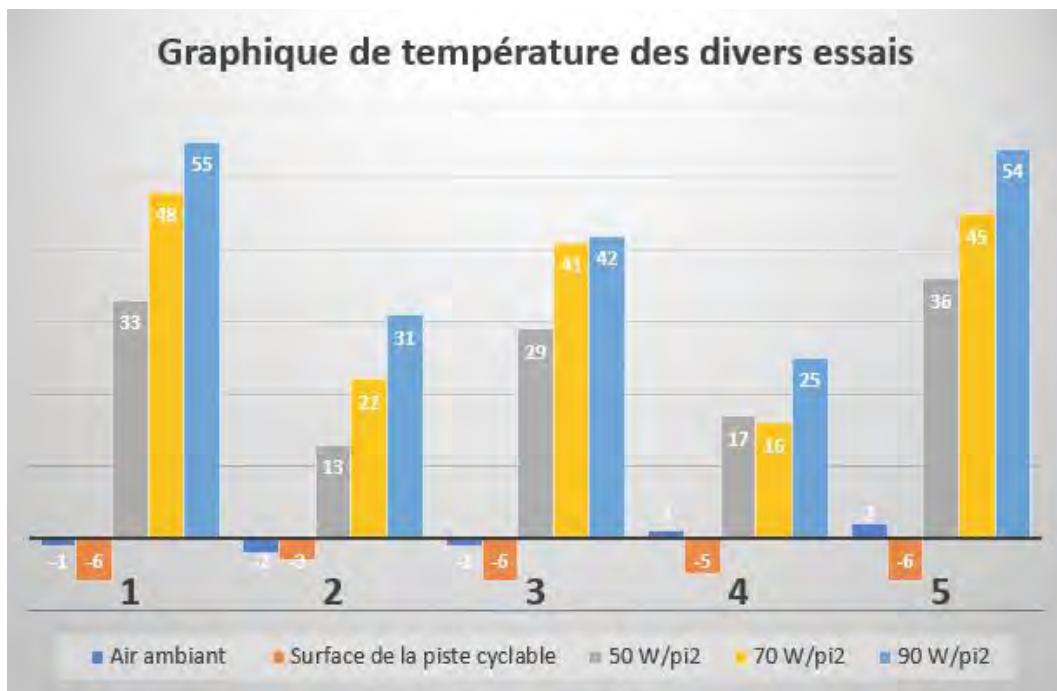


Figure 6.4-13 : Température de l'air ambiant, surface du tablier ainsi que des diverses sections

La température des tapis chauffants fluctue considérablement sur l'envergure de leur surface. Ceci est dû à leur conception où un ou plusieurs fils électriques chauffants circulent sous la plaque métallique qui à son tour conduit et répartit la chaleur sur la surface des tapis. Plus la puissance de chauffage augmente, plus la longueur du fil chauffant augmente. Ceci veut donc dire que pour les tapis de puissance $50 \text{ W}/\text{pi}^2$, le fil chauffant est plus court et couvre moins de surface que pour les tapis de puissance $90 \text{ W}/\text{pi}^2$. Ceci est bien visible à la Figure 6.4-14 ci-dessous. Cette configuration implique de ce fait que les tapis chauffants ne chauffent pas uniformément leur surface et que les zones où un fil chauffant ne s'y retrouve pas prennent plus de temps pour faire fondre la neige. Cet effet est d'autant plus amplifié lorsque la surface des tapis est recouverte de résidus. La Figure 6.4-15 ci-dessous démontre bien ces effets. Afin de mitiger cette problématique et accentuer l'efficacité des tapis chauffants, il est donc important d'entretenir la surface de ces derniers afin de prévenir la formation de croute de résidus trop importante.

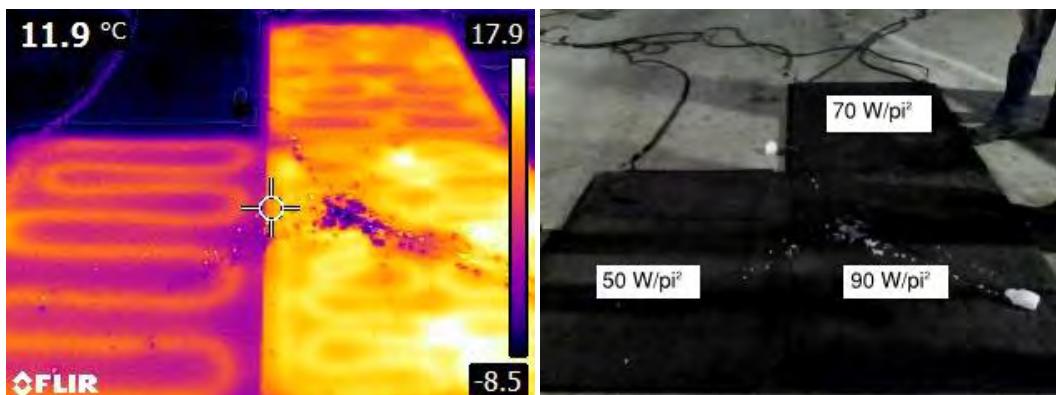


Figure 6.4-14 : Disposition et concentration des fils chauffants selon les différentes puissances de tapis chauffants

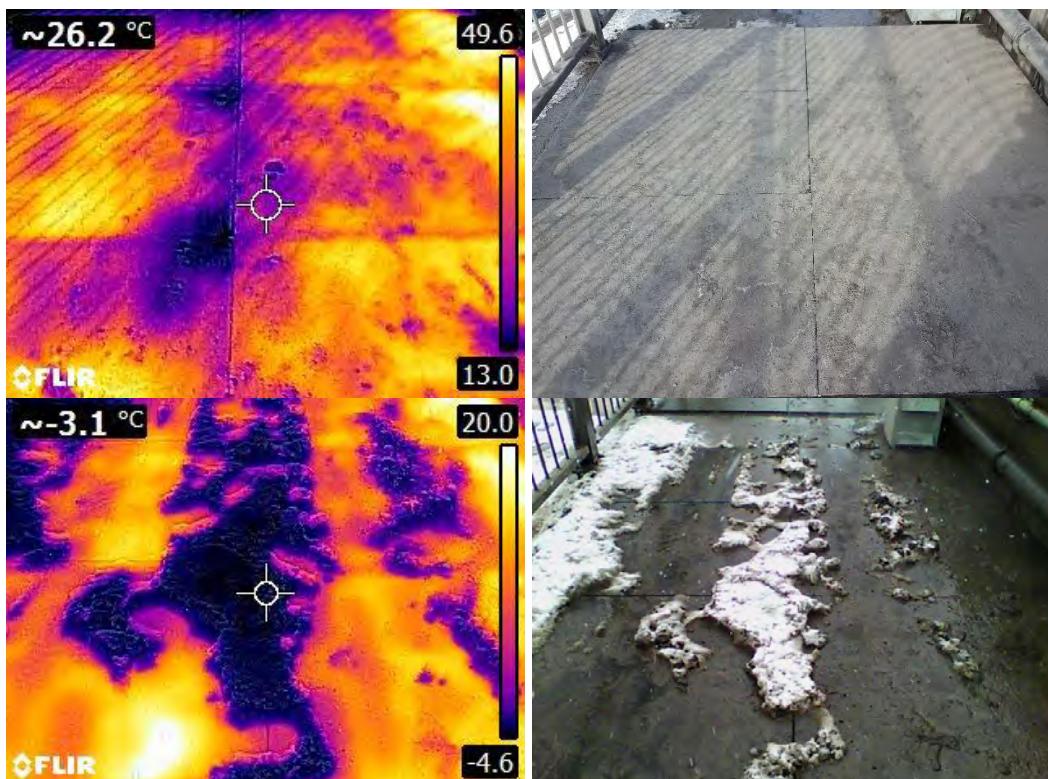


Figure 6.4-15 Les zones non couvertes par les fils chauffants et couvertes de résidus fondent la neige moins rapidement

Lors de tous les suivis où les tapis chauffants ont été activés proactivelement, c'est-à-dire avant des précipitations de neige, la surface des tapis était dégagée et sèche, ou bien humide lorsque des précipitations étaient toujours en cours. Voir la Figure 6.4-16. Dans tous ces cas, la qualité de surface était jugée sécuritaire pour la circulation de cyclistes.

Il semblerait donc que lors d'une activation proactive des tapis chauffants, une puissance de 50 W/pi² soit suffisante pour la circulation sécuritaire des cyclistes. Toutefois, il est à noter que ces observations ne considèrent que des essais effectués lorsque la température ambiante est au-delà de -2°C et sous des accumulations de neige légère et peu intense. Il est donc difficile de conclure une tendance par rapport à la performance du système lors

des températures hivernales plus basses ou d'épisode de précipitations plus intenses. Des essais plus approfondis permettraient de découvrir si ces performances se reproduiraient en conditions très froides, près de -25°C, ou lors de blizzard. Ces essais permettraient d'évaluer quelle puissance minimale serait suffisante afin d'obtenir des résultats de performance adéquats.

Lors du seul suivi où la section 70 W/ π^2 a été activée réactivement, c'est-à-dire suite à une accumulation légère de neige de 2,5 cm, une couche de neige non uniforme subsistait toujours, même deux heures après son activation. La section 50 W/ π^2 , qui elle a été activée proactivelement, affichait une meilleure condition de surface, tel que présenté à la Figure 6.4-17. Il semblerait donc que l'activation proactive des tapis chauffants soit préférable à une activation réactive afin de maintenir une condition de surface sécuritaire à tout moment.

Lors du suivi numéro 5, il a été observé que de l'eau de fonte s'accumulait contre les côtés de la membrane chauffante et ne ruisselait pas vers les drains dus à l'obstacle que représentent les tapis chauffants. Ceci laisse présager que les tapis chauffants ne permettent pas le ruissèlement de l'eau de fonte vers les drains et que si de l'eau percole entre les joints des divers tapis, l'eau pourrait geler suite à leurs désactivations et possiblement diminuer leurs adhérences à la dalle sous-jacente.

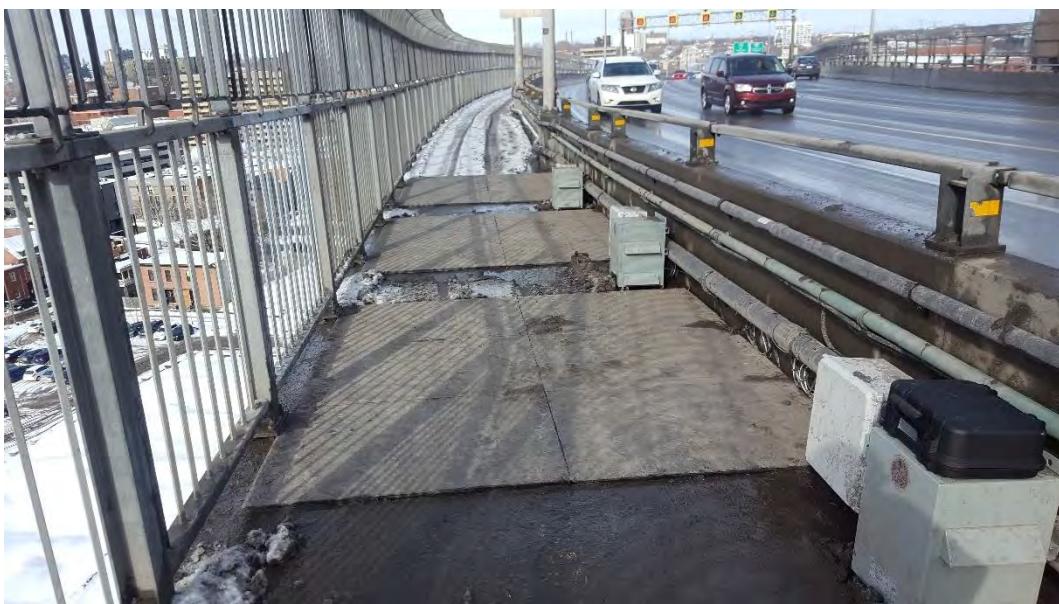


Figure 6.4-16 : Surface sèche des tapis lors du suivi numéro 5



Figure 6.4-17 : La section 70 W/m² affiche toujours de la neige suite à 2 heures d'activation



Figure 6.4-18 : Accumulations d'eau de fonte qui ne ruisselle pas vers les drains

6.4.4.2 Membrane chauffante

Dû au vandalisme encouru lors de la première installation de la membrane chauffante à la mi-février, les premiers essais de performance de la membrane chauffante n'ont pu être effectués que suite à sa deuxième installation le 19 mars 2018. De surcroit, suite au 19 mars, aucun épisode de précipitation de neige ne s'est déroulé ce qui n'a pas permis la récolte de données expérimentales.

Néanmoins, le 18 avril 2018, des prises de températures ont été effectuées sur la membrane chauffante en dépit de manque de précipitations. De plus, de la neige résiduelle du printemps a été déposée sur la membrane chauffante afin d'évaluer son efficacité. Il est à noter que la neige utilisée était très englacée et ne ressemblait en aucun point à la neige fraîche.

La Figure 6.4-19 ci-dessous présente l'augmentation de la température des deux sections de la membrane chauffante suite à leurs activations. La température ambiante extérieure ainsi que la température de surface de la dalle de béton étaient de 3°C. Suite à 40 minutes de prises de mesures, la température de la membrane a cessé d'augmenter et s'est stabilisée près de 18-19°C.

Ceci représente un différentiel de température de seulement 16°C par rapport à la température ambiante. Selon le fournisseur, une membrane de « 500W/m² présente un delta température de 65°C »²⁷. La membrane mise à l'essai a une puissance moyenne de 560 W/m². Il est donc questionable si le système installé est défectueux ou si les capacités du produit étaient surestimées. Avec un si faible différentiel de température, il est de plus questionable si la membrane installée sur le trottoir du pont Jacques-Cartier permettait d'atteindre des températures suffisantes pour la fonte de neige lors de conditions hivernales très froides, près de -25°C. Selon le fournisseur, la membrane chauffante a une température d'opération minimale de -45°C²⁸ ce qui semblerait favoriser l'hypothèse d'un mauvais fonctionnement du système installé. Des essais additionnels pourraient confirmer le niveau de performance du système en question.

Lors du seul essai de performance de la membrane chauffante, un monticule de 5 cm de hauteur de la neige englacée a été déposé sur la membrane chauffante suite à son activation afin d'en apprécier sa performance. En parallèle, un monticule de taille similaire a été déposé sur le trottoir adjacent non chauffé afin de déterminer si la température extérieure de 3°C était la cause de la fonte de la neige. Suite à 50 minutes d'activation, les monticules de neiges étaient toujours de taille similaire et la membrane ne semblait pas avoir augmenté la rapidité de fonte du monticule (voir Figure 6.4-20). Il est vrai que la neige était englacée et donc ne se comportait pas comme de la neige fraîche. Il en demeure néanmoins que le comportement de la membrane lors de cet essai ne s'est pas avéré concluant.

²⁷ Formulaire de déclaration d'intérêt Dossier N°30001, Document daté 2017-12-18

²⁸ Formulaire de déclaration d'intérêt Dossier N°30001, Document daté 2017-12-18

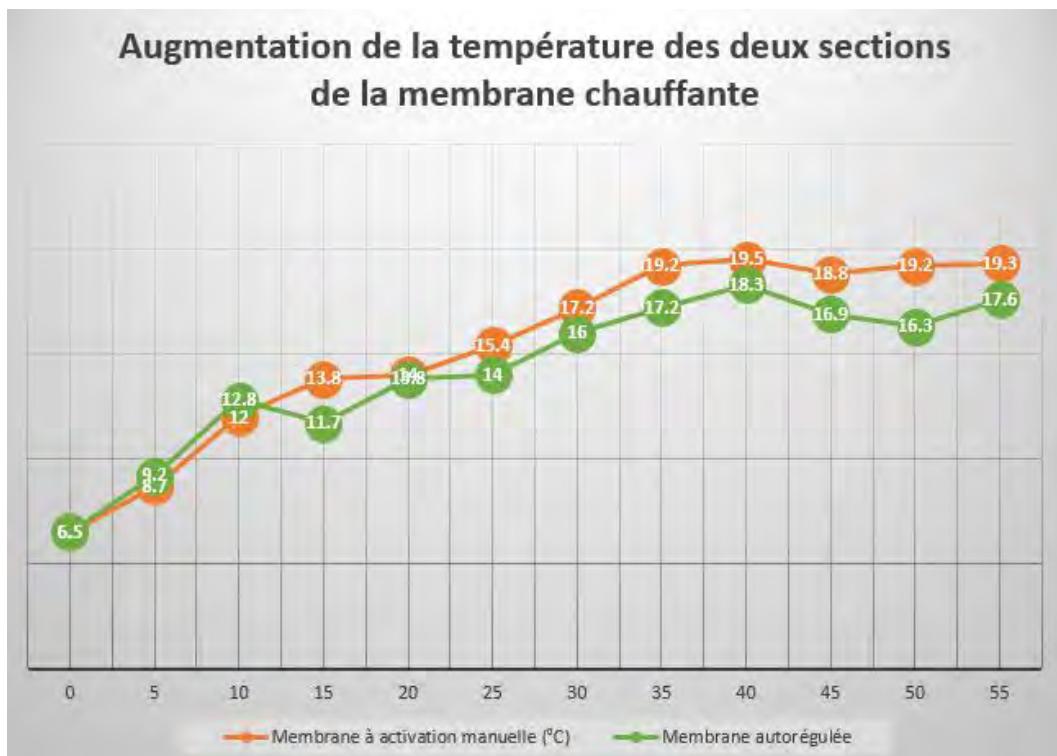


Figure 6.4-19 : Augmentation de la température des deux sections de la membrane chauffante suite à son activation



Figure 6.4-20 : Monticule de neige après 50 minutes d'activation (à gauche sur la membrane, à droite sur la dalle du trottoir)

6.5 Analyse de performance

Afin d'évaluer et de comparer la performance de deux systèmes mis à l'essai sur le pont Jacques-Cartier, plusieurs critères de performance ont été préalablement établis. Certains des critères de performance sont mesurables tandis que d'autres sont qualitatifs et proviennent donc d'un jugement éclairé.

Les critères de performance ont été regroupés dans six catégories distinctes afin de mieux apprécier la performance et distinguer les résultats des systèmes de chauffage mis à l'essai dans le cadre du projet pilote. Les catégories considérées consistent en :

- > Performance des opérations ;
- > Implantation propre au pont existant ;
- > Coûts ;
- > Durabilité et durée de vie ;
- > Besoin énergétique et d'alimentation ;
- > Interopérabilité.

Le Tableau 6.5-1 présente ces catégories ainsi que les divers critères de performance établis, leur importance relative et l'échelle de notation pour évaluer la performance de chacun des systèmes contre chaque critère. De plus, le Tableau 6.5-1 indique la performance mesurée et/ou appréciée des tapis chauffants et de la membrane chauffante et donc, la note attribuée à ses systèmes de chauffage. Une note totale pour chaque catégorie a été calculée selon la formule suivante :

La note finale attribuée à chaque système a été calculée d'une façon similaire selon la formule suivante :

Tableau 6.5-1 : Analyse de performances des systèmes de chauffage mis à l'essai

Critères de performance	Importance du critère 4 = indispensable 3 = très important 2 = important 1 = moyennement important	Échelle de notation (1 à 3)	Tapis Chauffants		Membrane Chauffante			
			Performance	Note (1 à 3)	Performance	Note (1 à 3)		
Performance des opérations <i>(Les résultats de performances des systèmes de chauffage proviennent des essais et suivis effectués dans le cadre du projet pilote)</i>								
Capacité à faire fondre de la neige accumulée (assumant une activation réactive du système)	4	Aucun problème, peu importe la quantité de neige = 3 Difficulté à faire fondre une couche de neige de plus de 20cm = 2 Difficulté à faire fondre une couche de neige de plus de 10cm = 1	Difficulté à faire fondre une couche de neige de plus de 20cm	2	Difficulté à faire fondre une couche de neige de plus de 10cm	1		
Température d'opération minimale (température de surface maximale)	4	Moins de -25 °C = 3 Entre -25 °C et -15 °C = 2 Plus de -15 °C = 1	-30°C	3	-5°C	1		
Mécanisme de contrôle	1	Automatique et/ou manuel = 3 Automatique seulement = 2 Manuel seulement = 1	Manuel seulement	1	Automatique et/ou manuel	3		
Qualité de la surface suite à une chute de neige (assumant une activation proactive du système)	4	La surface est dégagée et sèche = 3 La surface est dégagée, mais mouillée = 2 La surface est recouverte de neige / Essai non concluant = 1	La surface est dégagée et sèche	3	Essai non concluant	1		
Exigence d'opération (opération journalière et exigence d'opération annuelle)	2	Opération facile = 3 Opération relativement difficile = 2 Opération complexe = 1	Opération complexe	1	Opération facile	3		
Ce système a-t-il déjà été déployé et démontré comme efficace sur un projet similaire	1	Oui = 3 Oui, mais sur un projet de petite envergure = 2 Non = 1	Non	1	Oui, mais sur un projet de petite envergure	2		
					Note pour la catégorie:	75%		
					Note pour la catégorie:	48%		
Implantation propre au pont existant								
Le système de chauffage s'adapte-t-il facilement à la géométrie changeante de la piste existante.	4	Facilement adaptable = 3 Moyennement adaptable = 2 Difficilement adaptable = 1	Difficilement Adaptable	1	Facilement adaptable	3		
Épaisseur du système de chauffage	1	Moins de 50mm = 3 Plus de 50mm = 1	20-30mm	3	11mm	3		
Poids propre du système de chauffage	2	Moins de 75 kg/m ² = 3 Entre 75 et 150 kg/m ² = 2 Plus de 150 kg/m ² = 1	Plus de 100 kg/m ²	2	~ 25 kg/m ²	3		
Le système de chauffage s'intègre-t-il au système de drainage et permet-il un drainage efficace	2	Système adapté à la géométrie existante = 3 Des modifications légères sont nécessaires = 2 Des modifications importantes sont nécessaires = 1	Des modifications importantes sont nécessaires	1	Système adapté à la géométrie existante	3		

Critères de performance	Importance du critère 4 = indispensable 3 = très important 2 = important 1 = moyennement important	Échelle de notation (1 à 3)	Tapis Chauffants		Membrane Chauffante	
			Performance	Note (1 à 3)	Performance	Note (1 à 3)
Durée d'installation (supposant une équipe de travail effectue tous les travaux)	3	Moins de 90 jours = 3 Entre 90 et 180 jours = 2 Plus de 180 jours = 1	61 jours (2heures / 11m)	3	304 jours (9heures / 10m)	1
			Note pour la catégorie:	61%	Note pour la catégorie:	83%
Coûts :						
Le coût du système et de son installation ¹	4			1		2
Coûts d'entretien	2	Coûts négligeables = 3 Coûts moyens = 2 Coûts élevés = 1	Coûts Moyen	2	Coûts négligeables	3
Coûts reliés à la consommation énergétique pour l'opération du système de chauffage	4	Moins de 250,000 \$/an = 3 Entre 250,000 et 500,000 \$/an = 2 Plus de 500,000 \$/an=1	640,000 \$/an	1	662,000 \$/an	1
			Note pour la catégorie:	40%	Note pour la catégorie:	60%
Durabilité et durée de vie						
Durée de vie du système de chauffage	3	25 ans et plus = 3 Entre 10 et 25 ans = 2 Moins de 10 ans = 1	5 ans	1	30 ans	3
Garantie du fournisseur	1	10 ans et plus = 3 Entre 5 et 10 ans = 2 Moins de 5 ans = 1	2 ans	1	10 ans	3
Exigences d'entretien et d'inspection (fréquence et étendue)	1	Peu fréquente et de petite envergure = 3 Peu fréquente et de grande envergure/fréquente et de petite envergure = 2 Fréquente et de grande envergure = 1	Fréquente et de petite envergure	2	Peu fréquente et de petite envergure	3
Facilité de travaux de réparation ou de remplacement	3	Facile = 3 Moyen = 2 Difficile = 1	Facile	3	Difficile	1
Résistance au vandalisme	2	Résistant = 3 Potentiellement résistant = 2 Vulnérable = 1	Potentiellement résistant	2	Potentiellement résistant	2
			Note pour la catégorie:	63%	Note pour la catégorie:	73%
Besoin énergétique et d'alimentation :						

Critères de performance	Importance du critère 4 = indispensable 3 = très important 2 = important 1 = moyennement important	Échelle de notation (1 à 3)	Tapis Chauffants		Membrane Chauffante	
			Performance	Note (1 à 3)	Performance	Note (1 à 3)
Consommation énergétique du système de chauffage	4	Moins de 400 W/m ² = 3 Entre 400 et 600 W/m ² = 2 Plus de 600 W/m ² = 1	540 W/m ²	2	560 W/m ²	2
Logistique de connexion et de transformation du courant	4	Facile = 3 Moyen = 2 Difficile = 1	Difficile	1	Moyen	2
			Note pour la catégorie:	50%	Note pour la catégorie:	67%
Interopérabilité						
Le système de chauffage doit-il être combiné avec une autre méthode de déneigement afin de dégager la piste efficacement (supposant une activation proactive du système)	2	Non = 3 Non, sauf lors de tempête majeure / Non confirmé = 2 Oui = 1	Non	3	Non confirmé	2
En cas de bris, le système de chauffage peut-il être combiné aux méthodes conventionnelles de déneigement	2	Oui = 3 Non = 1	Non	1	Oui	3
Résistance aux abrasifs/produits de déglaçages	1	Détérioration négligeable = 3 Détérioration progressive = 2 Détérioration accélérée = 1	Détérioration négligeable	3	Détérioration négligeable	3
Résistance aux impacts (chute de glace, équipement de déneigement, outils, etc.)	1	Résistance élevée = 3 Résistance moyenne = 2 Très peu de résistance = 1	Très peu de résistance	1	Résistance élevée	3
			Note pour la catégorie:	67%	Note pour la catégorie:	89%
			Note finale	61%	Note finale	67%

6.5.1 Performance des opérations

Cette catégorie représente les enjeux et critères relatifs à la performance du système de chauffage qui doit déneiger et dégeler la surface de la piste multifonctionnelle afin d'en rendre son utilisation sécuritaire tout au long de l'hiver.

Il est à noter que seulement cinq essais ont été effectués pour les tapis chauffants et qu'un seul essai a été effectué pour la membrane chauffante. De plus, aucun essai n'a été effectué dans des conditions hivernales jugées difficiles (ex. température extrême froide, pluie verglaçante, blizzard). Le manque de données n'offre donc qu'une base très faible afin de juger adéquatement la performance de ces systèmes.

Le système de tapis chauffants a obtenu une note de 75% dans cette catégorie principalement pour les raisons suivantes :

- > Avec un différentiel de température moyenne de 40°C pour la section 50 W/pi², il est jugé que cette puissance de tapis chauffants offrirait une surface sécuritaire jusqu'à des températures de -30°C ce qui est considéré adéquat pour le climat hivernal montréalais ;
- > Lors d'une activation proactive du système, les tapis chauffants assurent une surface dégagée et sèche, et donc sécuritaire pour la circulation de cycliste ;
- > Toutefois, lorsque les tapis chauffants sont activés d'une façon réactive, ceux-ci peinent à faire fondre la neige rapidement ;
- > Le système de tapis chauffants ne peut être gardé en place durant l'été. En effet, le grand nombre de joints entre les tapis constitue un désagrément à l'expérience des cyclistes et un point faible au niveau durabilité. Il est donc envisagé que les tapis devront être retirés après chaque hiver, entreposés et réinstaller avant chaque hiver. Ceci constitue un grand effort d'opération et de coordination annuel.
- > Par leur conception, les tapis chauffants présentent des joints à chaque 1,2 m. Ceci crée des irrégularités qui gênent le confort des usagers sur une longueur totale de 2,7 km ;

Le système de membrane chauffante a obtenu une note de 48% dans cette catégorie principalement pour les raisons suivantes :

- > Le seul essai effectué sur la membrane chauffante a démontré un différentiel de température 16°C. Avec ce différentiel de température, il est jugé que la membrane chauffante permettrait de faire fondre de la neige seulement à des températures supérieures à -5°C ce qui est jugé inadéquat pour le climat hivernal montréalais ;
- > Ce seul essai n'a pas permis d'obtenir des résultats concluants quant à l'efficacité du système de membrane chauffante. Des essais additionnels sont donc nécessaires afin d'évaluer adéquatement la performance du système. Une confirmation et une rectification du mauvais fonctionnement de la membrane chauffante permettraient sans doute d'améliorer sa note dans cette catégorie.

6.5.2 Implantation propre au pont existant

Cette catégorie représente les enjeux et critères que doivent respecter et considérer tout système de chauffage qui devra être implanté sur le pont Jacques-Cartier dans sa configuration ainsi que d'autres contraintes telles que le système de drainage et la capacité structurale de la structure existante.

Le système de tapis chauffants a obtenu une note de 61% dans cette catégorie principalement pour les raisons suivantes :

- > Une multitude de géométries différentes de tapis chauffants devra être conçue afin d'accommoder la géométrie changeante de la piste multifonctionnelle (déviation au niveau de la section 3 et 7, nombreux lampadaires et structures de supersignalisation qui empiètent sur la largeur de la piste multifonctionnelle, largeur variable) ;
- > La configuration mise à l'essai sur la piste multifonctionnelle ne permet pas le ruissellement de l'eau de fonte entre les tapis vers les drains du pont ce qui pourrait générer de la glace aux joints qui séparent les tapis ;
- > De plus, les tapis chauffants représentent une augmentation du poids propre équivaut à environ 12% du poids de la dalle au niveau de la section 7 du pont Jacques-Cartier ;
- > Le système de tapis chauffants s'installe facilement et rapidement sur le pont et n'est pas assujetti à des contraintes de conditions météorologiques pour en effectuer l'installation.
- > Les tapis chauffants n'ont pour l'instant jamais été testés sur des projets d'envergure (uniquement résidentiels et commerciaux à petite échelle) ; ainsi de nombreux enjeux restent toujours sans réponse quant à leur application sur un tablier de pont.

Le système de membrane chauffante a obtenu une note de 83% dans cette catégorie principalement pour les raisons suivantes :

- > La membrane chauffante est bien adaptée aux conditions existantes du pont Jacques-Cartier et ne requiert que très peu de modifications pour s'agencer aux conditions de la piste multifonctionnelle existante ;
- > La membrane chauffante permet un ruissellement de l'eau de fonte vers les drains existants sur la piste multifonctionnelle du pont ;
- > La membrane chauffante représente une augmentation du poids propre équivaut à environ 5% du poids de la dalle au niveau de la section 7 du pont Jacques-Cartier;
- > Toutefois, l'installation du système de membrane chauffante peut s'avérer être longue et laborieuse. Nous estimons une durée d'installation de 304 jours pour une seule équipe de travail de 3 à 4 travailleurs et supposant un avancement d'environ 10 mètres par quart du travail. De plus, l'installation de la membrane chauffante ne peut être effectuée lors des précipitations puisque la surface de la piste doit être sèche afin d'assurer une bonne adhérence. Une durée d'installation très élevée

nuirait grandement au service offert pour les piétons et cyclistes sur le pont. De plus, l'installation du système de chauffage nécessitera la fermeture d'une voie de circulation ce qui nuira aux automobilistes.

- > Un seul projet similaire, South Reserve Bridge, existe où la technologie de la membrane chauffante a été installée sur un pont. Ce projet a été complété au mois d'avril 2017 et semble produire des résultats concluants.

6.5.3 Coûts

Cette catégorie représente les enjeux et critères reliés aux coûts initiaux d'installation, les coûts d'entretien et les coûts de consommation énergétique nécessaires pour l'opération du système de chauffage.

Le système de tapis chauffants a obtenu une note de 40% dans cette catégorie principalement pour les raisons suivantes :

- > Selon les données fournies par PJCCI²⁹, les coûts de fourniture et d'installation des tapis chauffants se sont élevés à [REDACTED]. Ceci revient donc à un prix moyen relativement élevé de [REDACTED] m². Il est à noter que ceci n'inclut pas les coûts relatifs à l'approvisionnement et à l'installation des transformateurs et du câblage nécessaires pour la connexion électrique des tapis chauffants au panneau d'alimentation ;
- > Aucune donnée n'est disponible afin d'évaluer les coûts d'entretien des tapis chauffants. Néanmoins, basé sur la faible durée de vie des tapis chauffants et le besoin de retirer les tapis chauffants après chaque hiver, il est convenu que les frais d'entretien seraient beaucoup plus considérables que pour la membrane chauffante.

Le système de membrane chauffante a obtenu une note de 60% dans cette catégorie principalement pour les raisons suivantes :

- > Selon les données fournies³⁰, les coûts de fourniture et d'installation de la membrane chauffante est d'environ [REDACTED]/m². Comme pour les tapis chauffants, ceci n'inclut pas les coûts relatifs à l'approvisionnement et à l'installation des transformateurs, du câblage nécessaire pour la connexion électrique des tapis chauffants au panneau d'alimentation. Il est à noter que le prix associé à ces éléments serait inférieur pour la membrane chauffante, par rapport aux tapis chauffants, puisque cette dernière ne requiert pas une transformation laborieuse de la tension électrique et de nombreux points de connexions ;
- > Similairement au tapis chauffant, aucune information n'est disponible afin d'évaluer les coûts d'entretien de la membrane chauffante. Par sa conception intégrée à une membrane d'étanchéité et d'usure, il est peu probable que les coûts d'entretien de ce système de chauffage soient élevés.

²⁹ Courriel « Re : Membrane M. – Prix » daté 2018-04-03 / M&J lors de la révision du rapport

³⁰ Courriel « Mise à jour des prix projet C. » daté 2018-04-06

6.5.4 Durabilité et durée de vie

Cette catégorie représente les enjeux et critères que doivent respecter et considérer tous systèmes de chauffage qui devra demeurer fonctionnel et efficace à moyen/long terme vu l'importance des dépenses de capital que constitue cet investissement.

Le système de tapis chauffants a obtenu une note de 63% dans cette catégorie principalement pour les raisons suivantes :

- > Selon le fournisseur, les tapis chauffants n'ont qu'une durée de vie estimée à 5 ans et que le fournisseur ne garantit son produit que sur une période de 2 ans³¹. Ceci représente une très courte garantie par rapport à l'investissement potentiel que représentent leur mise n'œuvre à grande échelle sur le pont Jacques-Cartier ;
- > De plus, il est envisagé que les tapis chauffants devront être retirés de la piste multifonctionnelle après chaque hiver afin de réduire leur usure prématuée et améliorer l'expérience des cyclistes qui empruntent le pont ;
- > En surcroit, le grand nombre d'embranchements que nécessitent les tapis chauffants accentue leurs vulnérabilités au vandalisme. Ceci pourrait toutefois être résolu lors d'une conception détaillée afin de réduire ce risque (par ex. bonne protection des câbles) ;
- > Toute défaillance des tapis chauffants est facilement réparable, car ces derniers sont modulaires. Tout panneau défectueux pourrait être simplement retiré et remplacé par un tapis chauffant de remplacement entreposé.

Le système de membrane chauffante a obtenu une note de 73% dans cette catégorie principalement pour les raisons suivantes :

- > La membrane chauffante représente un système durable avec une durée de vie estimé à 30 ans par le fournisseur et une garantie de 10 ans³² ;
- > La membrane chauffante est vulnérable au vandalisme, tel que fut constaté lors de la première installation de la membrane chauffante. Il est vrai que les fils électriques n'ont pas été protégés adéquatement, mais il en demeure que, suite à cet événement, le fournisseur ne pouvait réparer la membrane chauffante vandalisée et qu'une deuxième membrane chauffante a dû être installée. Ceci pourrait toutefois être résolu lors d'une conception détaillée afin de réduire ce risque ;
- > La membrane chauffante représente une installation permanente qui ne peut être retirée que très difficilement et qui se branche en série. Tout bris représente donc une perte du système sur la longueur de la sous-section correspondante et nécessiterait son remplacement. Il serait pertinent également d'évaluer la possibilité de branchement en parallèle par section de membrane ou une combinaison de deux types de branchements afin de réduire le risque de perte des

³¹ Formulaires de déclarations d'intérêt, Dossier N° 30001, 30 octobre 2017

³² Formulaires de déclarations d'intérêt, Dossier N° 30001, 18 décembre 2017

segments en cas de bris d'un panneau en optimisant le câblage et les connexions nécessaires.

6.5.5 Besoin énergétique / Alimentation

Cette catégorie représente les enjeux et critères reliés à l'alimentation électrique des systèmes de chauffage.

Le système de tapis chauffants a obtenu une note de 50% dans cette catégorie principalement pour les raisons suivantes :

- > La consommation énergétique du système, 540 W/m², demeure considérable et non négligeable ;
- > Les tapis chauffants ne fonctionnent qu'à très basse tension. La transformation du courant de 600V à 30V requiert donc l'installation de plusieurs transformateurs afin de minimiser la taille du câblage ainsi que des transformateurs ;
- > De plus, chaque tapis chauffant se branche en parallèle aux boîtiers de disjoncteurs ce qui nécessite un grand nombre de connexions. Ceci à l'effet cascade qu'un plus grand nombre de fusibles et boîtiers doivent être fournis et que les boîtiers doivent être de plus grandes dimensions.

Le système de membrane chauffante a obtenu une note de 67% dans cette catégorie principalement pour les raisons suivantes :

- > La consommation énergétique du système, 560 W/m², demeure considérable et non négligeable ;
- > La membrane chauffante ne présente aucune problématique supplémentaire quant à la logistique d'alimentation que tout système de chauffage devra surmonter.

6.5.6 Interopérabilité

Cette catégorie représente les enjeux et critères que doit respecter et considérer tout système de chauffage qui devra être combiné aux méthodes conventionnelles de déneigement (voir Section 3 du présent rapport).

Le système de tapis chauffants a obtenu une note de 67% dans cette catégorie principalement pour les raisons suivantes :

- > Sous une activation proactive du système, le système de tapis chauffant déneige efficacement la piste multifonctionnelle et offre une qualité de surface jugée sécuritaire. Il n'est donc pas nécessaire de combiner les tapis chauffants à un déneigement conventionnel lorsque le système est entièrement fonctionnel.
- > Par leur conception, les tapis chauffants présentent des joints à chaque 1,2 m ce qui présente un risque pour tout équipement de déneigement qui pourrait voir sa pelle s'y coincer et endommager le système de chauffage. Il serait donc difficile de combiner le système de tapis chauffant à un déneigement mécanique si ce dernier venait à se briser, ou mal fonctionner.

Le système de membrane chauffante a obtenu une note de 89% dans cette catégorie principalement pour les raisons suivantes :

- > Les résultats non concluants du projet pilote ne permettent pas de statuer sur l'efficacité du système et de conclure si ce dernier peut être efficace si utilisé seul ;
- > La membrane chauffante s'agence convenablement à une utilisation combinée d'un système de chauffage et des méthodes conventionnelles.

6.5.7 Total

Bien que le système de tapis chauffants semble fonctionner adéquatement sur le pont Jacques-Cartier, une note totale de 61% lui a été attribuée. Ce système obtient cette note principalement due à :

- > La difficulté d'implantation au pont existant dû à la nécessité d'ajustement à la géométrie et à son incapacité à drainer efficacement l'eau de fonte ;
- > La difficulté à combiner ce système de chauffage aux méthodes conventionnelles de déneigement ;
- > La logistique complexe d'alimentation et le grand nombre de connexions ;
- > Sa faible durabilité et durée de vie ;
- > Son coût élevé en fourniture et entretien.

Quant à la membrane chauffante, celle-ci obtient une note totale de 67%. Cette note lui a été attribuée principalement dû à :

- > Des résultats de performance non concluants lors du projet pilote ;
- > La difficulté de réparer le système de chauffage en cas de bris ;
- > L'installation laborieuse et longue de la membrane chauffante.

Il est considéré que la membrane chauffante mise à l'essai lors du projet pilote sur le pont Jacques-Cartier présente fort probablement une mauvaise installation ce qui influence grandement la note obtenue. S'il est démontré que la membrane chauffante présente des défauts d'installation et que le système est bel et bien performant pour faire fondre la neige, sa note totale pourrait augmenter jusqu'à 77% environ. De plus, s'il est décidé d'installer une membrane d'usure et d'étanchéité sur la dalle de la piste multifonctionnelle du pont afin d'en accentuer sa durabilité, dans ce contexte, le point négatif de l'installation laborieuse et longue de la membrane chauffante devient insignifiant.

6.6 Analyse des effets thermiques sur la dalle

Cette section résume les travaux effectués afin d'évaluer les effets potentiels de gradients thermiques entre les surfaces supérieure et inférieure de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier dû à l'implantation potentielle d'un système de chauffage sur la dalle existante.

L'évaluation s'est concentrée sur la travée au-dessus de la voie maritime ainsi que la travée principale du pont qui correspondent aux sections 3 et 7 respectivement. Il est compris que ce sont les sections les plus probables pour l'application d'un système de chauffage en raison de la difficulté d'y effectuer le déneigement par méthode conventionnelle.



Figure 6.6-1 : Aperçu du pont et des sections considérées



Figure 6.6-2 : Section 3 - Travée au-dessus de la voie maritime



Figure 6.6-3 : Section 7 - Travée principale du pont Jacques-Cartier

6.6.1 Analyse du climat

Afin de comprendre les températures minimales attendues sur et autour du pont Jacques-Cartier, une analyse statistique a été effectuée sur les données des stations météorologiques les plus proches du pont. Cette analyse statistique indique que des températures ambiantes de l'ordre de -25°C peuvent être attendues sur une base annuelle. Les températures perçues, y compris l'effet du vent, pourraient être plus basses. Des analyses complètes sont présentées à la Section 7.6 du présent rapport.

6.6.2 Calculs initiaux

Les deux travées à l'étude sont constituées de sections préfabriquées en béton armé qui sont supportées par des appuis qui saillent de la structure principale. Les sections préfabriquées sont reliées ensemble par des câbles de précontrainte et des joints en mortier. Des joints de dilatation sont fournis à des intervalles fréquents. La Figure 6.6-4 montre une section de pont typique, et la Figure 6.6-5 montre des détails des appuis typiques.



Figure 6.6-4 : Section typique de la piste multifonctionnelle à la section 3 et 7



Figure 6.6-5 : Détails typiques des appuis

Des calculs simplifiés initiaux ont été effectués pour évaluer le risque de fissuration dû à un différentiel de température entre les surfaces supérieures et inférieures de la dalle de la piste multifonctionnelle.

Les contraintes thermiques sur une section non chargée de la piste multifonctionnelle peuvent être évaluées en considérant le profil de déformation thermique à travers la section, et les conditions d'appui agissant sur la section (voir Section 6.6.8) pour plus de détails sur les conditions d'appui). La Figure 6.6-6 illustre ceci pour une section de la piste multifonctionnelle de la travée principale avec un différentiel de température de 25°C entre les surfaces supérieure et inférieure.

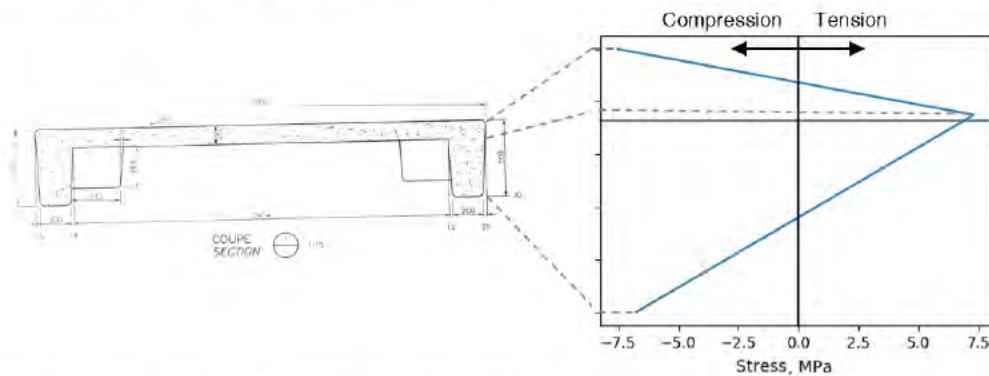


Figure 6.6-6 Contraintes thermiques sur une section non chargée de la travée principale de la piste multifonctionnelle (sans précontrainte)

Une fois l'effet de la précontrainte pris en compte, qui réduit les contraintes en traction, les calculs indiquent que des contraintes en traction sur le tablier de la travée principale du pont peuvent être subies avec une différence de température de plus de 25°C, entraînant un risque de fissuration du béton. Il est à noter que ce calcul considère de la compression

uniforme sur toute la section due à la précontrainte et ne prend pas en considération les effets en 3D présentés dans la section suivante.

Il est fort probable que les systèmes de chauffage peuvent atteindre un différentiel de température allant au-delà de cette valeur par rapport aux conditions ambiantes, surtout sans une isolation appropriée. Il a donc été conclu qu'il était approprié d'effectuer une analyse détaillée par éléments finis pour déterminer l'étendue et l'ampleur de la fissuration due aux charges thermiques.

6.6.3 Modélisation 3D par éléments finis

Une évaluation à l'état limite de service a été effectuée pour la travée principale et pour la travée de la voie maritime à l'aide de modèles 3D non linéaires par éléments finis. L'évaluation de l'état de service s'est concentrée sur les flèches et les largeurs de fissures en utilisant des charges non pondérées et des propriétés de matériaux non pondérées sous un éventail de charges thermiques au travers de l'épaisseur de la dalle de béton.

6.6.4 Logiciel

LS-DYNA³³ est un logiciel à éléments finis à usages multiples utilisé pour l'analyse et la modélisation paramétrique qui répond à des problèmes de sol ou de structure, linéaires ou non linéaires, statiques ou dynamiques. Ce logiciel a été développé par Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Arup a par la suite développé l'application Oasys Suite utilisée avec LS-DYNA. L'analyse structurale non linéaire des dalles de tablier a été réalisée dans LS-DYNA Version 9.2. La version 14.0 d'Oasys Suite a été utilisée pour le prétraitement et le post-traitement des modèles d'analyse.

6.6.5 Méthode de modélisation

Les modèles sont constitués d'éléments de coque composite non linéaire pour la dalle et les nervures longitudinales (voir la Figure 6.6-7et Figure 6.6-8). Les éléments de coque ont quatre points d'intégration par couche, avec jusqu'à dix points d'intégration (en fonction de l'emplacement) dans l'épaisseur de chaque élément. Un modèle non linéaire de béton a été utilisé (voir Section 6.6.7).

33 LS-DYNA Keyword User's Manual, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), version 971 August 2014

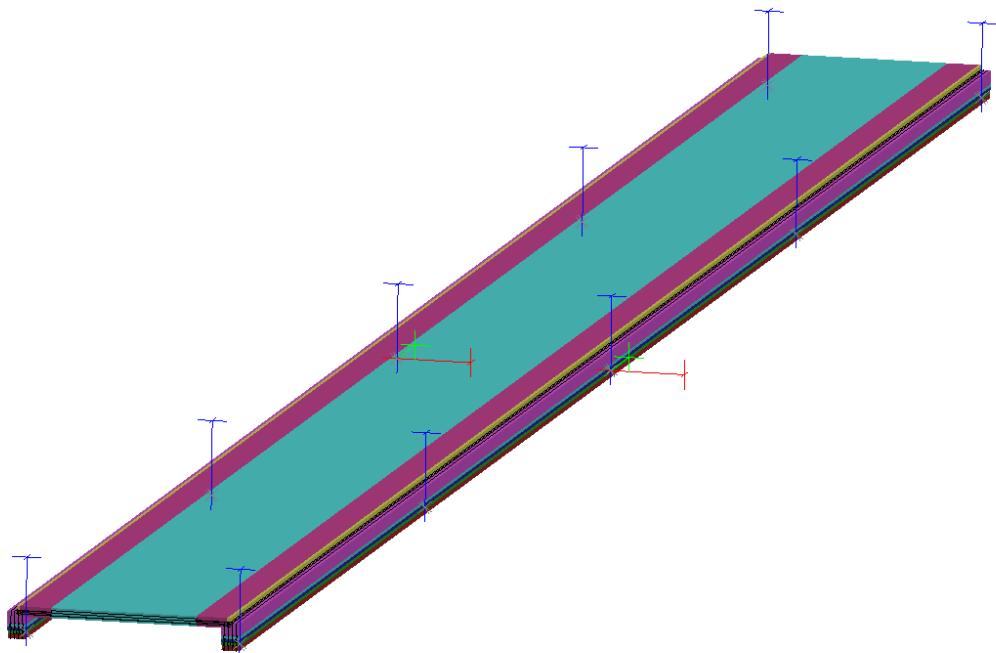


Figure 6.6-7 : Modèle d'analyse à éléments finis de la section 3 au-dessus la voie navigable avec les conditions de support

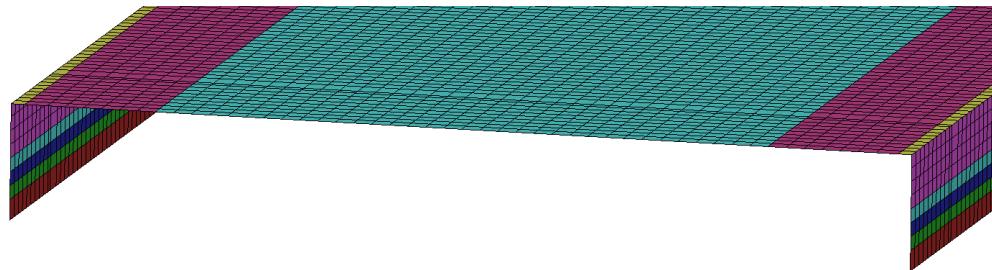


Figure 6.6-8 : Vue rapprochée du modèle à éléments finis du tablier de la piste multifonctionnelle de la voie maritime montrant les éléments coques

6.6.6 Charge appliquée

6.6.6.1 Poids propre

Le poids propre de la piste multifonctionnelle a été appliqué en fonction de la densité des matériaux. La densité utilisée pour le béton armé est de $2\ 400 \text{ kg/m}^3$.

6.6.6.2 Charges vives

Les charges vives qui gouvernent sur la piste multifonctionnelle proviennent du poids chargé d'un véhicule d'entretien. Le véhicule considéré lors du projet pilote a un poids déchargé de 2550 kg et un poids additionnel de 1700 kg, ce qui donne un poids total chargé

de 4250 kg. Cette charge a été appliquée sous forme de pression sur quatre zones représentant les pneus du véhicule. Cette charge a été appliquée à la mi-portée de la deuxième travée continue du modèle, qui a été déterminé être la zone critique pour la fissuration.

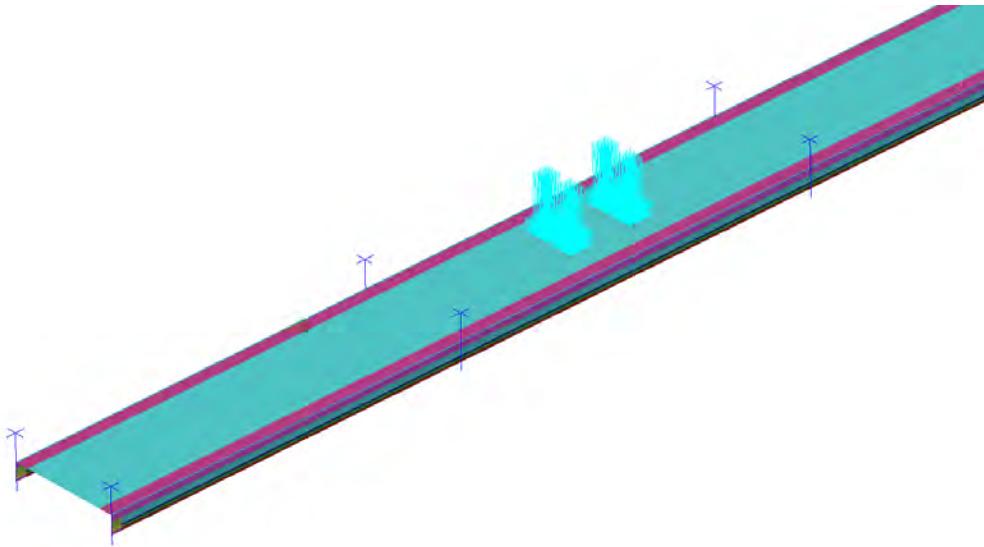


Figure 6.6-9 : Charges vives du véhicule d'entretien appliquée dans le modèle

6.6.6.3 Précontrainte

La précontrainte finale a été appliquée à chaque terminaison des torons. Les charges ont été appliquées dans la direction axiale à chaque extrémité du modèle, comme le montre la Figure 6.6-10.

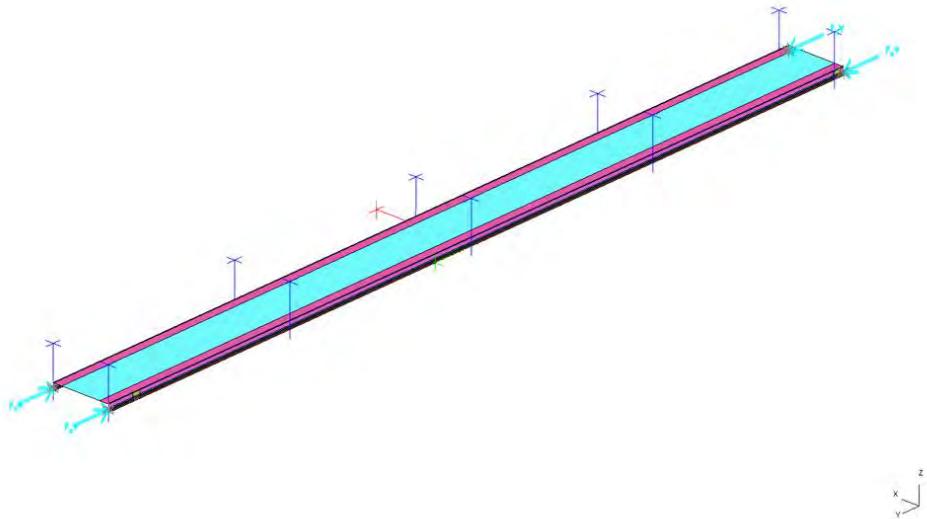


Figure 6.6-10 : Charges de précontrainte axiale

6.6.6.4 Post-tension

Les conduits de post-tension sont courbés à travers les travées, ce qui génère des forces verticales qui s'opposent au poids propre comme l'illustre la Figure 6.6-11. Les forces axiales et verticales de la post-tension ont été modélisées, comme le montrent la Figure 6.6-12 et Figure 6.6-13. Le frottement de la post-tension a été négligé, et les considérations des pertes dues à la relaxation des câbles, le retrait et le flUAGE du béton n'ont pas été tenues en compte dans la modélisation.

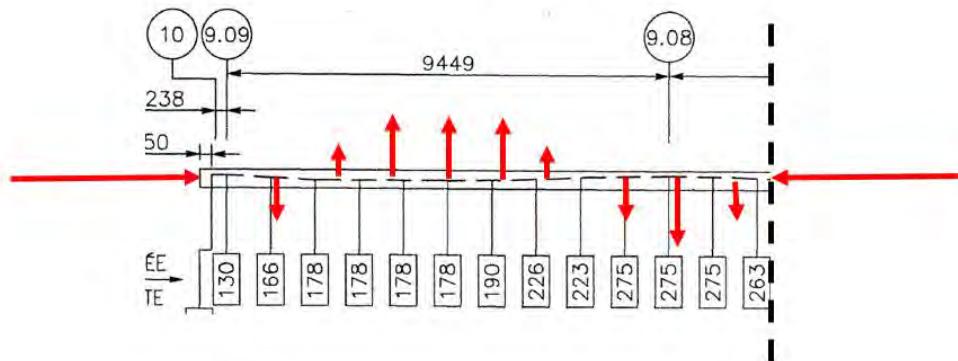


Figure 6.6-11 : Les charges de post-tension génèrent des charges verticales

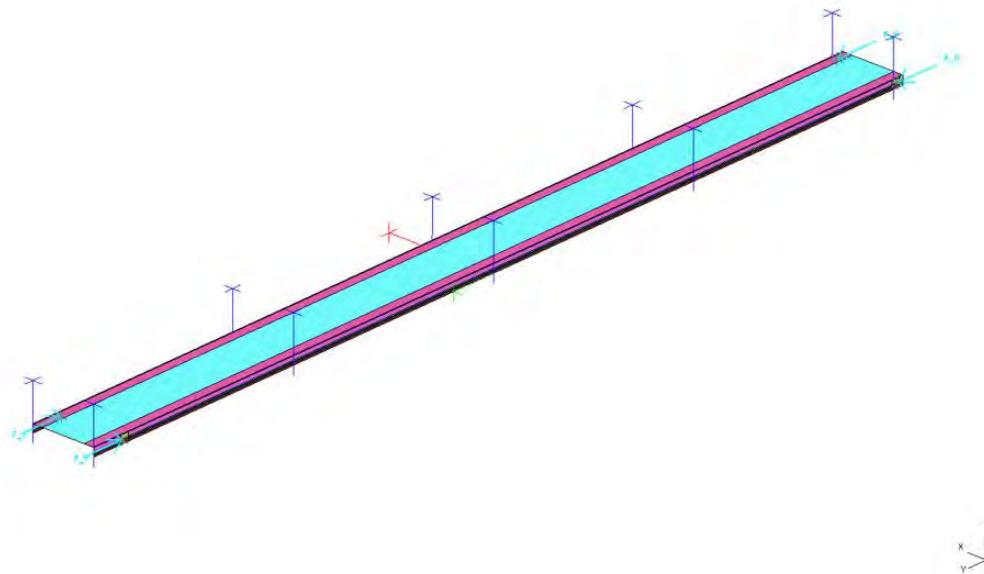


Figure 6.6-12 : Charge axiale de post-tension modélisée aux extrémités

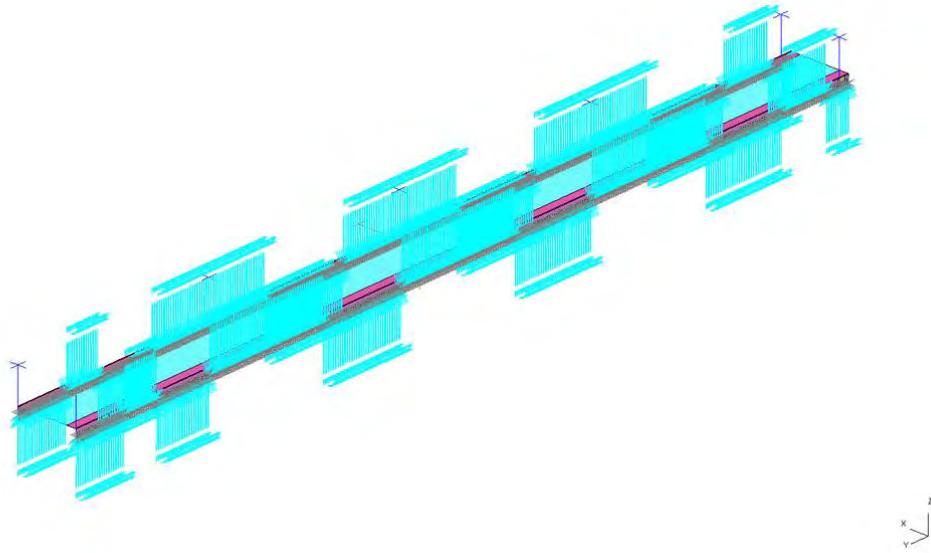


Figure 6.6-13 - Charges verticales dues à la post-tension et aux gaines courbes

6.6.6.5 Charge thermique

La charge thermique a été appliquée à la surface supérieure et inférieure des éléments. LS-DYNA interpole linéairement entre ces points afin de calculer la température de chaque couche de point d'intégration. Un gradient thermique linéaire est approprié pour les conditions d'équilibre, et est considéré comme une hypothèse raisonnable pour les conditions d'opérations d'un système de chauffage. Les nervures longitudinales sont supposées être à une température ambiante constante T_c , comme le montre la Figure 6.6-14.

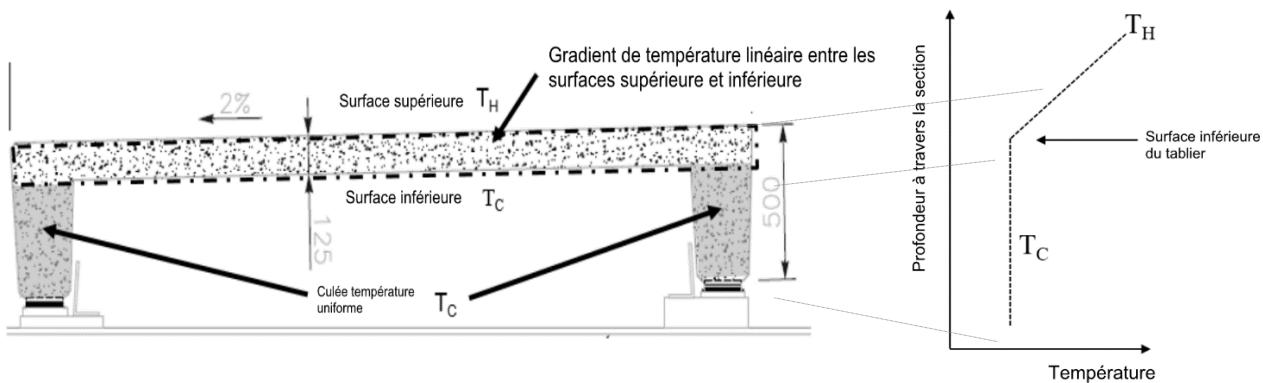


Figure 6.6.14 : Profil de température présumé dans la section de la piste multifonctionnelle

6.6.6.6 Combinaison des charges

Le Code canadien sur le calcul des ponts routiers³⁴ suggère la combinaison de charges suivante pour les états limites d'utilisation (combinaison ÉLUT 1, Tableau 3.1) :

$$1,0 \text{ D} + 1,0 \text{ P} + 0,9 \text{ L} + 0,8 \text{ K}$$

Le chargement dans cette situation est, à certains égards, unique dans le sens qu'il y a une probabilité raisonnable que la charge vive et la charge thermique réelle survient au même moment. La combinaison suivante a donc été appliquée :

$$1,0 \text{ D} + 1,0 \text{ P} + 1,0 \text{ L} + 1,0 \text{ K}$$

où :

D = poids propre

P = effets secondaires dus à la précontrainte.

L = charges vives, comprenant, lorsqu'applicable, la majoration dynamique

K = effets des contraintes, des déformations et des déplacements, y compris les effets de leur retenue, et les effets du frottement ou de la rigidité des appareils d'appui. Les contraintes et les déformations comprennent les contraintes et les déformations dues aux changements de température, aux gradients thermiques, au retrait du béton, au retrait différentiel et au fluage, les déformations élastiques étant cependant exclues.

Les charges sont appliquées au modèle dans l'ordre suivant :

- > Poids propre, précontrainte, charges réelles appliquées ;
- > La charge thermique augmente graduellement jusqu'à une différence de température maximale de 100 °C.

³⁴ Code des Ponts : CAN/CSA S6-14 - Code canadien sur le calcul des ponts routiers

6.6.7 Propriété des matériaux

Le comportement non linéaire du béton a été simulé en utilisant le modèle de matériaux EC2 (Eurocode 2)³⁵ dans LS-DYNA. Le modèle de matériaux peut représenter une combinaison de béton et d'armature. Le modèle comprend la fissuration du béton sous tension et l'écrasement en compression, ainsi que la limite d'élasticité de l'acier d'armature, le durcissement et la rupture. Les propriétés sont sensibles à la chaleur.

Les données de matériaux et les équations qui régissent leur comportement (y compris les propriétés thermiques) sont tirées de l'Eurocode 2, partie 1.2 (General rules – Structural fire design)³⁶.

Les propriétés de matériaux suivantes ont été assumées pour les panneaux préfabriqués en béton de 60 MPa. Il est à noter que deux valeurs de résistance à la traction du béton ont été considérées dans l'analyse, 3,1 MPa basé sur le Code canadien sur le calcul des ponts routiers³⁷ et 4,4 MPa basés sur l'Eurocode afin de tester la susceptibilité de la fissuration à un tel paramètre :

- > Résistance à la compression, $f_c = 60 \text{ MPa}$;
- > Résistance à la traction du béton, $f_t = 3,1 \text{ MPa}$ (CAN/CSA S6-14) / $4,4 \text{ MPa}$ (EC2 Tableau 3.1) ;
- > Le coefficient de Poisson, $\mu = 0,2$;
- > Coefficient de dilatation thermique, $\alpha_c = 1 \times 10^{-5} \text{ } 1/\text{ } ^\circ\text{C}$.

Les propriétés de matériaux suivantes ont été assumées pour l'acier d'armature 400W :

- > Module d'élasticité de l'acier, $E_s = 200 \text{ GPa}$;
- > Résistance au rendement, $F_y = 400 \text{ MPa}$;
- > Le coefficient de Poisson, $\mu = 0,3$;
- > Coefficient de dilatation thermique, $\alpha_s = 1 \times 10^{-5} \text{ } 1/\text{ } ^\circ\text{C}$.

L'état de détérioration de la structure n'a pas été pris en compte. Des photos et une visite du site ont indiqué que le béton de la travée principale et de la voie maritime était en bon état, et que peu de fissuration était visible.

³⁵ Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, BS EN 1992-1-2:1995, juillet 2008

³⁶ Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, BS EN 1992-1-1:2004, février 2014

³⁷ Le Code canadien sur le calcul des ponts routiers (Canadian Highway Bridge Design Code) S6-14 Juillet 2017

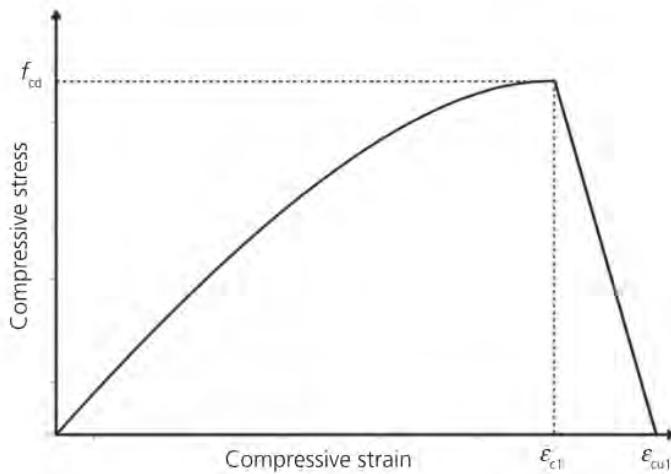


Figure 6.6-15 : Comportement de compression du béton dans MAT_CONCRETE_EC2

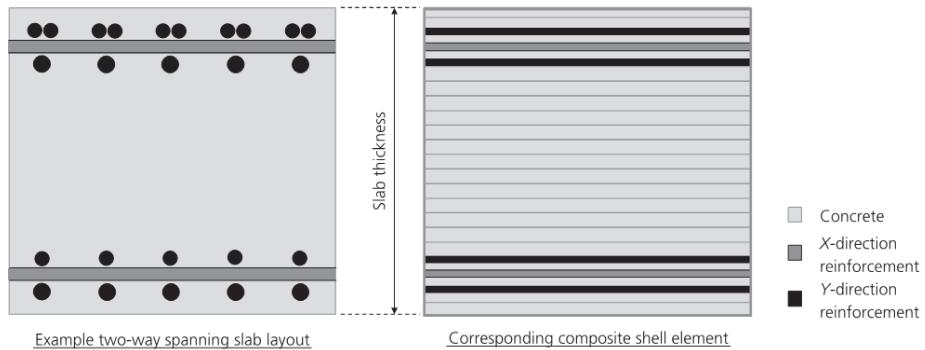


Figure 6.6-16 : Exemple de représentation d'une dalle bidirectionnelle en tant que matériau composite MAT_CONCRETE_EC2

6.6.8 Conditions d'appui

La piste multifonctionnelle de la section 3 et 7 du pont Jacques-Cartier est séparée du tablier de la route principale et n'est soutenue que par des appuis qui permettent un mouvement latéral pour la plupart des supports. Les conditions de support ont été appliquées au modèle pour représenter ces appuis ainsi que les joints de dilatation. Un exemple de travée est représenté à la Figure 6.6-17.

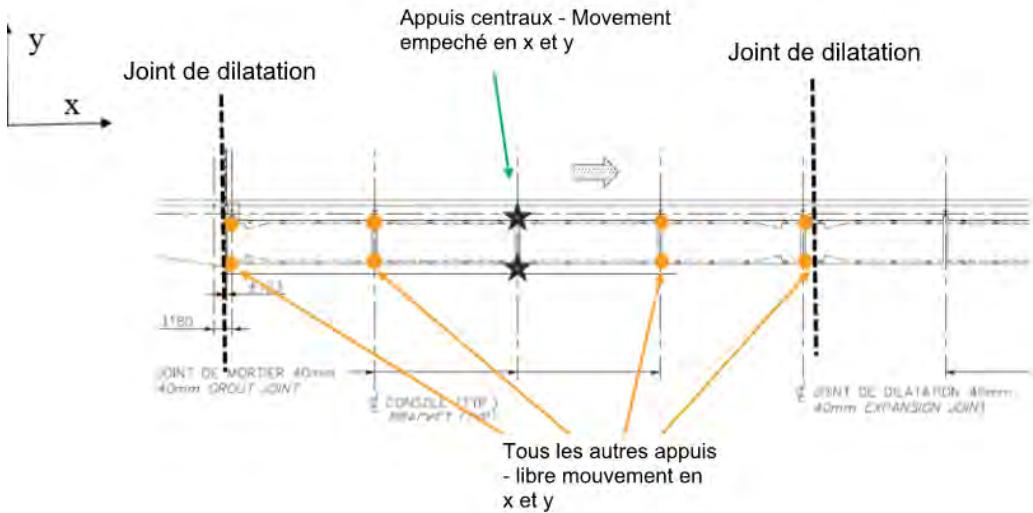


Figure 6.6-17: Exemple de conditions d'appuis d'une travée de la section 3

La piste multifonctionnelle de la section 7 présente une certaine variabilité dans sa longueur de travée et dans la précontrainte des diverses sections du tablier. Une analyse 3D non linéaire a été effectuée sur une zone représentative, entre les sections CL5 et CL11 comme l'illustre la Figure 6.6-18. L'analyse linéaire réalisée sur toute l'étendue de la piste multifonctionnelle de la travée principale indique que d'autres sections subiront des moments maximaux similaires et donc que des fissures sont probables sous les charges considérées.

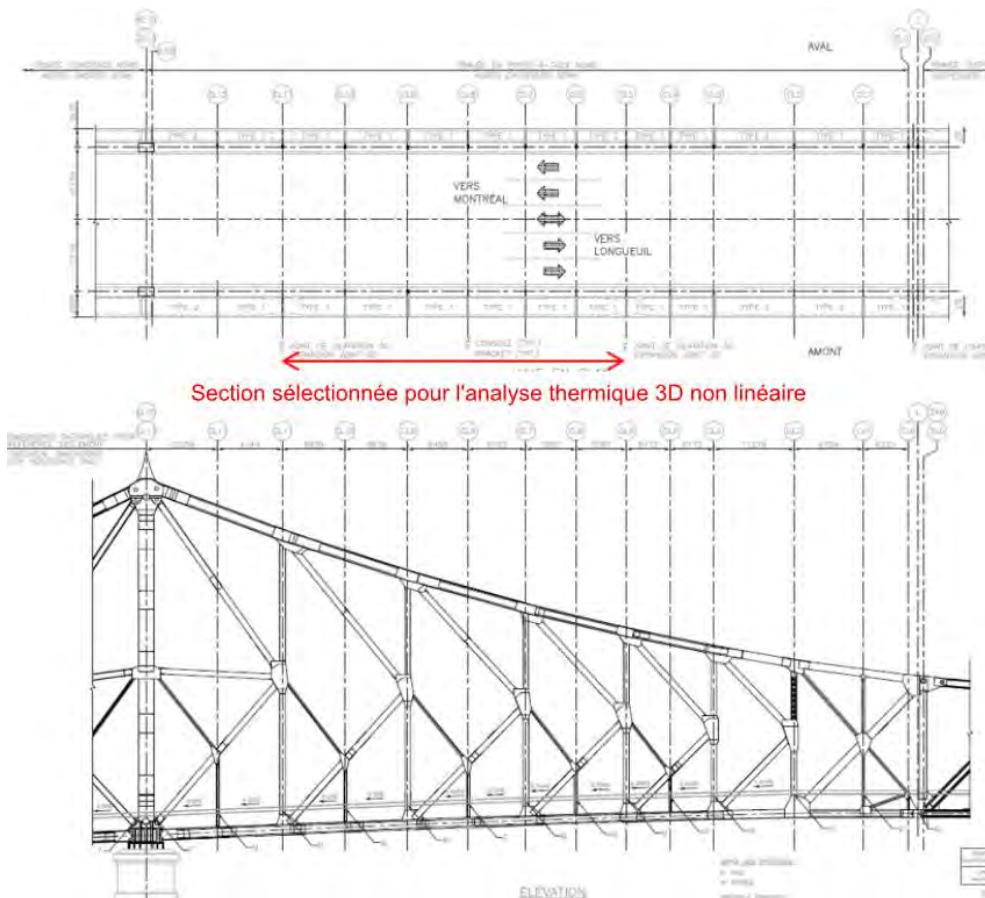


Figure 6.6-18 : Aménagement général de la travée principale

6.6.9 Largeur maximale des fissures

Le tableau 8.6 du code canadien sur le calcul des ponts routiers³⁸ spécifie une largeur de fissure maximale de 0,15 à 0,20 mm pour les éléments structuraux précontraints en fonction de leur type d'exposition (ex. : produits de déglaçage, milieu marin, etc.). Limiter les fissures à ces largeurs permet d'assurer la longévité des structures en réduisant leurs risques de corrosion. La surface supérieure et les côtés de la piste multifonctionnelle pourraient être exposés à des produits de déglaçage. Pour ces raisons, une limite de largeur de fissuration de 0,15 mm a été appliquée à la surface supérieure et aux côtés de la dalle de béton de la piste multifonctionnelle. Si ces surfaces ne sont pas susceptibles d'être exposées aux produits de déglaçage, une limite de largeur de fissuration de 0,20 mm pourrait être considérée.

6.6.10 Résultats d'analyse thermique

Tel que discuté dans la Section 6.6.7, l'analyse thermique a été effectuée pour deux (2) cas de résistance à la traction du béton:

³⁸ Code des Ponts : CAN/CSA S6-14 - Code canadien sur le calcul des ponts routiers

- > Résistance à la traction du béton, $f_{tl} = 3.1 \text{ MPa}$ – basée sur le Code CAN/CSA S6-14, équivalent au 5^e percentile de la résistance à la traction du béton³⁹
- > Résistance à la traction du béton, $f_{tl} = 4.4 \text{ MPa}$ – basée sur l'Eurocode, équivalente à la valeur moyenne.

De plus, la fissuration sur deux zones a été étudiée comme suit (voir également la Figure 6.6-19) :

- > **Sur les côtés de la section :** ces zones bénéficient de l'effet de la compression due à la précontrainte.
- > **Aux extrémités de la section :** suite à la modélisation 3D du tablier, des contraintes en traction relativement élevées (juste en dessous de la résistance en traction du béton) ont été observées aux extrémités de la section sous la charge combinée due au poids propre et à la précontrainte tel que présente sur la Figure 6.6-20. Cela veut dire qu'une petite charge thermique suffira afin de provoquer la fissuration de la dalle à ces endroits. Il est à noter que cet effet est présent sur des sections d'un mètre à peu près depuis les extrémités de la section (c.à.d. depuis les joints de dilatation).

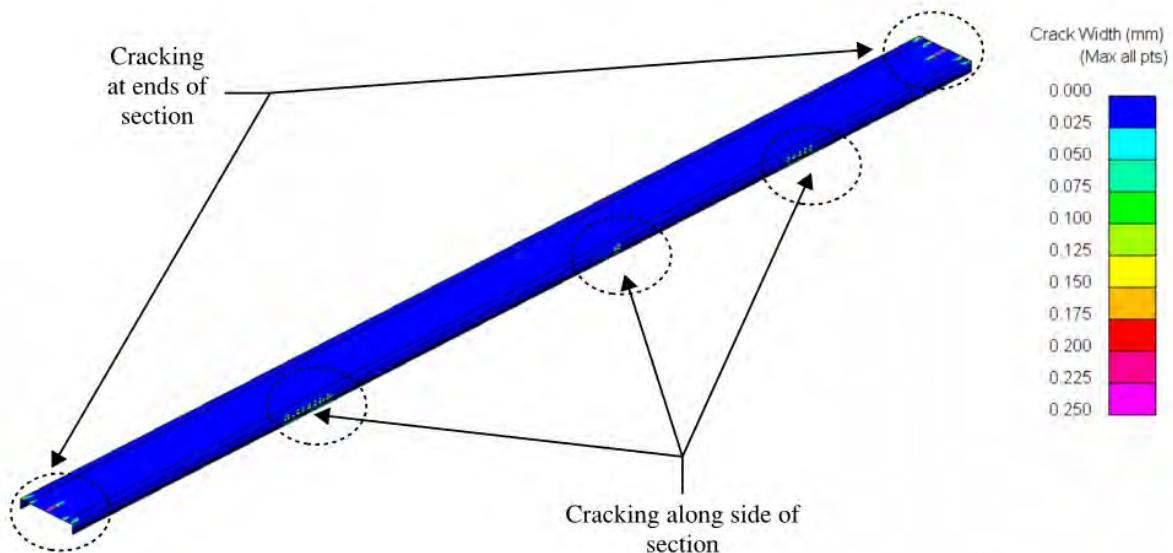


Figure 6.6-19 : Zones considérées lors de cette étude

³⁹ Le Code canadien sur le calcul des ponts routiers (Canadian Highway Bridge Design Code) S6-14 Juillet 2017

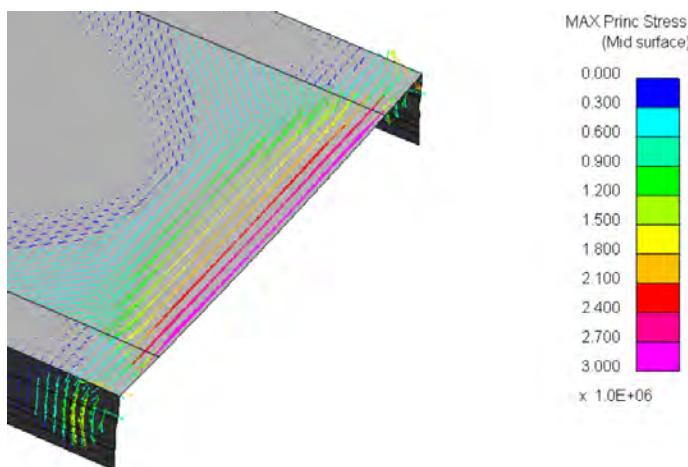


Figure 6.6-20 : Contraintes maximales principales (Pa) – poids propre et précontrainte seulement

6.6.10.1 Résultats selon le code CAN/CSA S6-14

La Figure 6.6-21 montre la largeur maximale prédictive des fissures à travers le tablier de la piste multifonctionnelle de la voie maritime et la travée principale à mesure que le différentiel de température sur la surface supérieure de la dalle augmente de 0°C à 25°C par paliers de 6,25°C et augmente jusqu'à 50°C par la suite.

La fissuration des sections sur les côtes des travées principale et sur la voie maritime n'excédera pas 0,15 mm jusqu'à un différentiel de températures > 50°C et 100°C respectivement.

La largeur de fissuration maximale observée aux extrémités sur la travée principale (section 7) franchit la limite de 0,15 mm lorsque la différence de température appliquée est plus grande ou égale à 6,25°C.

La largeur de fissuration maximale observée aux extrémités sur la voie maritime (section 3) franchit la limite de 0,15 mm lorsque la différence de température appliquée est plus grande que 12,5°C.

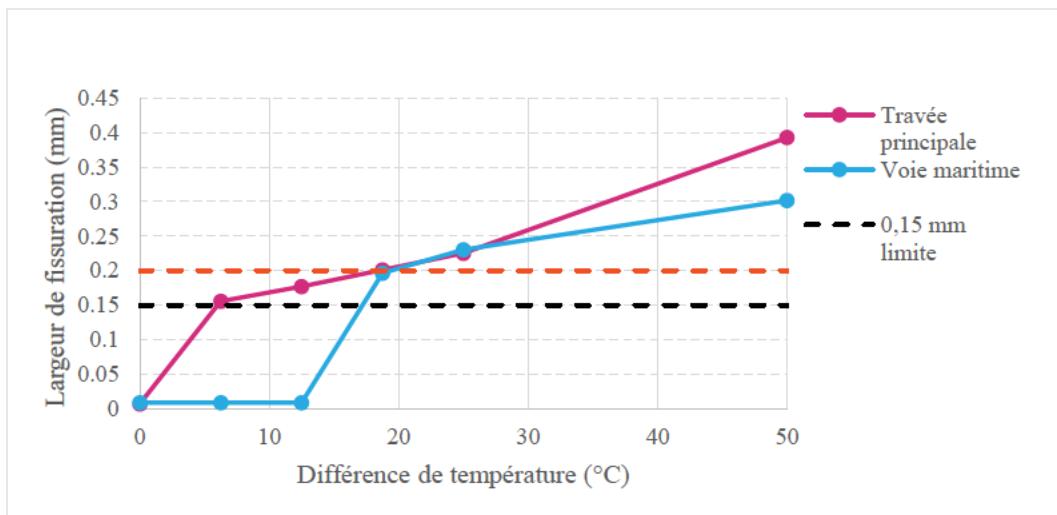


Figure 6.6-21 : Largeur de fissure vs différence de température pour la voie maritime et la travée principale

Les fissures les plus larges surviennent à deux endroits sur chacune des sections :

- > Aux extrémités des dalles (voir Figure 6.6-22) ;
- > Sur les côtés de la section, au bas des nervures et au centre (voir Figure 6.6-23).

Les extrémités des dalles sont plus susceptibles à la fissuration en raison du faible renforcement combiné aux grands efforts de tension transversale résultant des effets d'extrémités. La formation de fissures est prévue à cet endroit, à une différence de température inférieure à celle des côtés de la section.

Le comportement de la fissuration est similaire pour la travée principale et la travée au-dessus de la voie maritime de la piste multifonctionnelle.

La Figure 6.6-24 montre les contraintes dans l'armature causée par la fissuration à l'extrémité de la travée principale de la piste multifonctionnelle avec une différence de température de 25°C. La fissuration à l'extrémité de la dalle entraîne la plastification locale de l'armature.

La Figure 6.6-25 montre les contraintes dans l'armature causée par la fissuration sur les côtés de la section de la travée principale de la piste multifonctionnelle avec une différence de température de 50°C. Cette fissuration provoque des contraintes locales élevées, mais est généralement sous la limite d'élasticité.

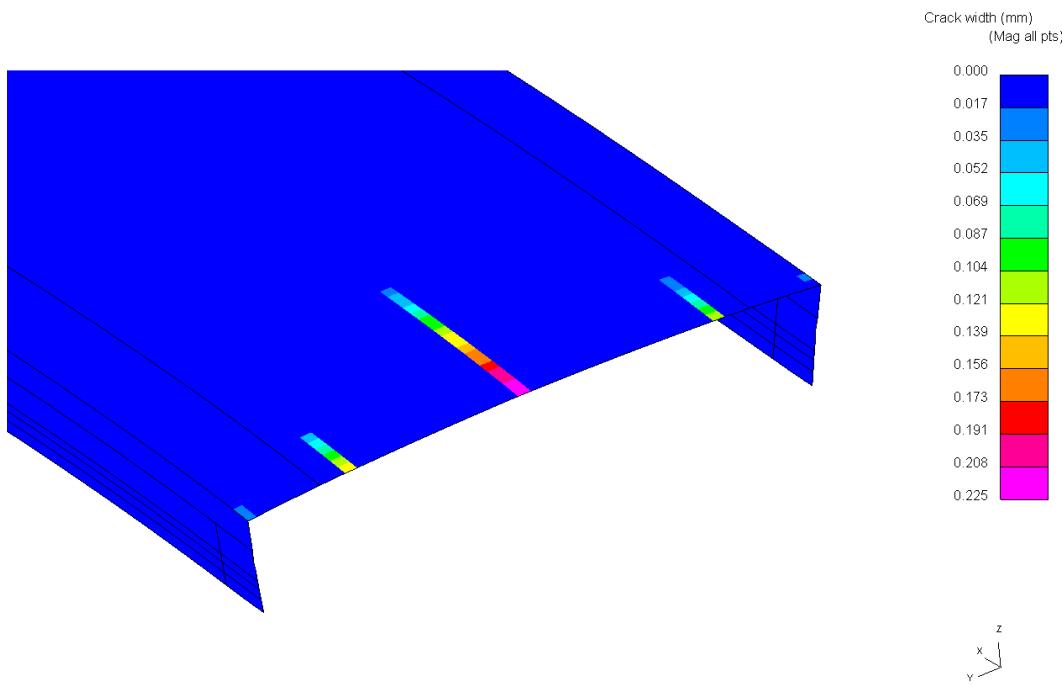


Figure 6.6-22 : Fissuration à l'extrémité de la section de la travée principale à une différence de température de 25°C. Un comportement similaire a été constaté pour la section de la voie maritime de la piste multifonctionnelle.

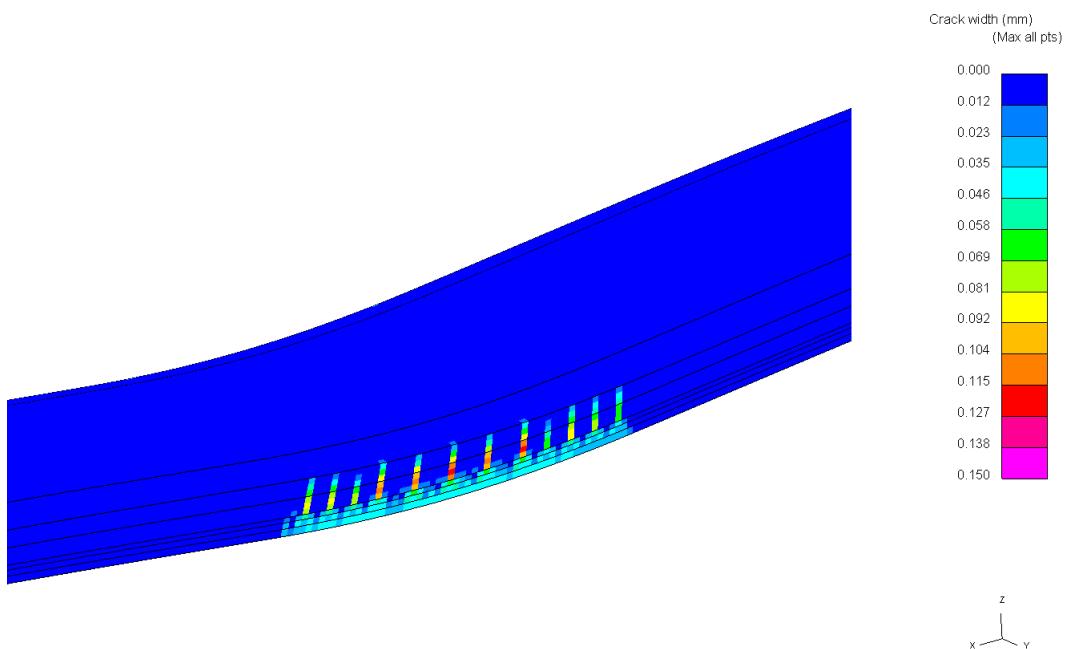


Figure 6.6-23 : Fissuration sur les côtés de la section de la travée principale à une différence de température de 50°C. Un comportement similaire a été constaté pour la section de la voie maritime de la piste multifonctionnelle.

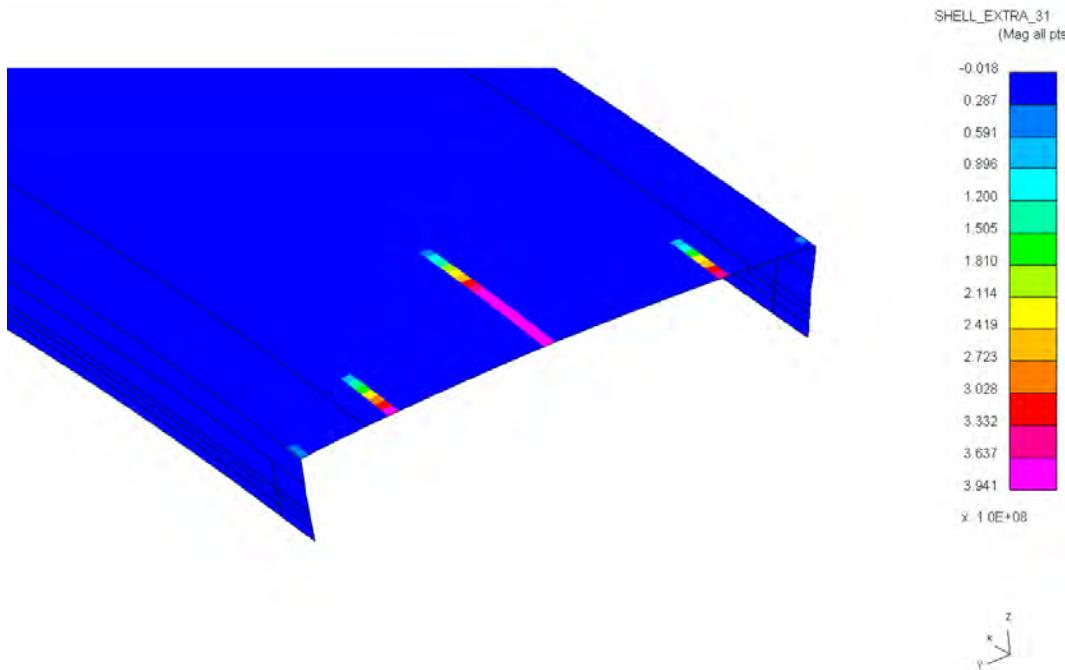


Figure 6.6-24 : Limite d'élasticité de l'armature (Pa) à l'extrémité de la section de la travée principale à une différence de température de 25°C. Un comportement similaire a été constaté pour la section de la voie maritime de la piste multifonctionnelle.

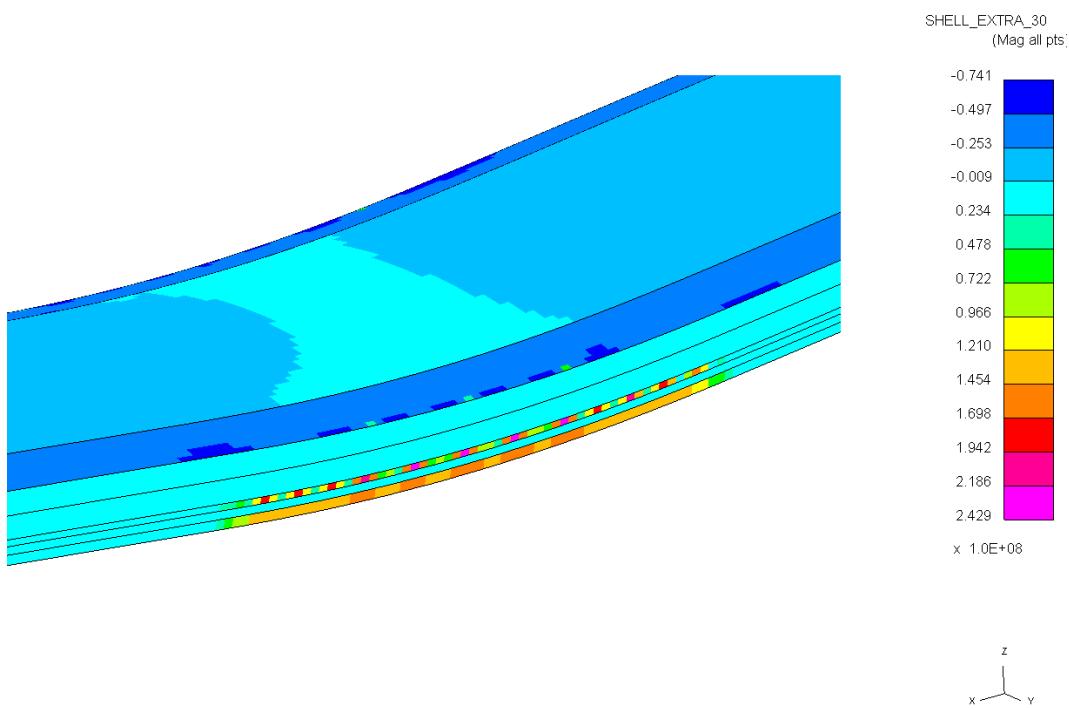


Figure 6.6-25 : Limite d'élasticité de l'armature (Pa) sur les côtés de la section de la travée principale à une différence de température de 50°C. Un comportement similaire a été constaté pour la section de la voie maritime de la piste multifonctionnelle.

6.6.10.2 Résultats selon l'Eurocode 2

L'analyse a été répétée avec une résistance à la traction du béton de 4,4 MPa. Cette valeur représente la moyenne de résistance à la traction du béton avec une résistance à la compression de 60 MPa selon le Tableau 3.1 de l'Eurocode 2⁴⁰. Il est à noter que, selon l'Eurocode 2, la valeur caractéristique de résistance à la traction (5% fractile) pour cette résistance à la compression est de 3,1 MPa ce qui correspond à la valeur du Code CAN/CSA S6-14⁴¹. Cependant, la valeur moyenne de la résistance à la traction est habituellement utilisée pour les calculs de largeur des fissures.

La Figure 6.6-26 montre la largeur maximale des fissures à travers les sections de la travée principale et de la voie maritime de la piste multifonctionnelle à mesure que la différence de température à la surface supérieure de la dalle augmente de 0°C à 25°C par paliers de 6,25°C, et augmente jusqu'à 50°C par la suite. Seulement les résultats pour les sections critiques sont présentés; soit les sections aux extrémités de la travée.

⁴⁰ Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, BS EN 1992-1-1:2004, Février 2014

⁴¹ Le Code canadien sur le calcul des ponts routiers (Canadian Highway Bridge Design Code) S6-14 Juillet 2017

La largeur de fissuration maximale observée aux extrémités de la section de la travée principale franchit la limite de 0,15 mm quand la différence de température appliquée est plus élevée que 18,75°C.

La largeur de fissuration maximale observée aux extrémités de la section de la voie maritime franchit la limite de 0,15 mm quand la différence de température appliquée est plus élevée que 37,5°C.

Les fissures se produisent sur les côtés et aux extrémités de la section telles qu'illustrées à la Section 6.6.10.1. En outre, les contraintes dans l'armature sont toujours inférieures à la limite d'élasticité.

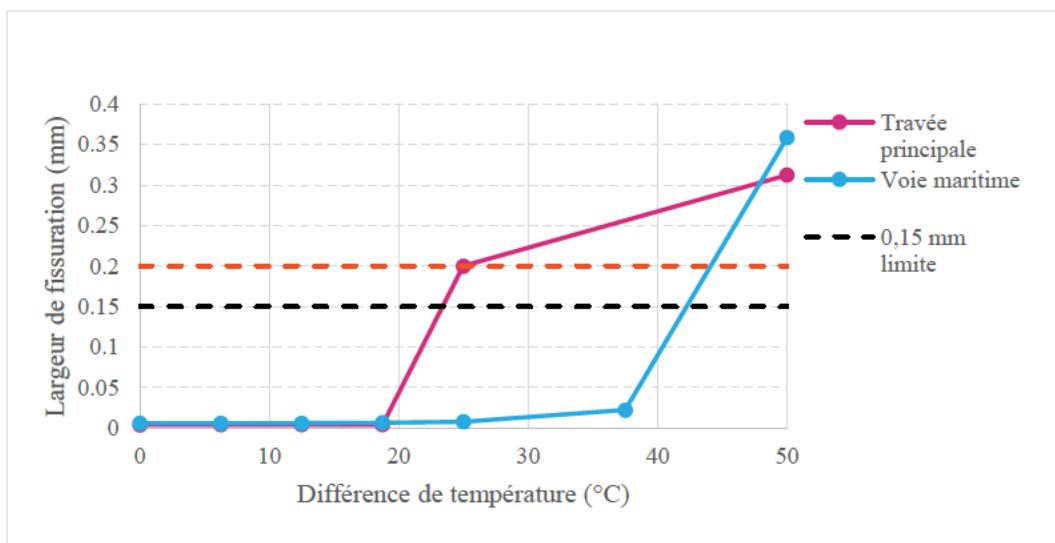


Figure 6.6-26 : Largeur de fissure vs différence de température pour la voie maritime et la travée principale avec une résistance à la traction de 4,4MPa

6.6.11 Conclusion de l'analyse des effets thermiques sur la dalle

Une analyse thermique a été complétée pour évaluer les effets potentiels de gradients thermiques entre les surfaces supérieure et inférieure de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier. Les gradients thermiques appliqués représentent l'introduction possible d'un système de chauffage sur la surface de la piste multifonctionnelle afin de prévenir l'accumulation de neige et la formation de glace lors de la saison hivernale.

L'évaluation s'est limitée à la section au-dessus de la voie maritime et de la travée principale – section 3 et 7 respectivement puisque le tablier de la piste multifonctionnelle est isolé du tablier de la route à ces endroits et est donc plus affecté par l'introduction d'un système de chauffage.

Le Code CAN/CSA S6-14⁴² spécifie une largeur de fissure maximale de 0,15 – 0,20 mm pour les composants précontraints dépendamment de leur type d'exposition (produits déglaçant, brouillard salin, etc.). Limiter la fissuration à ces niveaux aide à assurer la longévité de la structure en réduisant la corrosion. La fissuration causée par les charges thermiques est prévue de se produire sur les côtés et aux surfaces de la piste

⁴² Code des Ponts : CAN/CSA S6-14 - Code canadien sur le calcul des ponts routiers

multifonctionnelle. Ces deux zones sont susceptibles au brouillard salin ou au ruissellement en surface contenant des produits déglaçant, et par conséquent, une largeur limite de fissuration de 0,15 mm est considérée appropriée. Si ces surfaces ne sont pas exposées aux produits déglaçant, la limite pourrait alors être de 0,20 mm.

La fissuration a été étudiée sur deux zones; soit sur les côtés de la section et aux extrémités de la section. La zone la plus critique est celle aux extrémités de la section à cause de la présence de traction transversale.

La résistance à la traction du béton est une hypothèse clé dans l'évaluation de la fissuration. Le Code CAN/CSA S6-14⁴³ suggère une valeur de 3,1MPa pour un béton C60. Selon les commentaires de la même norme, cette valeur est jugée conservatrice et une valeur plus élevée pourrait être justifiée dans certains cas. Dans le guide Eurocode⁴⁴ la valeur moyenne de résistance à la traction est de 4,4MPa et est habituellement utilisée pour l'évaluation de la fissuration ; 3,1MPa est listé comme le 5^e percentile de la résistance à la traction du béton. Puisque cette valeur affecte grandement la taille des fissures atteintes, l'évaluation a été faite pour les valeurs de 3,1MPa et 4,4MPa.

Le Tableau 6.6-27 ci-dessous illustre le différentiel de température nécessaire entre la surface supérieure et inférieure de la dalle afin de développer une largeur de fissure de 0,15 mm et 0,20 mm à l'endroit le plus critique; aux extrémités de la dalle.

L'utilisation d'une base d'évaluation conservatrice de la résistance à la traction de 3,1MPa et cibler une largeur de fissure de moins de 0,15 mm suggère que tous éléments de chaleur doivent être limités à une différence de température de moins de 6,25°C et 12,5°C pour les sections de la travée principale et de la voie maritime respectivement. Ces valeurs, étant insuffisante pour obtenir un rendement efficace pour tout système de chauffage, deux alternatives sont possibles :

- > une isolation appropriée entre les éléments de chaleur et le tablier en béton doit être fournie;
- > la dalle du pont doit être remplacée avec une conception qui tient compte du différentiel de température convenable à l'utilisation d'un système de chauffage.

Si le guide Eurocode⁴⁴ est utilisé pour la résistance à la traction (4,4MPa) et qu'une largeur de fissure de moins de 0,20 mm est ciblée, la différence de température admissible augmente de 25°C et > 37,5°C.

⁴³Code des Ponts : CAN/CSA S6-14 - Code canadien sur le calcul des ponts routiers

⁴⁴ Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, BS EN 1992-1-1:2004, February 2014

Tableau 6.6-27 Résultats de l'évaluation de la fissuration thermique aux extrémités de la dalle

Section	Résistance à la traction du béton (MPa)	Déférence de température pour le développement d'une fissure de 0,15 mm	Déférence de température pour le développement d'une fissure de 0,20 mm
Travée principale	3,1 ¹	6,25°C	18,5°C
Voie maritime		12,5°C	18,75°C
Travée principale	4,4 ²	18,75°C	25°C
Voie maritime		> 37,5°C	> 37,5°C

¹ Valeur recommandée dans le Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CAN/CSA S6-14). Équivalente au 5e percentile (caractéristique) de la résistance à la traction dans l'Eurocode

² Valeur recommandée dans l'Eurocode pour l'évaluation de la fissuration. Équivalente à la résistance à la traction moyenne.

6.7 Conclusion

La présente section a démontré que dans le contexte actuel et selon les contraintes du pont Jacques-Cartier, les technologies de système de chauffage suivantes ne sont pas propices à une implantation sur l'infrastructure existante à moins qu'une modification majeure au tablier soit effectuée :

- > Système à fils chauffants intégrés dans le béton ;
- > Systèmes de chauffage hydronique ;
- > Système de chauffage à béton conducteur.

Cependant, ces solutions de chauffage pourraient être envisagées en cas de remplacement de la dalle du pont Jacques-Cartier.

Deux différents systèmes de chauffage ont été mis à l'essai sur le pont Jacques-Cartier, plus précisément le système de tapis chauffants et le système de membrane chauffante.

Suite à la mise à l'essai de ces deux différents systèmes de chauffage, une évaluation a été effectuée afin de comprendre si ces systèmes sont applicables et performants dans le contexte de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier.

Il a été conclu que le système de tapis chauffant présente plusieurs problématiques, notamment :

- > Les tapis chauffants ne se combinent pas adéquatement aux méthodes conventionnelles de déneigement dû à la présence de plusieurs joints entre les tapis et la non-fixation des tapis qui crée des risques d'arrachement et de dérapage ;
- > La tension requise pour alimenter les tapis chauffants et le grand nombre de connexions rendent la logistique d'alimentation et d'implantation complexes surtout en cas d'application sur toute la longueur du pont ;
- > Les tapis chauffants ont une faible durabilité et durée de vie selon la garantie et les informations fournies par le fournisseur ;
- > L'approvisionnement et l'entretien du système de tapis chauffants sont coûteux.

Selon les analyses effectuées et dans le cadre de la compréhension des besoins et contraintes de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier, il semble que le système de membrane chauffante est mieux adapté pour le cas présent. Toutefois, un seul suivi a pu être effectué sur la membrane chauffante mise à l'essai sur le trottoir du pont Jacques-Cartier. Les résultats obtenus lors de ce seul suivi indiquent des performances inadéquates pour l'hiver montréalais. Néanmoins, il est probable qu'une mauvaise installation du système en soit la cause puisque les données récoltées divergent considérablement des données fournies par le fournisseur. Il est donc suggéré de procéder à la vérification de la membrane chauffante en effectuant des essais additionnels afin de bien statuer sur son niveau de performance. Il est important de noter qu'il est difficile d'effectuer des réparations avec ce produit, comme ce fut le cas suite à la première installation vandalisée.

Plusieurs observations et constatations ont été effectuées lors du projet pilote et soulevées dans cette section qui peut guider l'opération de tout système de chauffage sur le pont Jacques-Cartier :

- > Les systèmes de chauffage fournissent une qualité de surface jugée sécuritaire, et ce, en continu lorsque ces derniers sont activés de manière proactive, c.-à-d. avant les épisodes de précipitation ;
- > Les systèmes de chauffage peinent à faire fondre la neige rapidement lorsque ces derniers sont activés de manières réactives, c.-à-d. suite à une accumulation de neige sur la surface du système de chauffage ;
- > Les systèmes de chauffage doivent demeurer activés suite aux intempéries afin d'en assécher la surface et prévenir la formation de glace suite à la fonte de neige ;
- > Il faut prévoir un minimum d'intervention mécanique afin de prévenir une fermeture de la piste multifonctionnelle en cas d'un bris ou d'une défaillance du système de chauffage ou lors d'un événement majeur où le système de chauffage ne permet pas une performance adéquate ;
- > Les systèmes de chauffage ont une capacité réduite lorsque ces derniers sont en présence de débris ou résidus. Il est donc important de les entretenir afin de prévenir la formation de croutes épaisses de saleté ;
- > Un système automatisé basé sur les prévisions météorologiques locales permettrait d'activer le système de chauffage avant et l'éteindre suite à toutes précipitations. Ceci éviterait le besoin de l'activer manuellement et ainsi les erreurs humaines. Toutefois, une activation manuelle doit demeurer possible afin de permettre l'activation du système à tout moment pour quelques raisons qui soit ;
- > Étant donné la complexité de gestion d'un système de chauffage, il pourrait être envisagé de cibler certaines sections du pont Jacques-Cartier par l'installation du système (ex. la section 7 ou le déneigement mécanique représente un défi en soi). Cette optimisation permettra de réduire les risques et les enjeux qui résultent de son installation et opération ;
- > Les systèmes de chauffage génèrent une quantité abondante d'eau de fonte. Cette eau devra être évacuée efficacement de la surface de la piste multifonctionnelle pour ne pas s'accumuler à des points bas non drainés et ainsi créer des zones à risque de formation de glace. De plus, l'eau ne devra pas s'englacer dans les drains et ainsi les bloquer. Une solution de drainage devra donc être élaborée.

En outre, il a été déterminé que la dalle de la piste cyclable du pont Jacques-Cartier est à risque de fissuration due à l'installation d'un système de chauffage qui pourrait générer des différentiels de température de plus de 6,25°C et 12,5°C pour les sections de la travée principale et de la voie maritime. Ces valeurs, étant insuffisantes pour obtenir un rendement efficace pour tout système de chauffage, deux alternatives sont possibles :

- > une isolation appropriée entre les éléments de chaleur et le tablier en béton doit être fourni;

- > la dalle du pont doit être remplacée avec une conception qui tient en compte un différentiel de température convenable à l'utilisation d'un système de chauffage.

Toutefois, si le guide Eurocode⁴⁴ est utilisé pour la résistance à la traction (4,4 MPa) au lieu de celle prescrite par le code canadien sur le calcul des ponts routiers (3,1 MPa) et qu'une largeur de fissure de moins de 0,20 mm est ciblée, la différence de température admissible augmente à 25°C pour la travée principale et à plus de 37,5°C pour la section de la voie maritime.

Or, si un système de chauffage est installé sur la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier, la conception de ce système et son implantation devra considérer les effets thermiques afin de ne pas nuire à la durabilité du tablier en béton armé.

7 Sécurité

Afin d'assurer une sécurité suffisante aux usagers de la piste multifonctionnelle, il convient de passer en revue les nombreux enjeux reliés à la sécurité de la piste.

7.1 Dégagement horizontal de la piste multifonctionnelle

La piste multifonctionnelle a une largeur variable le long du pont Jacques-Cartier :

- > Largeur de dimensionnement : 2500 mm
- > Typiquement la largeur est mesurée au droit des lampadaires, car relativement nombreux : 2340 mm⁴⁵
- > Au-dessus de la voie maritime (section 3) : 2450 mm
- > Au niveau des cadres de super-signification (une quinzaine d'éléments le long du pont) : 2160 mm

Globalement la piste fait donc 2300 mm de large avec des passages plus étroits aux cadres de super-signification uniquement.

7.1.1 Piste cyclable bidirectionnelle - Conception

Selon le guide de conception du Ministère des Transports⁴⁶, pour une piste cyclable bidirectionnelle, il est recommandé de fournir un dégagement horizontal de :

- > $2*1500 = 3000$ mm dans un espace fermé ;
- > $2*1500-250 = 2750$ mm dans un espace ouvert.

Tableau 15.4-2
Largeur des pistes cyclables (m)

Débit de cyclistes/jour	Moins de 1500	Plus de 1500
Unidirectionnelle	1,5	2,5
Bidirectionnelle	2,75	3

Note :

- dans le cas des pistes à usage polyvalent (ex. : ski, patin à roues alignées) mais interdites aux véhicules motorisés et où la circulation piétonnière le justifie, ajouter 0,5 m de largeur pour chaque voie ou prévoir un sentier piéton en parallèle d'au moins 1,5 m de largeur lorsque la circulation piétonnière est importante.

Figure 7.1-1 : Ministère des Transports – Tome I – Conception des pistes cyclables (Tiré à part) – Tableau 15.4-2

⁴⁵ Voir rapport d'inspection 001 Rapport de visite du site 2017-12-07 (Arup)

⁴⁶ Tome I – Conception des pistes cyclables (Tiré à part)

Il faut noter que ces dimensions sont recommandées dans le cas de la conception d'une nouvelle piste cyclable ; et afin de fournir un certain confort au cycliste (voir la zone de confort sur la Figure 7.1-2). De plus, ces exigences ne font pas distinction entre les saisons (c.-à-d. aucune exigence particulière en cas de circulation hivernale).

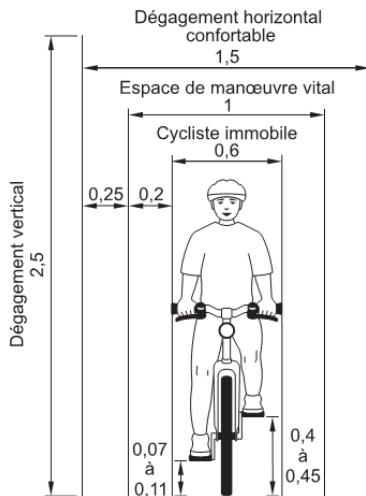


Figure 7.1-2 : Espace occupé par le cycliste, Ministère des Transports – Tome I – Conception des pistes cyclables (Tiré à part)

Largeur supplémentaire pour les pentes fortes

Selon le même guide, une largeur supplémentaire de 0,3m est nécessaire dans chaque direction pour accommoder la vitesse en descente et le louvoiement en montée (Article 15.4.5.2) :

- $2*1500 + 2*300 = 3600 \text{ mm dans un espace fermé.}$

Autres normes

En supplément, le manuel de conception des pistes cyclables Néerlandais différencie le dégagement latéral à hauteur de guidon et le dégagement latéral au sol, tel que montré sur la Figure 7.1-3 :

- > À hauteur de guidon, en espace ouvert : $325+750+250+750+325 = 2400 \text{ mm}$
- > À hauteur de guidon, en espace clos : $625+750+250+750+625 = 3000 \text{ mm}$
- > Au sol : $325+750+250+750+325 = 2000 \text{ mm}$

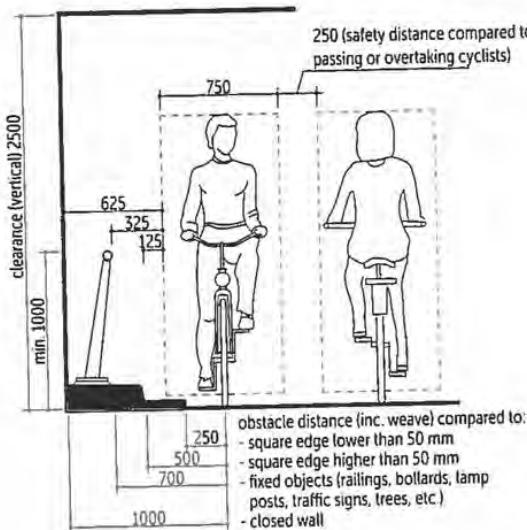


Figure 7.1-3 : Enveloppe d'un cycliste – CROW-Fietsberaad (2017), Design Manual for Bicycle Traffic, P. 49

7.1.1.1 Piétons

Il faut noter que ces valeurs ne supposent pas la présence de piétons sur les voies cyclables, voir Section 8.1.1 pour la variante unidirectionnelle, et Section 2.3 pour la situation des piétons.

7.1.2 Piste cyclable bidirectionnelle - Existant

Pour la signalisation de pistes cyclables existantes, le Ministère des Transports demande l'installation d'un panneau « Passage étroit » lorsqu'une piste cyclable rétrécit localement. Il demande aussi une mention spéciale « 1 voie » lorsque la piste cyclable est de moins de 1.8 m de large. La figure suivante montre les panneaux requis, selon le Tome V – Signalisation routière – Tiré à part – Voies Cyclables ; article 3.16.



Figure 7.1-4 : Panneau D-200-P-2 pour rétrécissement local de piste cyclable

Les contraintes historiques, structurales et d'utilisation ont mené à la géométrie actuelle de la piste du pont Jacques-Cartier et notamment à la largeur moyenne de 2.5m au niveau de la piste. Cette situation existante ne respecte pas les exigences du Ministère des Transports pour la conception de nouvelles structures pour les pistes cyclables (selon le Tome I – Conception des pistes cyclables, Tiré à part, Tableau 15.4-2. Toutefois, la largeur est

suffisante selon les critères du Ministère des Transports, pour la signalisation sur une piste existante bidirectionnelle (selon le Tome V – Signalisation routière, Tiré à part, Voies Cyclables, article 3.16).

La composante piétonne de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier est traitée séparément, voir la Section 2.3.

7.1.3 Piste cyclable unidirectionnelle avec piétons

Dans le cadre de la variante unidirectionnelle, en supposant que le trafic piéton (faible) est toujours présent, le manuel du Ministère des Transports recommande les valeurs suivantes pour la nouvelle conception :

- > $1500 \text{ mm (cyclistes)} + 500*2 \text{ (piétons)} = 2500 \text{ mm}$, voir Figure 7.1-1

Ce qui correspond à la largeur de conception de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier.

7.1.4 Situation hivernale lors du déneigement

Tel qu'indiqué à la Section 3.7, le déneigement permet d'obtenir une largeur de voie de 1.8m relativement facilement. La réduction est causée principalement par :

- > L'accumulation de neige en attendant qu'elle soit soufflée ;
- > La marge de sécurité latérale de l'opérateur lors de son déneigement, afin de ne pas abîmer les structures latérales, ou de ne pas pousser la neige ou la glace en bas du pont.

Ce stockage de neige sur les côtés de la piste est relativement temporaire : jusqu'au prochain soufflage pour le premier cas, ou jusqu'au prochain redoux dans le second cas.

Un nettoyage manuel avec une équipe dédiée pourrait mener à un déneigement plus méticuleux et permettre d'obtenir un dégagement latéral plus important.



Figure 7.1-5 : Dégagement latéral réduit lors du déneigement hivernal

7.2 Vitesse des cyclistes en descente

Il faut noter qu'au-delà du dégagement latéral, la problématique principale au niveau sécurité est la vitesse des cyclistes (non relevée) liée à la forte pente et sa longueur.

7.2.1 Géométrie

La pente prononcée de la piste (valeur 4,2%) s'étend sur plus de 600 mètres de long du côté Montréal :

- > **Section 8 : +4,12% sur 592m**
- > Section 7 : Parabole de +4% à -4% sur 590m
- > **Section 6 : -4,2% sur 240m environ -1,8% sur 32m**
- > Section 5 : Pavillon, pas de pente
- > Section 4 : -1% sur 365m et +3.7% sur 315m environ
- > Section 3 : 0% sur 76m
- > **Section 2 : -4,2% sur 420m**

+ : montée en direction Longueuil,

- : descente en direction Longueuil,

Cette géométrie est intrinsèque à la géométrie du pont et ne peut pas être modifiée. La gestion de la sécurité doit donc se faire en connaissance de cause.

Vitesse de conception

Selon le Ministère des Transports – *Tome I – Conception des pistes cyclables, Tiré à part*, Tableau 15.4-3, la vitesse de conception des nouvelles pistes, pour une telle configuration est suggérée à 45km/h pour une pente entre 3% et 5,9%. Cette vitesse permet d'ajuster :

- > Les rayons de courbure, non applicables ici ;
- > La distance de visibilité, peu applicable ici ; et
- > La largeur de la piste (voir Section 7.1).

7.2.2 Perception de sécurité

Un dégagement latéral plus important, c'est-à-dire une piste plus large, augmenterait le sentiment de sécurité des cyclistes et pourrait les inciter à augmenter leur vitesse en descente, ce qui n'est pas souhaitable.

7.2.3 Situation hivernale

La vitesse est d'autant plus critique en période hivernale à cause des conditions météorologiques, de luminosité (durant le jour) et de surface qui pourraient réduire la sécurité de la piste.

De manière générale, les usagers semblent ralentir par eux même en présence d'autres usagers et les croisements se font à faible vitesse en période estivale. Le fort achalandage de la piste (environ 3000 personnes par jour en juillet et août) accentue cette réduction de vitesse générale des cyclistes. En hiver le faible achalandage n'y participera pas. Toutefois, les cyclistes sont généralement plus prudents en hiver et rouent moins vite.

7.2.4 Accidents sur la piste

Au moins deux accidents majeurs et relativement récents ont été reportés par les médias sur la piste du pont Jacques-Cartier. Le premier en 2013⁴⁷ et le second en 2015⁴⁸. Dans les deux cas, la vitesse importante et l'absence du port de casque ont été relevées. Dans le second cas, le manque de visibilité de l'un des cyclistes (absence de phare avant) pourrait aussi être en cause. Il faut noter que le port du casque n'est pas obligatoire au Québec, mais par contre l'installation de phares avant et arrière le sont (uniquement la nuit), voir Section 7.4.

⁴⁷ <http://www.lapresse.ca/actualites/justice-et-faits-divers/faits-divers/201307/01/01-4666634-accident-sur-le-pont-jacques-cartier-un-cycliste-perd-la-vie.php>

⁴⁸ <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/735317/collision-cycliste-pont-jacques-cartier-mort>

7.2.5 Mesures d'atténuation de la vitesse

Dans le contexte hivernal et face aux enjeux particuliers du pont Jacques-Cartier listés précédemment, un certain nombre de mesures peuvent être adoptées afin d'inciter les cyclistes à réduire leur vitesse. Les mesures d'apaisement de la circulation de manière générale se regroupent dans 3 catégories :

- > Les mesures **d'ingénierie** : changement de la géométrie ; dégagement latéral plus faible ;
- > Les mesures **éducatives** : sensibilisation, ou radar pédagogique par exemple ;
- > Les mesures **exécutives** : présence policière, radars de vitesse avec contraventions.

Dans le cas particulier de la piste multifonctionnelle, quelques mesures sont proposées ici.

7.2.5.1 Radar pédagogique

Les mesures de réduction les plus efficaces pour les cyclistes sont généralement des mesures **éducatives**. Une entreprise canadienne, spécialisée dans le domaine de la signalisation industrielle et routière, fournit des radars de vitesse pédagogique qui donnent aux cyclistes leur vitesse. Leur installation est possible le long de la piste là où la pente est la plus forte (supérieure à 4%) par exemple aux sections 2, 6 et 8. Il est important que ces radars soient visibles, à hauteur des cyclistes (entre 1,3 et 1,8 m), de préférence de taille réduite afin qu'ils ne soient pas confondus avec des radars pour véhicules et qu'ils affichent une vitesse maximale prédéterminée afin d'éviter l'effet d'entrainement (« challenge ») des usagers.



Figure 7.2-1 : Afficheur pédagogique

7.2.5.2 Chicanes et déviateurs

Dans la catégorie des mesures d'ingénierie, certains concepts permettent de forcer le ralentissement des usagers. En circulation routière, la modification de la courbe d'un virage permet par exemple aux véhicules de ralentir à l'approche de ce dernier, sans nécessairement afficher une réduction locale de la vitesse avec des panneaux de signalisation. Dans le cas du pont Jacques-Cartier, la géométrie globale de la piste n'est pas modifiable, mais quelques mesures locales pourraient être appliquées.

Afin de forcer les cyclistes de ralentir leur vitesse de passage, PJCCI a installé des chicanes⁴⁹ sur la piste multifonctionnelle en avril 2018 tel que présenté sur la Figure 7.2-3.



Figure 7.2-2 : Chicanes installées sur le pont Jacques-Cartier en avril 2018

L’installation de chicanes permet de réduire considérablement la vitesse des cyclistes. Cependant, ces mesures sont ponctuelles (ralentissement très local) et donc leur implémentation doit être faite avec prudence en considérant particulièrement le contexte hivernal; les profils de cyclistes ainsi que l’effet sur l’achalandage hivernal. En outre, l’efficacité des chicanes et/ou déviateurs en hiver, le freinage de cyclistes en tenant compte de l’adhérence réduite en hiver et la complexité des opérations de déneigement en présence des chicanes sont des paramètres importants à considérer.

7.2.5.3 Autres mesures

D’autres mesures sont envisageables afin de permettre la réduction de vitesse des cyclistes, par exemple :

- > Ralentisseurs au sol de type « dos d’âne » pour inciter les usagers à ralentir. Il faut toutefois noter que cette mesure est fortement déconseillée à cause du risque de chute, et rend le déneigement plus difficile ;
- > Marquage au sol pour inciter au ralentissement (bandes rapprochées transversales, ou autre effet d’optique) ;
- > Panneaux fixes et messages variables : voir Section 7.4 sur la sensibilisation ;
- > Mesures éducatives et interactives : quand il s’agit d’inciter les usagers à la prudence, notamment sur une longue distance, les meilleures mesures sont celles qui font ralentir les cyclistes « inconsciemment ». Par exemple, il pourrait s’agir de créer un jeu de lumière afin d’attirer l’attention des usagers, et que ce jeu les

⁴⁹ Rapport 2599, Évaluation de l’impact des chicanes sur la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier, CIMA+, Nov. 2016

oblige à ralentir pour y participer. Quelques exemples où ce principe a été implémenté ont été fournis par la firme Copenhagenize et sont présentés ci-après :

- Onde verte avec compteur à rebours pour synchroniser le trafic cycliste avec les feux de circulation transverses ; ceci incite les cyclistes à rouler à 20 km/h ; Frederiksberg Bicycle Superhighway, Copenhagen⁵⁰, voir Figure 7.1-4 ;
- Lumières sensibles au passage des cyclistes dans les portions souterraines de la Cycle Superhighway au Danemark⁵¹, voir Figure 7.2-4.



Figure 7.2-3 : Onde verte avec compteur à rebours

⁵⁰ <http://www.copenhagenize.com/2014/08/the-green-waves-of-copenhagen.html>

⁵¹ <http://www.cycling-embassy.dk/2017/12/06/light-creates-safety-identity-along-cycle-superhighways/>

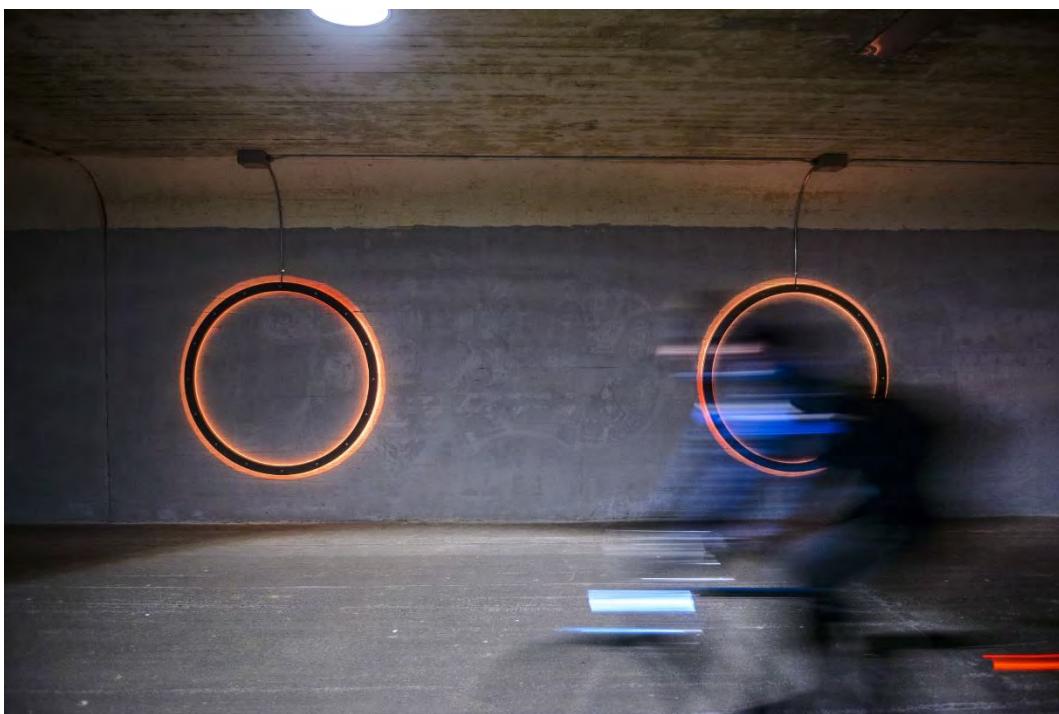


Figure 7.2-4 : Lumières sensibles au passage des cyclistes dans les portions souterraines de la Cycle Superhighway au Danemark

7.2.6 Efficacité des mesures proposées

Peu de recherches ont été faites sur l'impact des mesures de réduction de vitesse sur les cyclistes :

- L'impact des radars pédagogiques sur la vitesse des cyclistes n'a pas été confirmé, selon atelier de travail avec les représentants du comité consultatif des cyclistes du pont Jacques-Cartier Vélo Québec ;
- L'impact des chicanes a été testé sur le pont Jacques-Cartier, tel qu'indiqué dans la Section 7.2.5.2. Il a été démontré qu'elles sont efficaces très localement. Il serait pertinent de réviser l'étude sur les chicanes afin de considérer l'entretien hivernal du pont Jacques-Cartier.
- Quant aux autres mesures telles que les ralentisseurs, le marquage au sol, les panneaux à message variable et autres mesures interactives, elles n'ont jamais été testées, selon la firme Copenhagenize.

7.3 Éclairage et barrière anti-éblouissement

De nuit, le manque de visibilité peut affecter la sécurité des usagers. Pour « voir et être vu », il faut assurer un éclairage adéquat de la piste, mais aussi inciter les usagers à respecter la réglementation en installant des phares avant et arrière sur leur bicyclette.

7.3.1 Éclairage de la piste multifonctionnelle

Afin d'optimiser l'éclairage de la piste, il est nécessaire d'installer un éclairage suffisant et constant. En effet, le différentiel d'éclairage d'une zone à l'autre peut créer un éblouissement des usagers et une « zone d'ombre » susceptible de cacher un autre usager.

En 2000, une étude sur les niveaux d'éclairement⁵² a été réalisée sur la piste multifonctionnelle et le trottoir (à l'est). Les valeurs suivantes ont été relevées sur la piste :

- > 0,5 à 14,9 lux au niveau de la superstructure (section 7) ;
- > 1,2 à 32,1 lux sur les approches.

Une valeur moyenne de 6 lux est recommandée selon la norme IES ainsi des éclairages supplémentaires ont été recommandés à la section 7.

Durant le projet de Mise en Lumière sur le pont Jacques-Cartier⁵³ en 2015, une étude photométrique a aussi été réalisée, uniquement à la section 7. Les valeurs obtenues sont :

- > 10,2 à 97,0 lux au niveau de la superstructure (section 7) ;
- > Moyenne 32,7 lux.

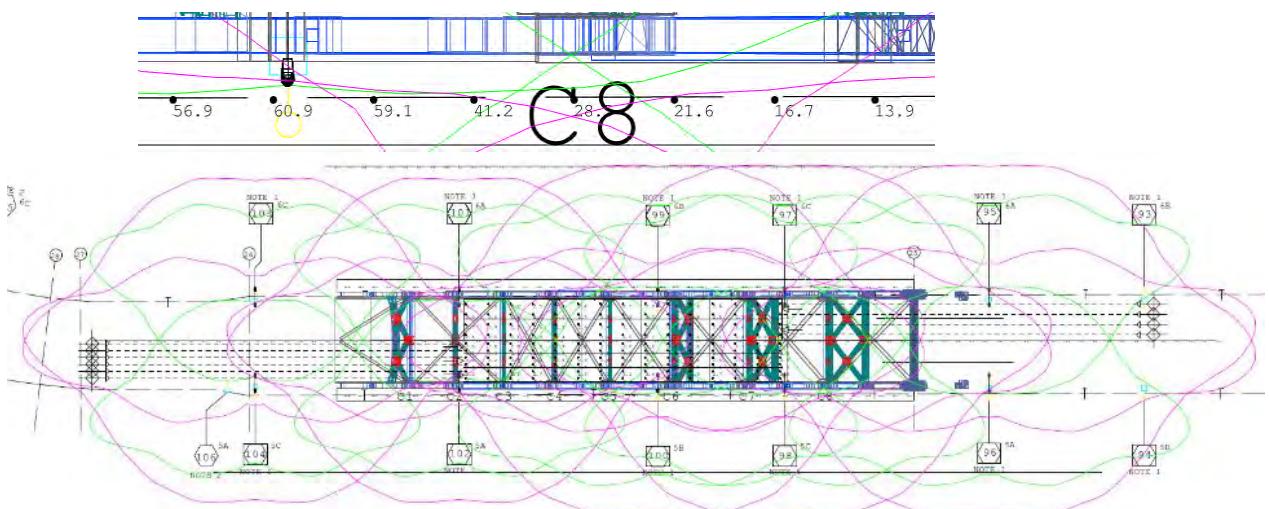


Figure 7.3-1 : Photométrie réalisée en 2015 pour la Mise en Lumière

Un éclairage supplémentaire a donc été installé sur la piste par rapport à l'étude de 2000. La moyenne de l'éclairage est désormais bien supérieure à la valeur de 6 lux recommandée dans le rapport initial.

Cependant les niveaux de luminosité restent très contrastés, ce qui n'améliore pas le problème de l'éblouissement des usagers et des zones d'ombres. Les valeurs sur le reste de la piste multifonctionnelle n'ont pas été mesurées, mais ont été relevées comme suffisantes dans la première étude.

⁵² Rapport 1014 – Étude des niveaux d'éclairement sur les trottoirs du tablier du pont Jacques-Cartier

⁵³ Photométrie Section 7 pour la Mise en Lumière – Ct. 62461 : 151-11367-00 du 20151218

Si, plus tard, le niveau de luminosité se révèle problématique, une étude spécifique est possible afin de proposer des pistes d'amélioration. Cependant ceci n'a pas été soulevé durant l'atelier de travail avec des représentants du comité consultatif des cyclistes du pont Jacques-Cartier tenu le 28 février 2018.

7.3.2 Écran anti-éblouissement et anti-projections

Les associations cyclistes ont toutefois soulevé une autre problématique plus importante : en courbe, les phares des véhicules circulant à contresens éblouissent fortement les cyclistes. La seule courbe importante du pont est localisée côté Montréal juste avant la travée principale, voir Figure 7.3-1. Les cyclistes en descente à cet endroit, en direction de Montréal, font face au trafic de véhicules en direction de Longueuil.

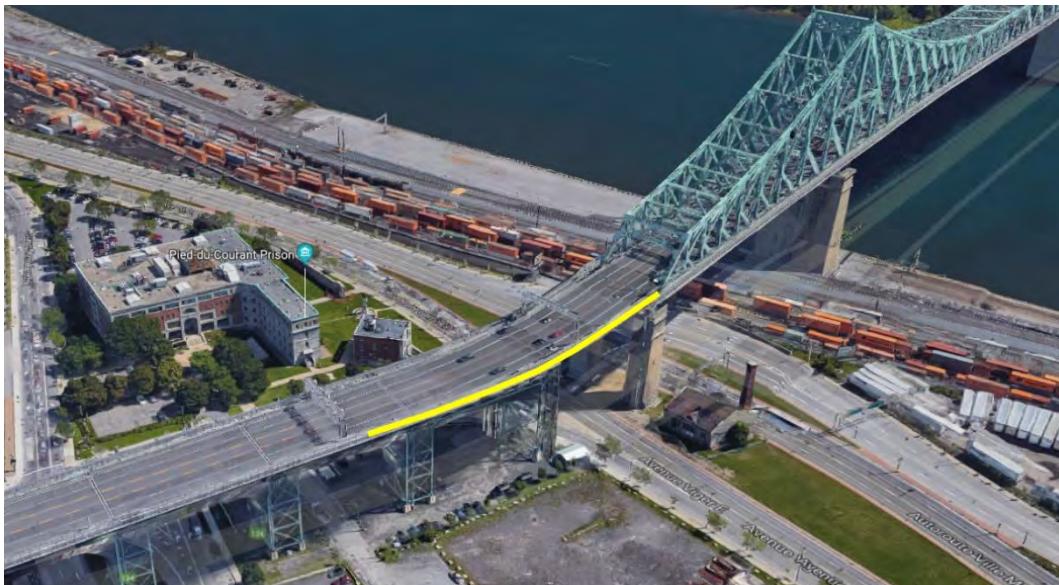


Figure 7.3-2 : Photométrie réalisée en 2015 pour la Mise en Lumière – Google Maps

Sur le reste du parcours, il a aussi été mention de projections parfois importantes de neige sale par les engins de déneigement du trafic routier, voir Figure 7.3-3.



Figure 7.3-3 : Projections des engins de déneigement sur la piste - Twitter

Afin d'adresser cette problématique, les mesures suivantes pourraient être envisagées :

- > L'installation d'écrans anti-éblouissement dans le virage en courbe de la section 8, voir Figure 7.3-4 ;
- > Une évaluation de la vitesse réelle des engins de déneigement et du trafic routier en général sur le pont (vitesse limitée à 50 km/h théoriquement). L'installation de radars (avec contravention ou radars pédagogiques) sur les voies de circulation pourrait entre autres permettre la régulation du trafic et donc des véhicules de déneigement ;
- > Si cette mesure s'avère inefficace, alors PJCCI pourrait envisager l'installation d'un écran de sécurité sur la barrière médiane, voir Figure 7.3-5. Il est aussi possible d'utiliser les écrans anti-éblouissement si les écrans anti-projections s'avèrent inadéquats. Les écrans anti-éblouissement peuvent fournir une certaine protection aux projections en fonction de la vitesse de celles-ci. Les écrans anti-projections (voir la Figure 7.3-5) devraient faire l'objet d'une analyse structurale en fonction de l'effet du vent et de l'effort latéral dû aux projections.



Figure 7.3-4 : Écran anti-éblouissement



Figure 7.3-5 : Écran anti-projections

7.3.3 Phares individuels pour les cyclistes

Tel que requis par le code de sécurité du Québec⁵⁴, il est obligatoire d'installer un phare blanc avant et un phare rouge arrière en cas de circulation de nuit.

Ces dispositions sont indispensables afin d'être vus par les autres usagers. Tel qu'indiqué à la section suivante sur la sensibilisation des usagers, cette réglementation pourrait être affichée aux abords du pont.

7.4 Sensibilisation

La sécurité des usagers passe aussi par la sensibilisation aux différents enjeux existants. Certains de ces points sont recommandés, d'autres obligatoires, en voici une liste non exhaustive :

⁵⁴ <https://saaq.gouv.qc.ca/securite-routiere/moyens-deplacement/velo/velo-equipements/>

Tableau 7.4-1 : Mesures de sensibilisation possibles

Point sécurité	Statut	Source	Application	Exemple
Port du casque	Fortement recommandé	SAAQ	Panneau Campagne	Figure 7.4-2
Utilisation de phares avant et arrière	Obligatoire, de nuit	SAAQ	Panneau	-
Limitation de la vitesse	Obligatoire	Normes Ministère des Transports	Panneau Campagne	Figure 7.4-6
Forte dénivellation	Avertissement	PJCCI	Panneau	Figure 7.4-3
Conditions hivernales difficiles	Avertissement	PJCCI	Panneau Campagne	Figure 7.4-4
Etat de la piste	Avertissement / Obligatoire	PJCCI	Feux tricolores, barrière automatique	Figure 7.4-5 Figure 7.4-7

Ainsi, afin de renforcer la sécurité des usagers, il serait pertinent d'adopter les mesures suivantes :

- > L'installation de panneaux de signalisation à l'entrée ou sur le pont, tel qu'indiqué au Tableau 7.4-1 ;
- > Dans la mesure du possible, effectuer une campagne de communication via les médias sociaux, les panneaux à messages variables ; ou conjointement avec d'autres acteurs de l'agglomération montréalaise et du cyclisme dans la province ;
- > L'installation de feux tricolores ou de panneaux à messages variables aux entrées du pont permettra d'informer les usagers sur l'état de la piste (ouvert, fermée, en déneigement, conditions difficiles...). À noter que les panneaux à messages variables peuvent aussi être utilisés pour d'autres messages plus personnalisés ainsi que pour la sensibilisation des usagers ; par contre les feux tricolores permettent d'envoyer un message clair et visible de loin ;
- > Dépendamment de la complexité logistique du déneigement, l'installation de barrières automatiques aux entrées pourra empêcher le passage des cyclistes durant les opérations de déneigement tout en permettant une commande à distance.



Figure 7.4-2 : Exemple de panneau incitatif pour le port du casque « portez votre casque à vélo, c'est une question de sécurité » - www.roadtrafficsigns.com



Figure 7.4-3 : Exemple de panneau d'avertissement de pente forte, transports.blog.lemonde.fr



Figure 7.4-4 : Exemple de panneau d'avertissement de vent fort, depositphotos.com



Figure 7.4-5 : Exemple de panneau d'avertissement de surface glissante www.roadtrafficsigns.com



Figure 7.4-6 : Exemple de campagne pour inciter au ralentissement, transports.blog.lemonde.fr



Figure 7.4-7 : Exemple de signaux lumineux à l'entrée du pont, www.victoria.ca



Figure 7.4-8 : Exemple de campagne de la Sureté du Québec prévue pour l'été 2018 pour sensibiliser les usagers vulnérables

7.5 Intersection au Pont de l'Île Sainte-Hélène

La piste multifonctionnelle entrecroise le pont de l'Île-Sainte-Hélène au niveau de la section 5 au Pavillon de l'île Sainte-Hélène. Dans le contexte hivernal, la réduction de la luminosité, les conditions météorologiques et les conditions de surface de la piste réduisent le niveau de sécurité à cette intersection. Des pistes d'amélioration permettant de renforcer la sécurité des cyclistes et piétons sont présentées ici.

À cet endroit, les véhicules sur le pont disposent d'une bretelle de virage à droite pour accéder à l'île. Les cyclistes et piétons peuvent quant à eux traverser la rue pour continuer vers la Rive-Sud ou emprunter la rue qui mène à l'île ou au Circuit Gilles Villeneuve entre autres, tel qu'illustré ci-dessous.



Figure 7.5-1 : Situation actuelle, Google Maps

Les cyclistes et piétons disposent d'une plus forte largeur de piste à cet endroit, qui est utilisée par plusieurs comme zone de repos avant de continuer le parcours.

La signalisation en place donne priorité aux véhicules sur le pont qui empruntent la bretelle de virage à droite. En effet, il n'existe pas de panneau de « céder le passage » ou « priorité aux cyclistes/piétons ». Par ailleurs, aucun panneau de réduction de vitesse à la sortie en courbe n'a été remarqué sur place.

À l'inverse, les véhicules qui empruntent la rue en provenance de l'île Sainte-Hélène disposent d'un arrêt obligatoire et un panneau d'indication de passage piétonnier, ce qui est plus favorable et sécuritaire en termes de priorisation.

La disposition actuelle semble être basée sur des recommandations faites en 2004 : « Étude de réaménagement de l'intersection cycliste d'accès au pavillon de l'île Sainte-Hélène », rapport #1486.

7.5.1 Pistes d'amélioration

La tendance actuelle pour réduire le risque de conflit entre les véhicules, les cyclistes et les piétons consiste à donner priorité aux plus vulnérables (« Vision Zéro »^{55,56}), en se basant sur :

- > La réduction de vitesse des usagers
- > L'amélioration de la visibilité

Voici une liste de mesures possibles afin d'améliorer l'intersection pour une sécurité optimale en hiver :

- > Implanter du **marquage de vitesse au sol** dans la bretelle pour inciter les véhicules à ralentir, comme à la sortie du tunnel Ville Marie (bandes rapprochées). À noter qu'en hiver, le marquage au sol peut être caché par l'accumulation de neige ;



Figure 7.5-2 : Exemple de marquage de vitesse au sol avec bandes rapprochées

- > Des mesures pourraient être mises en place au niveau du trafic (radars) afin d'implémenter une limitation de vitesse et de réduire le risque d'accident puisque l'enjeu principal ici est la vitesse des véhicules provenant du pont Jacques-Cartier,

⁵⁵ <https://ville.montreal.qc.ca/visionzero/>

⁵⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Vision_Zero

en descente. En effet, bien que leur **vitesse soit limitée à 50 km/h** sur l'ensemble du pont, elle n'est pas toujours respectée ;

- > Ajuster le marquage au sol pour implanter **une traverse multifonctionnelle** (pour cyclistes et piétons) au carrefour. Prévoir le déplacement de la ligne d'arrêt à l'approche sud qui empiète sur la nouvelle traverse multifonctionnelle, voir Figure 7.5-5 ;
- > Prévoir la **signalisation adéquate pour la piste** multifonctionnelle de part et d'autre de l'intersection (se référer au dessin normalisé 7 du Tome V, Chapitre 7 du Ministère pour plus de détails), voir Figure 7.5-4 ;
- > Installation du **panneau D-270-30** « Signal avancé de passage pour piétons et bicyclettes dans un îlot déviateur » à 55 mètres de la traverse pour cyclistes et piétons pour avertir à la circulation automobile qu'une intersection avec des cyclistes et piétons est imminente ;
- > Installation du **panneau D-120** « Vitesse recommandée dans une voie de sortie » au même emplacement que le panneau D-270-30. La vitesse affichée sur ce panneau doit prendre en considération la nouvelle géométrie au carrefour pour limiter la vitesse des véhicules qui empruntent cette bretelle ;
- > Installation du **panneau P-270-6-D** « Passage pour piétons et pour bicyclettes » ainsi que le panneau « Priorité piétonne » près de l'intersection ;
- > Les manœuvres des automobilistes (incluant les véhicules lourds) devront être réalisées à l'aide du **logiciel AutoTURN** afin de proposer un concept géométrique sécuritaire et convenable ;
- > Conserver la **signalisation existante à l'approche sud** de l'intersection (panneau d'arrêt et panneau d'obligation de virage à droite seulement) ;
- > Installation de **bollards en mousse** rapprochés (1000 mm) afin de faire ralentir les cyclistes. L'installation de chicanes pourrait déconcentrer les usagers et n'est pas recommandée aux intersections, voir Section 7.2.5.2 ;
- > Simplifier l'intersection autant que possible en réduisant la quantité de mobilier urbain, voir Figure 7.5-6. Les intersections trop chargées tendent à distraire les usagers.
- > Déneigement et entretien de la chaussée fréquent pour maintenir le marquage visible en tout temps.

Figure 7.5-3 : Ministère des Transports – Tome I – Conception des pistes cyclables (Tiré à part)

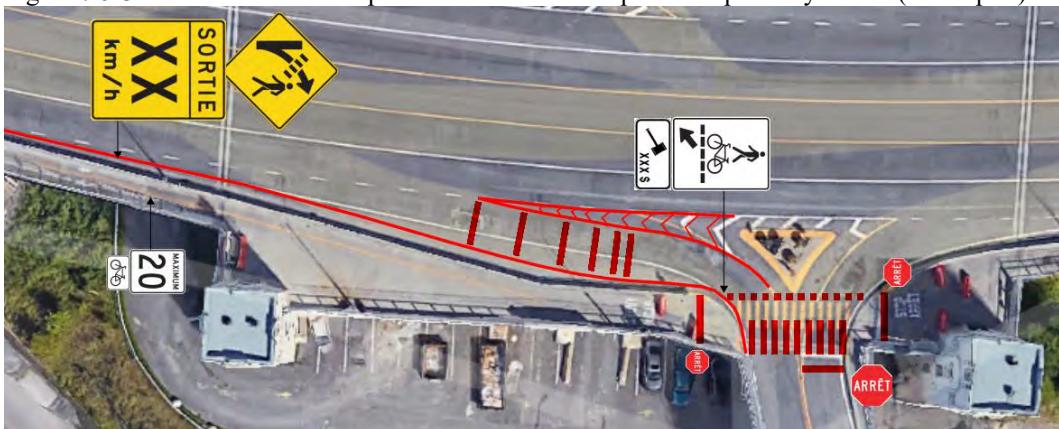


Figure 7.5-4 : Améliorations proposées

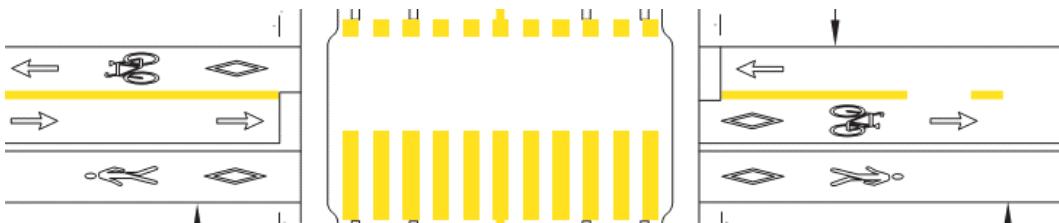


Figure 7.5-5 : Séparation des usagers localement



Figure 7.5-6 : Intersection très chargée : distraction des usagers

7.6 Analyse de risques climatiques

À ce jour, la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier reste fermée pendant la saison hivernale. L'exploitation hivernale potentielle de la piste multifonctionnelle sur le pont est sensible aux conditions de neige et de glace. La température et les autres conditions météorologiques telles que les conditions de neige et les conditions de givrage influent sur l'utilisation de la piste multifonctionnelle.

Une évaluation spécifique de la glace et de la neige sur le site a été effectuée afin d'évaluer la fréquence à laquelle les conditions difficiles peuvent survenir suite à l'utilisation de la piste multifonctionnelle en hiver. À noter cependant que ce n'est pas une évaluation quantitative de risques ; elle a pour objectif d'aider lors de la prise de décision. Cette analyse devrait être achevée avec une stratégie opérationnelle, selon la solution utilisée en cas d'ouverture de la piste multifonctionnelle.

7.6.1 Mécanismes entraînant l'accrétion de glace

L'accumulation de glace, qui entraîne des conditions de roulement très difficiles, peut être définie comme tout processus d'accumulation de glace et d'accumulation de neige sur la surface d'un objet exposé à l'atmosphère (norme ISO-12494). Les propriétés physiques et l'apparence de la glace accumulée varient considérablement selon les variations des conditions météorologiques au cours de la croissance de la glace, voir le Tableau 7.6-1.

Le glaçage atmosphérique est traditionnellement classé selon trois processus de formation différents :

- > Glaçage par précipitation : pluie verglaçante et neige mouillée ;
- > Glaçage par nuage (ou brouillard) : aussi appelé givre / glacis ;
- > Gelée blanche (ou givre de rosée).

La quantité maximale de glace accumulée dépendra de plusieurs facteurs, le plus important étant l'humidité, la température et la durée de l'accumulation de glace. L'un des principaux facteurs qui mènent à une accumulation importante de glace est la dimension et forme de l'objet exposé à la glace et son orientation par rapport à la direction du vent glacial. La plupart des objets exposés sur le pont Jacques-Cartier formeront une couche de glace lors d'un épisode de verglas. Dans certains cas, un objet solide tenu à découvert sur la piste, comme les extrémités de la barrière dissuasive, peut former une couche de glace mesurant deux fois son diamètre ou sa dimension nominale.

Tableau 7.6-1: Paramètres météorologiques contrôlant l'accumulation de la glace

Type de glace	Traduction	Température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)	Vitesse du vent (m/s)	Taille des gouttelettes dans l'air	Teneur en eau	Durée de l'événement	
Glaçage par pluie verglaçante	Freezing rain	-10 < $\text{ta} < 0$	toute	grande	moyenne	heure	
Glaçage par neige précipitation humide	Wet snow	0 < $\text{ta} < +3$	toute	flocons	haute	heures	
Glaçage par nuage	Glacis	Glaze	(*)	(*)	moyenne	haute	heures
Glaçage par nuage	Givre dur	Hard rime	(*)	(*)	moyenne	moyen	jours
Glaçage par nuage	Givre souple	Soft rime	(*)	(*)	petite	faible	jours
Glaçage par nuage	Gelée blanche	Hoarfrost	-	nulle	faible	moyen	heures

(*) Voir Figure 7.6-2

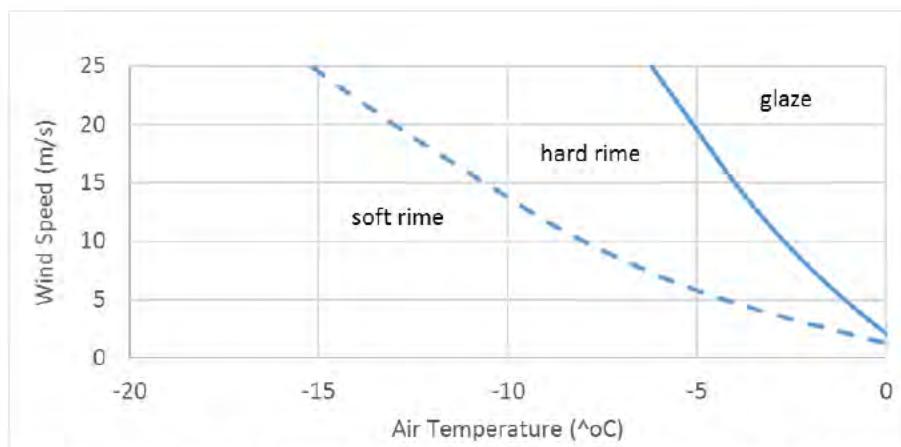


Figure 7.6-2 : types de formations de glace en fonction de la vitesse du vent et de la température de l'air

La fourchette de vitesses de vent et de températures, présentée dans la Figure 7.6-2, recouvre les événements qui pourraient survenir annuellement ou semestriellement sur le pont Jacques-Cartier. Des vents soutenus d'une vitesse dépassant les 25 m/s seraient potentiellement préoccupants puisque ces vitesses pourraient perturber les piétons et les cyclistes.

7.6.1.1 Givrage par précipitation

Le glaçage par précipitation provient de la **pluie verglaçante** ou de la **neige mouillée** qui est dans un état de surfusion, c'est-à-dire de l'eau à l'état liquide qui a une température en dessous de 0°C. Ce dernier état de précipitation est créé par le passage de l'eau à travers une couche atmosphérique plus froide. En frappant les objets pouvant avoir des températures supérieures au gel, la pluie en surfusion forme une mince couche de glace sur la surface. L'accumulation de la neige mouillée peut également former de la glace lors de son contact avec des surfaces froides ou en conjonction avec de la pluie.

Le glacis est le type de glace formé par précipitation ayant la densité la plus élevée. Elle peut être causée par de la **pluie verglaçante**, de la **bruine verglaçante** ou du **givrage humide** dans les nuages (voir la section suivante). Le glacis provoque généralement une accumulation régulière et uniforme de glace et peut être retrouvé sur des objets n'importe où lorsque la pluie ou la bruine se produit à des températures inférieures au point de congélation. La température de surface de la glace en processus d'accrétion est proche du point de congélation et, par conséquent, l'eau liquide qui s'écoule autour de l'objet peut geler.

Cette forme de givrage peut mener à une augmentation de la charge de poids propre que doit supporter la structure. Si le volume de précipitations s'avère être suffisamment important, ceci peut engendrer la formation d'une couche de glace épaisse sur les surfaces exposées du pont Jacques-Cartier, telle que la barrière dissuasive de la piste multifonctionnelle.

7.6.1.2 Glaçage par nuage

Le glaçage par nuage, aussi appelé **givre, brouillard givrant et glacis**, se produit lorsque le brouillard gèle sur des surfaces. Ceci peut être causé par des vitesses de vent élevées et des températures de l'air entre -2 et -8 °C. Les formations de **givre dur** sont difficiles à enlever et ont l'apparence d'un peigne. Le **givre souple** ressemble à des plumes ou à des épines contrairement à la glace pure qui a l'air homogène et transparente. Le givre est la formation la plus courante de glaçage par nuage et crée des structures en forme d'ailettes dans la direction du vent.

Lorsque le flux de gouttelettes d'eau frappant l'objet est inférieur au taux de congélation, chaque gouttelette gèle avant que la gouttelette suivante n'atteigne le même point, et la croissance de la glace est dite « sèche ». Lorsque le flux d'eau augmente, la croissance de la glace a tendance à être humide, parce que les gouttelettes n'ont pas le temps nécessaire pour geler, avant que la prochaine gouttelette ne vienne frapper. En général, le givrage à sec entraîne différents types de givre (contenant des bulles d'air), tandis que le givrage humide forme toujours un glacis (solide et transparent).

7.6.1.3 Gelée blanche

La gelée blanche, qui est due à la transition rapide de l'état de vapeur d'eau à l'état de glace sans passé par l'état liquide, est courante à basse température. Elle est de basse résistance et de faible densité et n'entraîne généralement pas d'accumulation importante de glace ou

de poids propre sur les structures. Ainsi, pour cette évaluation, il est suggéré que la gelée blanche ne soit pas considérée.



Figure 7.6-3 : De gauche à droite - pluie verglaçante, givre et gelée blanche

7.6.2 Données climatiques pour Montréal

Afin de mieux comprendre les effets du climat local sur les conditions météorologiques du pont Jacques-Cartier, une évaluation climatique propre au site a été entreprise.

De larges quantités de données historiques ont été consultées. Celles-ci proviennent des stations météorologiques de la région de Montréal :

- > Aéroport international Trudeau [ID: 716270 94792] (1978 - 1999 / 2006-2017)
- > Saint-Hubert [ID: 716275 99999] (1978 - 1985/1994 - 2017)
- > McTavish [ID: 716120 99999] (1997-2017)

Les trois stations météorologiques entourent le site du projet (voir Figure 7.6-4). Les relevés historiques du vent ont été recueillis auprès du *National Climate Data Centre* et des *Archives nationales d'information et de données climatologiques*, qui conservent les données climatiques et historiques recueillies par la *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*.

La hauteur effective des anémomètres, mesurant la vitesse des vents, est censée être à 10 m. Tous les sites ont des relevés de la vitesse moyenne du vent, des températures ambiantes et du point de rosée, de la pression atmosphérique, de la couverture nuageuse et des précipitations à des intervalles d'une heure en plus des relevés moyens de six heures et 24 heures.

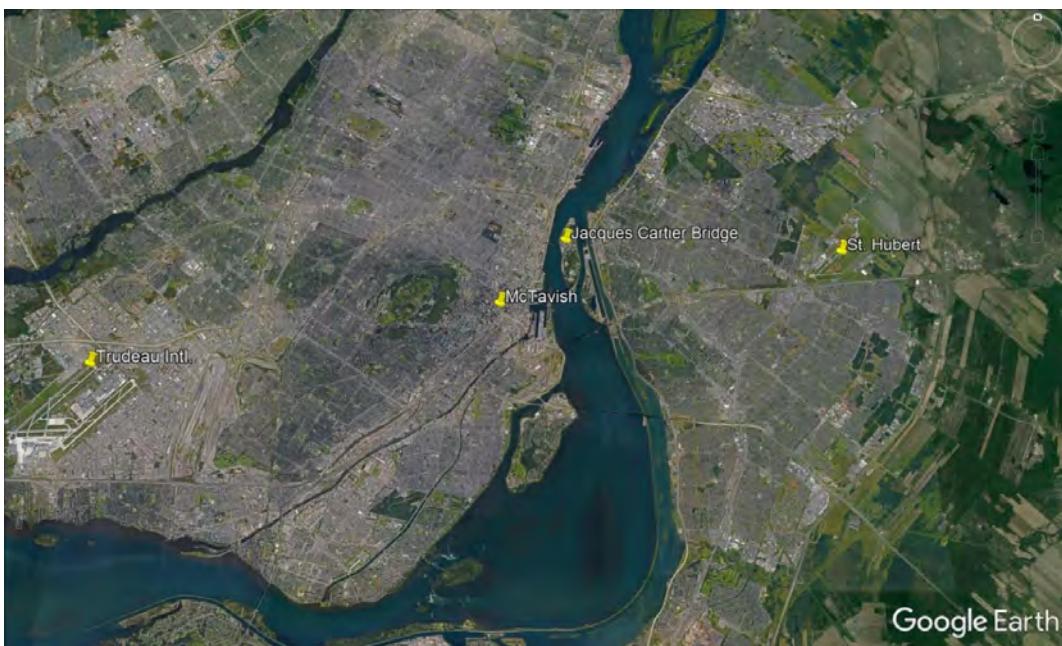


Figure 7.6-4 : Emplacement des stations météorologiques où les données ont été collectés, Google Maps

Suite à la récolte des diverses données météorologiques, ces dernières ont été traitées et analysées. La procédure d'analyse des enregistrements comprenait les éléments suivants :

- > **Qualité des données** : la qualité des mesures a été vérifiée et les enregistrements ont été filtrés ;
- > **Correction de l'exposition** : les enregistrements de données de chaque site de station météorologique ont été transposés au site du pont Jacques-Cartier, en tenant compte de l'altitude, du relief et de la topographie.

Les enregistrements de données ont été filtrés des valeurs aberrantes et des anomalies statistiques. Celles-ci comprennent :

- des vitesses de vent élevées / grandes profondeurs de neige / des températures extrêmes qui n'étaient pas corrélées à un événement substantiel connu ;
- les lacunes dans les données (en raison de failles dans les stations météorologiques), et ;
- les changements de calibration (à la suite d'un changement dans la méthode d'enregistrement des données ou dans la position de la station météorologique par rapport à l'abri).

Le modèle de vent logarithmique de Deaves et Harris pour la couche limite atmosphérique est couramment utilisé et défini par le *Engineering Sciences Data Unit* (ESDU). Il a été utilisé pour évaluer l'effet du terrain sur le vent, localement pour le pont Jacques-Cartier. Une étude détaillée de la rugosité du terrain a été réalisée pour les stations météorologiques de l'aéroport en utilisant des Figures satellites. Les vitesses du vent ont été transposées sur le site du projet en utilisant une procédure d'évaluation du terrain similaire. La longueur de rugosité de surface, z_0 , a été choisie pour être cohérente avec le modèle utilisé dans l'ESDU.

7.6.3 Comparaison avec les stations météorologiques sur le pont

Deux stations météorologiques ont été installées sur le pont le 14 février 2018, côté amont : l'une sur la section 2 (SPJCC-Est) et l'autre sur la section 8 (SPJCC-Ouest). Elles sont, entre autres, dotées de connexion cellulaire, de capteur de viabilité hivernale, de pluviomètre et de panneau solaire, permettant ainsi de collecter, d'analyser et de transmettre des données météorologiques pour générer des alertes et des prévisions.



Figure 7.6-5 : SPJCC-Ouest et SPJCC-Est. Les deux stations sont abritées de certains vents par la structure du pont, la signalisation, les lampadaires et d'autres éléments.

La température, le vent et d'autres enregistrements de données ont été recueillis à partir de la station SPJCC - Ouest et ont été comparés aux données provenant des stations météorologiques aéroportuaires décrites préalablement. Puisqu'il n'existe pas un grand écart entre les données des deux stations, SPJCC - Est n'a pas été abordée directement dans cette section.

Les enregistrements de température montrent généralement une bonne corrélation avec ceux de l'aéroport international Trudeau (voir la Figure 7.6-6). Ceci suggère que le relevé de température de Trudeau pourrait être utilisé pour estimer les conditions historiques sur le pont, prolongeant ainsi notre compréhension des conditions météorologiques jusqu'à des décennies avant que les données soient disponibles auprès de SPJCC - Ouest.

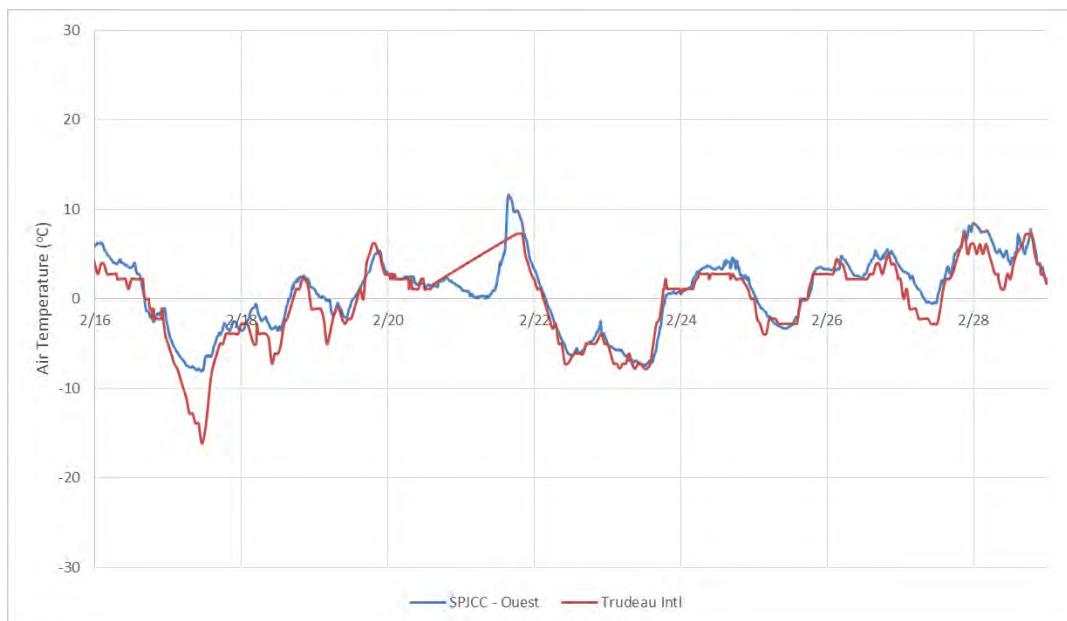


Figure 7.6-6 : Comparaison des enregistrements de température des stations météorologiques de SPJCC - Ouest et de l'aéroport international Trudeau

De même, le relevé des vitesses du vent et des directions du vent de SPJCC - Ouest a été comparé aux données de l'aéroport Trudeau. Les roses des vents indiquent des écarts entre les deux enregistrements de données. Ces résultats suggèrent que l'anémomètre de SPJCC-Ouest est protégé par des grillages autour du portique de signalisation avoisinant et des panneaux qui bloquent presque tous les vents du quadrant nord-est. De plus, l'accélération des vents du sud et du sud-est le long de l'axe du pont est importante. Pour cette analyse, l'historique du vent de l'aéroport international Trudeau a été utilisé pour les évaluations de l'état météorologique.

Pour recueillir des données précises sur le vent à partir du site du pont, une future station météorologique devrait être placée dans une zone non obstruée par la structure du pont ou par d'autres objets. En cas de nécessité, un nouveau site plus approprié doit être identifié afin d'y déplacer une des stations météorologiques existantes.

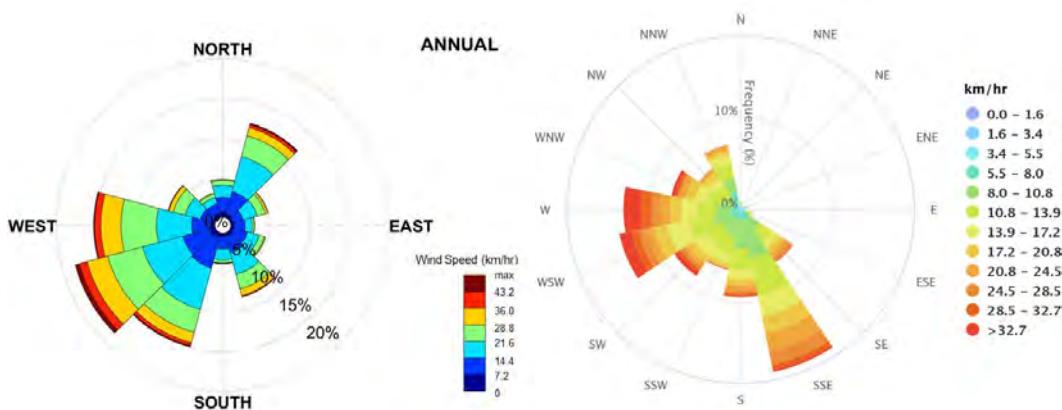


Figure 7.6-7 : Rose des vents de l'aéroport international Trudeau (à gauche) et SPJCC-Ouest (à droite)

7.6.4 Conditions de température

Les températures extrêmes des trois stations météorologiques régionales ont été évaluées. Les températures ambiante minimales annuelles ont été choisies et prises en compte dans une évaluation de la valeur extrême par la méthode de Gumbel. Les températures minimales typiques du site du pont sont indiquées à la Figure 7.6-8. On peut s'attendre à des températures minimales annuelles moyennes d'environ -25,0 °C et à des températures minimales proches de -35,0 °C une fois toutes les dix années environ.

Les « températures ressenties » perçues dans les environnements extérieurs dépendent de facteurs psychologiques, physiologiques et météorologiques qui vont au-delà d'une lecture à température ambiante. Les aspects météorologiques tels que l'exposition au vent et au soleil, la température et l'humidité relative se combinent pour définir la « température ressentie » d'un environnement externe. Une gamme de températures de sensation associées aux températures ambiante minimales est donnée à la Figure 7.6-8 et suppose des conditions d'humidité moyenne et des vitesses de vent allant d'environ 8 à 20 km / h (plus il y a de vent, plus la température ressentie est basse).

La fréquence d'occurrence annuelle typique pour les températures de congélation est présentée dans la Figure 7.6-9. Approximativement 90 jours de l'année auront des températures variant entre 0°C et -15°C. Si ces températures basses sont accompagnées par des précipitations sous forme de pluie verglaçante ou de brouillard givrant, une accumulation de neige pourrait être vraisemblable sur la barrière dissuasive et sur les éléments du pont Jacques-Cartier.

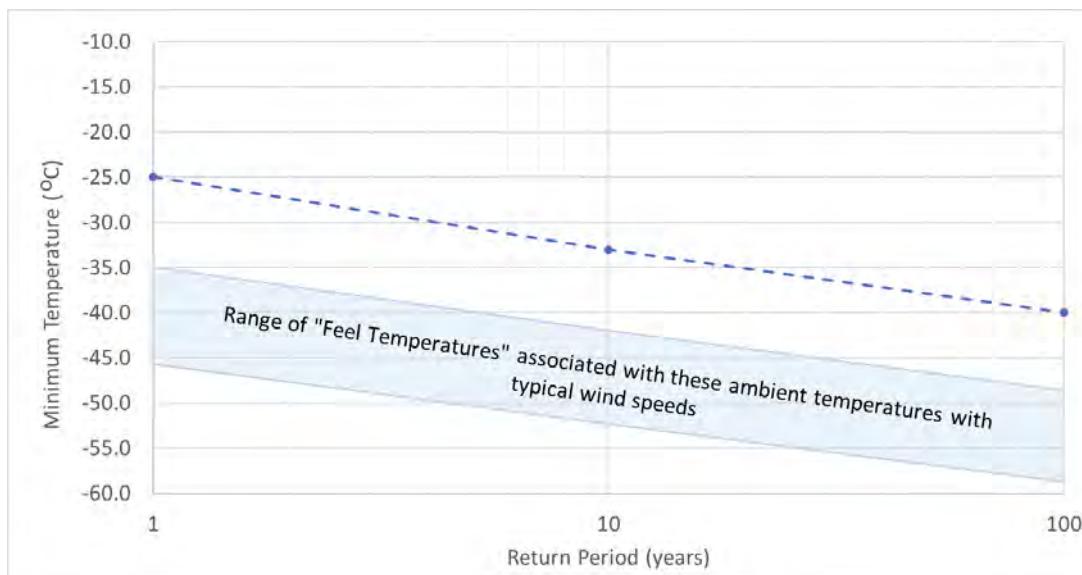


Figure 7.6-8 : Températures minimales extrêmes attendues pour l'hiver selon la période de retour

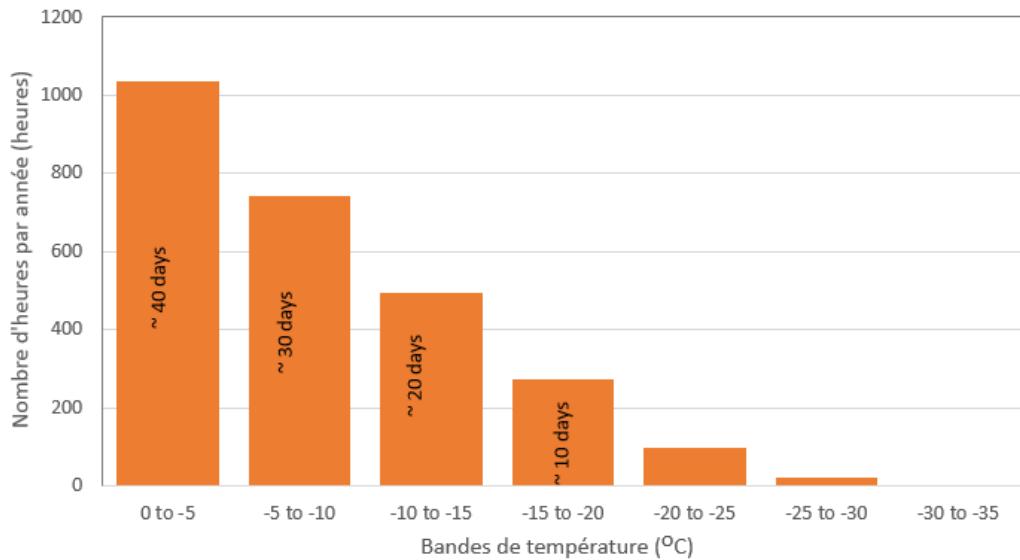


Figure 7.6-9 : Fréquence d'occurrence des températures de congélation

Les données ont été divisées en une évaluation jour et nuit (durée de 24 heures), et une évaluation de jour seulement (définie comme étant la durée entre 8 heures et 19 heures) afin de capturer la variation diurne. On observe que pour les températures de congélation, il existe une probabilité similaire d'observer ces températures à la fois le jour et la nuit.

7.6.5 Conditions de neige

La Figure 7.6-10 montre la variation mensuelle du nombre de jours où l'épaisseur de neige est enregistrée à Montréal, ainsi que l'épaisseur moyenne de neige. Il est à noter que des événements extrêmes avec d'importantes chutes de neige sur une durée de plusieurs jours

entraîneront une épaisseur de neige supérieure aux chiffres indiqués ici. Entre novembre et avril, les chutes de neige se produisent fréquemment.

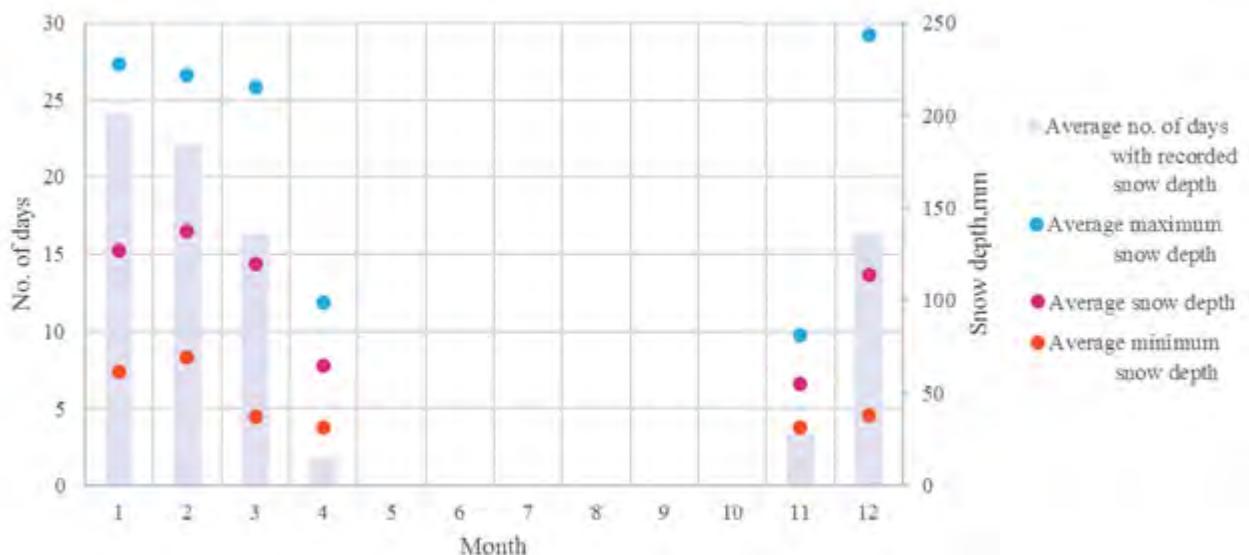


Figure 7.6-10 : Nombre moyen mensuel de jours avec épaisseur de neige enregistrée et épaisseur de neige moyenne

Puisque dans certains cas, les événements de chute de neige ne contiendront qu'une infime quantité de précipitations, il ne sera pas nécessaire de déneiger la piste multifonctionnelle à chacun des événements de précipitation. La Figure 7.6-11 montre la distribution de probabilité d'un événement de chute de neige dépassant des niveaux de précipitations particuliers. Lors de chaque événement de chute de neige, il y a environ 50% de chances que ce dernier entraîne plus de 100 mm de neige.

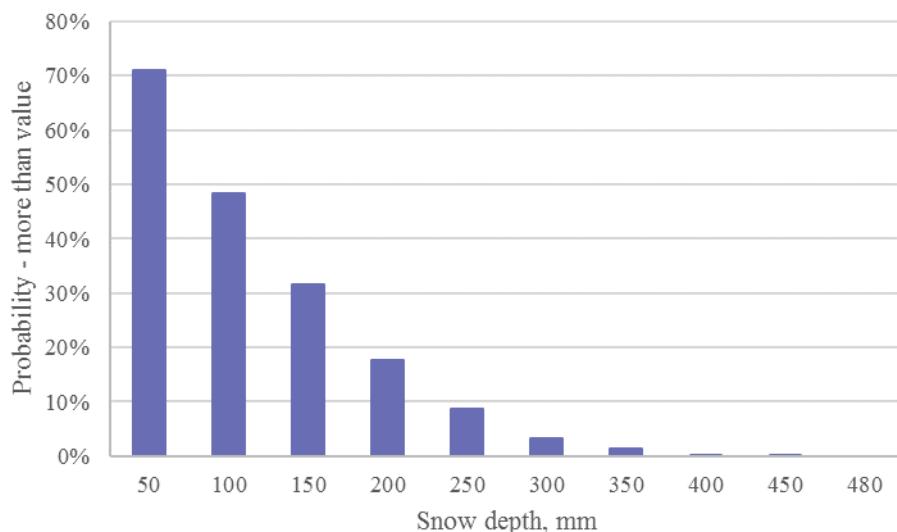


Figure 7.6-11 : Hauteur de neige probable par événement

7.6.6 Conditions de givrage anticipées sur le pont Jacques-Cartier

Le givrage météorologique peut être caractérisé par :

- > La durée du givrage ; et / ou ;
- > Les conditions météorologiques ;

Et seulement dans quelques cas :

- > La quantité totale de glace accumulée sur un objet de référence pendant la durée de l'événement ;
- > Le taux d'accrétion moyen et maximal.

La Figure 7.6-12 montre la fréquence moyenne des différents événements de givrage à Montréal tout au long de l'année. Dans certains cas, plusieurs types de givrage peuvent se produire durant la même journée. Ces événements se déroulent principalement de novembre à mars, mais c'est les mois de décembre à février où le nombre de jours de givrage est le plus élevé.

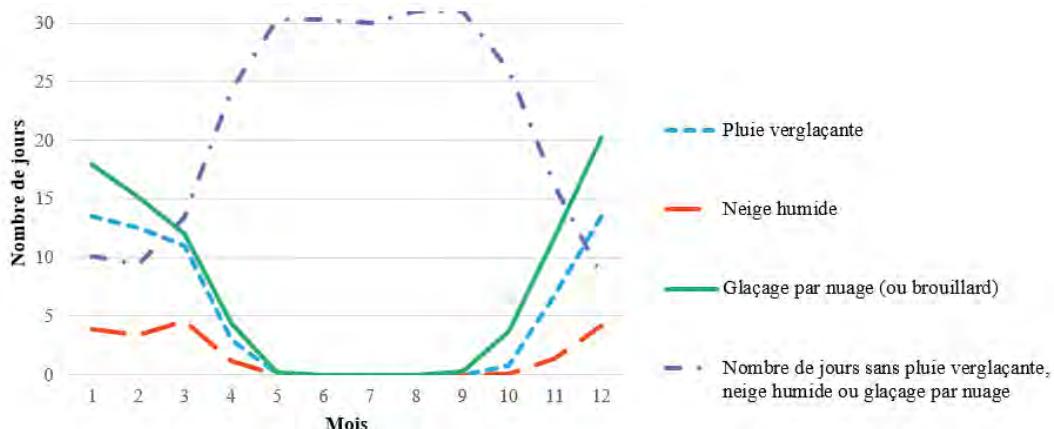


Figure 7.6-12 : Nombre moyen de jours où la pluie verglaçante, la neige mouillée et les épisodes de glaçage par nuage se produisent

Les événements de pluie verglaçante ont été analysés plus en détail afin de comprendre la quantité de précipitations qui tombe pendant ces événements. Ces événements peuvent d'ailleurs entraîner une accumulation de glace subséquente sur les composantes du pont. La Figure 7.6-13 montre la distribution de probabilité de la quantité de précipitations liquides mesurée lors de chaque épisode de pluie verglaçante. Il y a environ 50% de probabilité que la quantité de précipitation liquide durant ces événements de pluie verglaçante soit considérée comme étant à l'état de traces, c'est-à-dire inférieure à environ 2,5 mm.

Lorsque la pluie verglaçante ou la bruine est légère et ne dure pas, la glace formée est mince et ne provoque généralement que des dommages mineurs (entretien des arbres en enlevant les branches mortes, etc.). Cependant, lorsque de grandes quantités de glace s'accumulent sous forme de couche, ceci représente l'un des types de danger hivernal des plus dommageable. Lorsque la couche de glace dépasse environ 5-10 mm, le poids de la glace devient un facteur déterminant dans les dommages qui en résultent ; l'effet devient beaucoup plus évident lorsqu'on observe plusieurs branches d'arbre brisées.

Un autre point à considérer est de savoir si un volume de glace de cette envergure, lorsqu'il se forme sur la barrière dissuasive, pourrait s'avérer distrayant pour les cyclistes lorsque cette même couche de glace se détache et tombe sur l'emprise de la piste. Cependant, cette situation semble peu probable étant donné la faible dimension de blocs de glace formés sur la barrière dissuasive ainsi que la faible hauteur de la chute.

Sur le site du pont, il y a environ 15% de chances qu'un événement de pluie verglaçante entraîne un glacis de plus de 10 mm ainsi que 30% de chances d'entraîner un glacis de plus de 5 mm (voir la Figure 7.6-13). Il est jugé qu'une couche de 10 mm de glace pourrait constituer un danger potentiel aux cyclistes sous-jacents si cette couche devait se détacher. Afin de mitiger ce risque potentiel, il pourrait être envisageable de fermer la piste lorsque cette situation se produit, jusqu'à ce que les conditions redeviennent sécuritaires.

Par conséquent, avec environ 15 jours par mois durant les mois d'hiver où nous avons des conditions climatiques résultantes en conditions de gel sur la piste multifonctionnelle, environ deux jours par mois pourraient recevoir une épaisseur supérieure à 10 mm de glacis sur la structure. Cela se traduit par environ 10 à 15 jours au cours de la saison d'hiver.

En réexaminant la manière dont les morceaux de glace tombent et le danger que ceux-ci représentent, le nombre de jours où les conditions sont jugées non sécuritaires dû à la présence de glace pourrait être réduit. Il est donc recommandé de poursuivre des études afin de bien comprendre comment la glace se détache des diverses parois adjacentes à la piste multifonctionnelle. Cette étude devrait comprendre une analyse des effets du vent lors des événements de chute de glace. Dans certains cas, il serait alors possible de statuer que l'accumulation de glace sur la barrière dissuasive ou la superstructure ne constitue aucun risque pour les cyclistes.

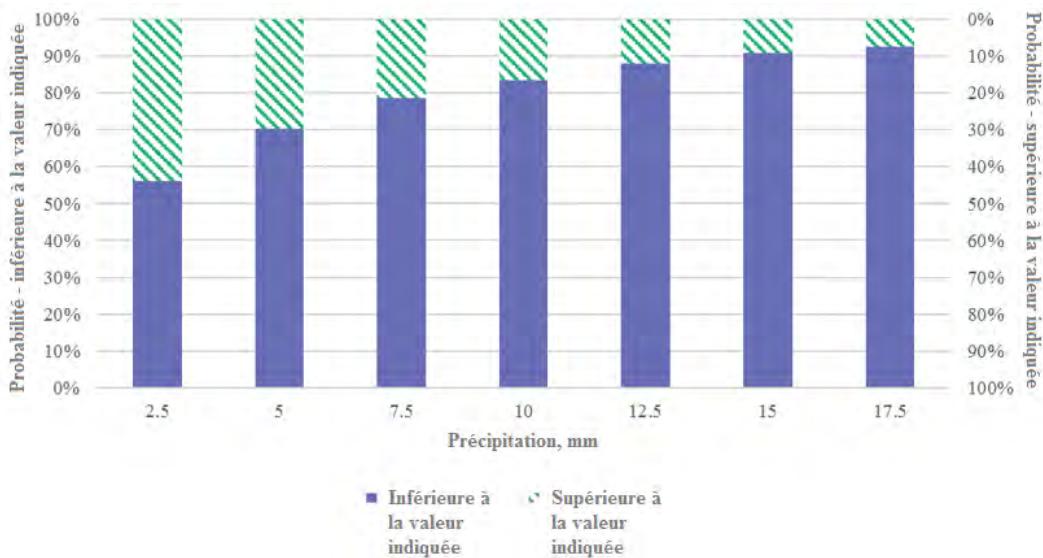


Figure 7.6-13 : Distribution des probabilités des quantités de précipitations liquides mesurées (sur une période de 24 heures) pour les événements de pluie verglaçante

7.6.7 Visites de site

Seize visites sur le chantier ont été effectuées durant la période d'hiver de janvier à mars en 2018. Les dates de ces visites sont reportées sur la Figure 7.6-14 avec des lignes rouges verticales.

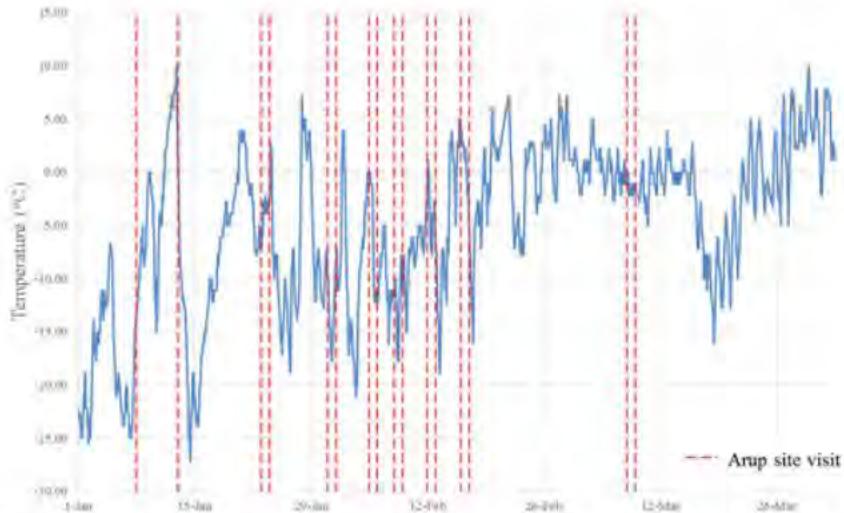


Figure 7.6-14 : Température de l'air en hiver 2018, avec les dates des visites d'Arup sur site

Le tableau 2 indique les dates de ces inspections au chantier et les événements de givrage et de neige enregistrés à l'aéroport international Trudeau ces jours-là. En toutes occasions, des événements de neige ou de givrage ont été enregistrés.

Tableau 7.6-15 : Sommaire des dates d'inspection du site et des événements météorologiques correspondants enregistrés à l'aéroport international Trudeau

Date de l'inspection au chantier	Givrage / événements de neige prévus par les données météorologiques recueillies à l'aéroport international Trudeau	PCP24 enregistré lors d'une pluie verglaçante	Profondeur de neige, mm	Qualité descriptive de la neige enregistrée sur le chantier
Janvier	8 Pluie verglaçante, neige	10	152	"La neige s'est accumulée au cours de plusieurs épisodes neigeux au cours des 2 dernières semaines (températures largement inférieures à -10 °). L'accumulation ainsi que la présence probable de sels (projetés de la route) ont entraîné une forte accumulation de neige abondante sur la piste. "
	13 Pluie verglaçante, neige	23	229	Neige légère (poudreuse)
	23 Pluie verglaçante, neige	22	127	Glace sur la piste, Glace 30mm sur une couche de neige (sandwich de neige)

Date de l'inspection au chantier	Givrage / événements de neige prévus par les données météorologiques recueillies à l'aéroport international Trudeau	PCP24 enregistré lors d'une pluie verglaçante	Profondeur de neige, mm	Qualité descriptive de la neige enregistrée sur le chantier	
Février	24	Pluie verglaçante, neige	21	102	Glace sur la piste, surface de neige, plusieurs parties glacées
	31	Snow	-	102	Neige légère (poudreuse), neige gelée sur le dessus (glace)
	1	Pluie verglaçante, neige	5	102	Bancs de neige
	5	Pluie verglaçante, neige	12	152	Les bancs de neige, la neige lourde (humide), la neige gelée sur le dessus (glace)
	6	Pluie verglaçante, neige	2	152	Neige légère (poudreuse)
	8	Pluie verglaçante, neige	8	229	Neige légère (poudreuse)
	9	Pluie verglaçante, neige	0	229	Neige sale (projections de la route), neige "neige fondante"
	12	Neige humide, pluie verglaçante	3	279	Neige abondante (humide), neige gelée sur le dessus (glace)
	13	Pluie verglaçante, neige	1	279	Neige abondante (humide), neige gelée sur le dessus (glace)
	16	Neige humide, pluie verglaçante	4	178	Neige légère (poudreuse)
	17	Pluie verglaçante, neige	9	203	Neige légère (poudreuse)
Mars	8	Pluie verglaçante	3	-	Neige légère (poudreuse)
	9	Neige humide, pluie verglaçante	5	51	Neige légère (poudreuse)

Lors de chaque visite, les conditions météorologiques et les travaux effectués ont été enregistrés. Certaines de ces conditions ont été résumées dans la dernière colonne du Tableau 7.6-15. Parmi les photos prises lors de ces visites, plusieurs montrent la piste multifonctionnelle après qu'elle a été déneigée, il n'est donc pas possible d'effectuer une comparaison directe entre les prévisions et les conditions observées. Cependant, les données mesurées provenant des stations météorologiques régionales semblent généralement prédictives des conditions sur le pont.

Par exemple, les données météorologiques du 23 janvier auraient prédit avec succès l'accumulation de neige et de glace observée sur le pont ce jour-là, illustrée à la Figure 7.6-16. Ces figures montrent une couche épaisse de glace accumulée sur les éléments du pont. À l'aéroport international Trudeau à cette date-là, les précipitations maximales enregistrées étaient de 22 mm. Les fluctuations de température et précipitations sont démontrées à la Figure 7.6-17 mais restent assez rares : comme le montre la Figure 7.6-13, cette quantité de précipitations est moins fréquente que 7% du temps durant les épisodes de pluie verglaçante. Lors de cette visite, la qualité de la neige a été enregistrée comme suit : « glace 30 mm sur une couche de neige ». Cela montre une bonne corrélation entre les conditions météorologiques enregistrées à l'aéroport international Trudeau et celles observées sur le chantier.



Figure 7.6-16 : Figures prises sur place le 23 janvier 2018

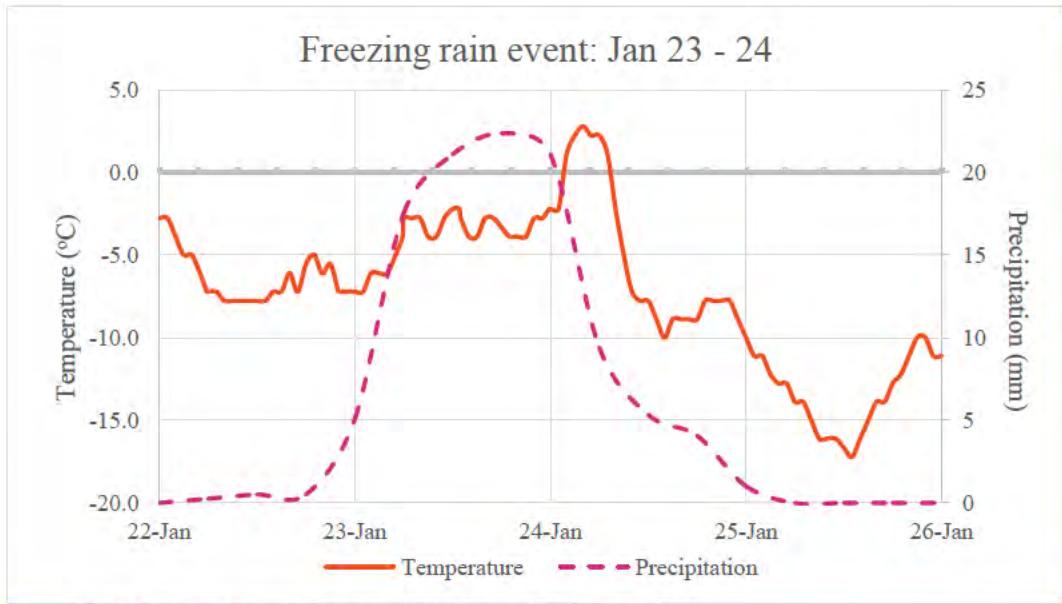


Figure 7.6-17 : Conditions climatiques du 23 au 24 janvier 2018

La Figure 7.6-16 a été prise sur le site le 13 janvier 2018. Au cours de cette visite, une profondeur de neige de 35 cm a été enregistrée. Ceci est supérieur à la profondeur de neige enregistrée à l'aéroport international Trudeau. Cependant, sur la photo, on peut voir que le vent a eu comme effet d'augmenter l'épaisseur de la neige contre la glissière. Le vent et la présence de glissière peuvent être des facteurs importants dans l'amplification des conditions météorologiques hivernales.



Figure 7.6-18 : Figure tirée de la visite du site le 13 janvier. La profondeur de neige mesurée sur le chantier était d'environ 35 cm

7.6.8 Risque appliqué et mesures de mitigation

7.6.8.1 Risque appliqué

Suite à l'identification d'un risque raisonnable lié à la chute de glace, une réflexion probabiliste a été engagée pour mieux saisir ses conséquences possibles :

- > En moyenne, environ 15 personnes meurent chaque année⁵⁷ aux États-Unis à cause de chutes de glace ;
- > Par comparaison, il y a environ 35 000 accidents mortels, dont plus de 800 cyclistes chaque année sur les routes des États-Unis⁵⁸ ;
- > Au Canada, étant donné le climat moins favorable d'une part mais la population beaucoup plus faible d'autre part, nous pouvons extrapoler cette statistique à environ 5 décès par an liés à la chute de glace :
 - o *15 décès sur 325 millions d'habitants (États-Unis) ;*
 - o *Supposant qu'un quart de la population vit dans un climat similaire à celui du Canada, soit 15 décès sur 80 millions ;*
 - o *Supposant que 90% des canadiens (36 millions) vivent dans un climat propice à la formation de glace ;*
 - o *Ainsi nous estimons qu'il y aurait en moyenne 6 décès au Canada liés à la chute de glace.*

⁵⁷ <https://graphs.net/wp-content/uploads/2012/06/death-from-falling-ice-statistics.jpg>

⁵⁸ http://www.pedbikeinfo.org/data/factsheet_crash.cfm

- > Selon les conclusions de la section 7.6.8, les conditions météorologiques qui favorisent la formation de glace seraient présentes seulement 10 à 15 jours par an ;
- > Avec 240 passages par jour sur le pont, sur 15 jours, c'est au total 3600 passages (valeur conservatrice car il y a très peu de trafic sur la piste les jours de tempête) ;
- > Ainsi, en extrapolant, un décès tous les 1600 ans pourrait être estimé au maximum et serait attribuable à une chute de glace sur l'une des personnes ayant emprunté le pont Jacques-Cartier.

Notons aussi que, selon les recherches préliminaires, aucun décès lié aux chutes de glace – généralement provenant des toitures – n'a été recensé à Montréal, malgré la densité de population et le climat. Un seul accident en 2015 est survenu au centre-ville lorsque plusieurs blocs de glace se sont détachés d'un toit de Cinéma ; il y a eu une blessée mineure⁵⁹.

Risques spécifiques aux ponts

Les chutes de glace liées aux ponts se sont révélés problématiques sur quelques rares ponts à travers l'Amérique du Nord. Ces ponts sont tous de type « haubané ».

À Vancouver, les ponts Port-Mann et Alex Fraser ont été le théâtre de chutes de glaces impressionnantes venant de la neige accumulée puis gelée sur les câbles des deux structures. En 2012⁶⁰ puis en 2016⁶¹, la chute de glace a causé de nombreux accidents et la fermeture temporaire du pont Port-Mann durant la tempête.

Ces cas isolés ne reflètent pas la réalité du pont Jacques-Cartier qui ne possède pas de câbles, et dont la structure n'est pas directement au-dessus de la piste cyclable.

À l'exception de la tempête du verglas en 1998⁶² lorsque le pont a dû être fermé temporairement au trafic, aucun accident majeur lié à la chute de glace n'a été recensé sur le pont Jacques Cartier.

Risques liés à l'installation de filets

L'une des mesures envisagées pour réduire le risque de chute de glace sur la piste est l'installation de filets en acier ou nylon au-dessus de la piste. Toutefois cette mesure apporte certains inconvénients et enjeux, notamment :

- > En cas de tempête, l'accumulation de neige ou glace sur le filet peut s'avérer problématique : sous le poids de la neige, le filet pourrait se déformer et entraver la circulation, voire se briser. La présence de neige et de glace additionnelle directement au-dessus de la piste irait dans ce cas à l'encontre du principe de l'installation des filets, c'est-à-dire de protéger les usagers contre la chute de glace.

⁵⁹ <http://www.journaldemontreal.com/2015/01/18/chute-de-glace-au-centre-ville-de-montreal-une-femme-blessee-1>

⁶⁰ <http://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/port-mann-ice-bombs-lawsuit-details-horrifying-experience-1.2651654>

⁶¹ <https://globalnews.ca/news/3108176/windshields-shattered-after-ice-bombs-fall-from-metro-vancouver-bridges/>

⁶² <http://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1076502/crise-verglas-fermeture-ponts-1998>

Quelques cas de bris de filets à cause des intempéries ont d'ailleurs été reportés dans les média⁶³ (voir Figure 7.6-19) ;

- > Certains types de filets, notamment en nylon, ont tendance à retenir l'eau, ce qui augmente leur poids, réduit la durabilité et peut les rendre cassant en cas de gel ;
- > En cas d'incendie sur les voies de circulation, le feu pourrait se propager sur le long des filets sur la piste : ainsi l'utilisation de filets en métal ou, à défaut, ignifugés est nécessaire ;
- > Les filets pourraient de plus être sujet au vandalisme, ce qui pourraient entraîner la fermeture de la piste temporairement ;
- > Les filets pourraient donner accès à certains éléments et accessoires sur le pont ce qui facilite leur vandalisme; les luminaires installés sur la charpente métallique de la section 7 par exemple ;
- > La durabilité réduite de ces filets pourrait entraîner un certain nombre d'interventions qui, au-delà du coût, augmenteraient le nombre d'entraves sur la piste ; en cas de vandalisme ou de forte accumulation de neige sur les filets, des interventions supplémentaires seraient également requises.

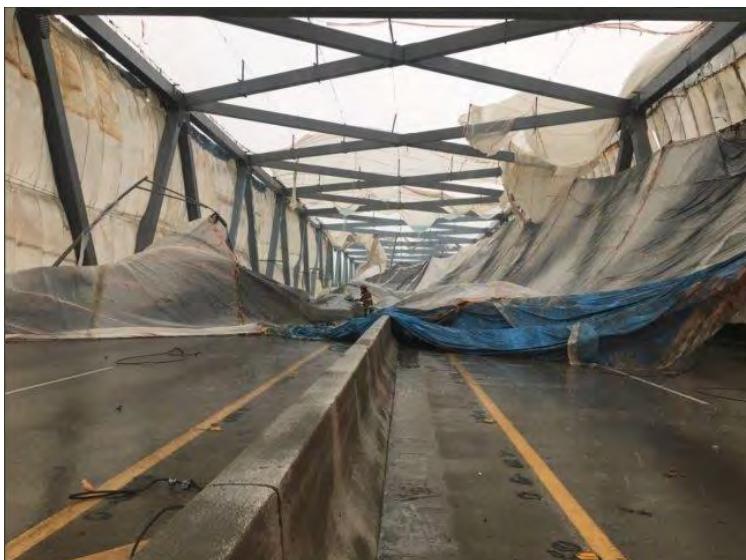


Figure 7.6-19 : Rupture des filets de protection durant une tempête sur le pont I-526 en Caroline du Nord en 2017

7.6.8.2 Mesures de mitigation

Dans le cadre du projet pilote et afin de tester des mesures de mitigation contre les chutes de glace, nous avons envisagé deux types de mesures de protection.

⁶³ <http://counton2.com/2017/07/19/netting-on-don-holt-bridge-falls-commuters-trapped/>

Filets de protection

Malgré les risques liés à l'installation de filets mentionnés ci-dessus et afin de vérifier leur efficacité, une portion de la piste a été couverte dans le cadre du projet pilote. Au niveau de la section 7 et sur une distance de 30 mètres, un filet d'environ 3 mètres de large a été installé, tel que schématisé sur la Figure 7.6-20.

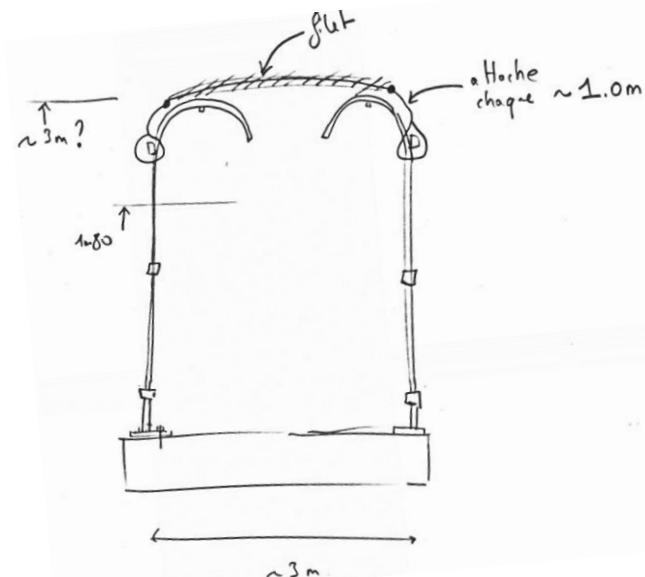


Figure 7.6-20 : Schéma d'installation du filet

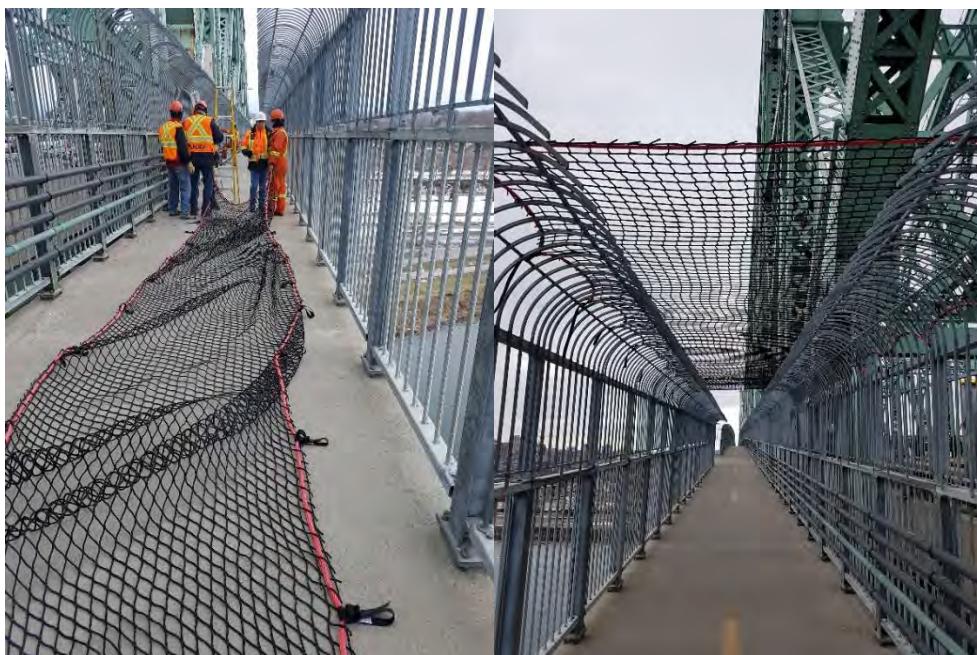


Figure 7.6-21 : Installation du filet dans le cadre du projet pilote

Le choix du type de filet dans le cadre de cette installation a été dicté selon des critères de disponibilité. Tel qu'indiqué précédemment, les filets en acier sont mieux appropriés à ce projet (contre les incendies, le vandalisme, la rétention d'eau et la durabilité).

Cependant, suite à leur installation, les risques de vandalisme et d'escalade ont été jugés trop élevés et ainsi le filet a été retiré.

Surveillance

Une autre série de mesures proposée est basée sur la surveillance et les prévisions météorologiques :

- > En fonction de l'analyse de risques climatiques, certains critères précis peuvent être définis et permettre un suivi en temps réel des prévisions et des conditions météorologiques ;
- > Une surveillance de la piste peut aussi être mise en place, parallèlement à l'inspection des conditions de surface, afin de confirmer les prévisions météorologiques in-situ ;
- > L'installation de caméras pourraient aussi être envisagée à des endroits clefs si celles-ci s'avèrent efficaces ;
- > En fonction du risque de chute, la piste serait alors fermée aux usagers.

Ces mesures sont moins intrusives et facilement intégrables dans le cadre des opérations de déneigement de la piste.

7.6.9 Conclusions

Les études ci-dessus ont démontré qu'il existe un risque raisonnable d'avoir des conditions hivernales sur la piste multifonctionnelle qui pourraient avoir une incidence sur l'utilisation. Dans certains cas, il a été démontré que la pluie verglaçante, la neige mouillée et les épisodes de givrage dans les nuages peuvent créer des conditions préoccupantes pour l'utilisation de la piste multifonctionnelle tant pour les cyclistes que pour les piétons en l'absence de mesures d'atténuation. Basé sur une approche climatique probabiliste, il y aurait environ 10 à 15 jours pendant la saison hivernale où l'on pourrait s'attendre à une accumulation de glace de plus de 10 mm sur les différents éléments en acier qui surplombe la piste multifonctionnelle incluant la charpente métallique aux sections 3 et 7 du pont. Toute chute de neige et de glace provenant de ces éléments peut représenter un risque potentiel pour les usagers de la piste multifonctionnelle, surtout pour ceux qui ne portent pas de casque, bien que les probabilités calculées sont basses.

Il est pertinent de considérer :

- > Une inspection des composants critiques du pont, suite aux événements à haut risque en termes d'accumulation de glace, afin d'identifier le besoin de fermeture de la piste multifonctionnelle ;
- > Une étude plus détaillée sur la façon dont la glace tombe, en fonction du vent et des conditions ambiantes afin d'examiner de manière quantitative le risque de chute de glace et son impact sur les usagers de la piste multifonctionnelle ;

- > Le développement d'une stratégie opérationnelle autour de la surveillance d'événements particuliers sur site ; événements qui pourraient engendrer des conditions dangereuses pour les utilisateurs de pistes cyclables. Cette stratégie opérationnelle se baserait sur quelques paramètres déclencheurs, mesurés sur place par des stations météorologiques existantes ;
- > Un examen de l'emplacement des stations météorologiques afin de réduire ou supprimer les effets d'abris et d'accélération actuellement observés dans les enregistrements ;
- > L'installation de filets de protection n'est pas une solution adéquate à cause de nombreux inconvenients ressortis. En l'absence d'événements observés et répétés pouvant remettre en cause la sécurité des usagers, une approche comprenant l'inspection et la surveillance des conditions sur la piste serait mieux adapté dans le cas présent.

8 Options d'opération hivernale et pratique de gestion

Suite à l'ensemble des études réalisées dans le cadre du présent projet pilote, cette section résume cinq options d'opération hivernales envisageables à court ou moyen terme. Ces options permettent de concilier les besoins en déplacement des usagers et les ressources de PJCCI, et de mieux gérer les risques liés aux intempéries de l'hiver. Par ailleurs, ces options peuvent être combinées au fil des ans afin de procéder par une transition graduelle selon l'expérience et les ressources acquises.

8.1 Description des options

L'ensemble des options d'opération hivernale possibles présenté ci-après fait suite aux observations et études décrites dans les sections précédentes :

1. Statu Quo :

- > Fermeture complète de la piste multifonctionnelle en période hivernale ;
- > Aucune opération de déneigement envisagée, indépendamment de l'heure, de la qualité de surface ou de l'intensité des tempêtes ;
- > Amélioration du niveau de service si on considère aussi la variante avec une navette Vélobus ;
- > Variante(s) applicable(s) : service de navette Vélobus (voir la Section 8.1.2).

2. Déneigement mécanique

L'option 2 « Déneigement mécanique » suppose un déneigement conventionnel de la piste. Dépendamment des ressources, du niveau de service et de risque accepté, plusieurs sous-options sont possibles et sont décrites ci-dessous.

2.1. Ouverture limitée :

- > Ouverture de la piste multifonctionnelle seulement avec des conditions de surface quasi-parfaites, c'est-à-dire similaires aux conditions estivales ;
- > Fermeture de nuit entre 20h00 et 6h00 et fins de semaine, à titre d'exemple ;
- > Fermeture lors des tempêtes, indépendamment de l'intensité des événements ;
- > Déneigement pendant ou après la fin des précipitations ;
- > Fermeture prolongée permise pendant plusieurs jours (voire une ou deux semaines) pour rétablir les conditions de surface quasi-parfaites de la piste ;
- > Variante(s) applicable(s) : service de navette Vélobus (voir la Section 8.1.2) lors des travaux de déneigement.

2.2. Ouverture restreinte : cette option constitue un compromis entre les diverses options d'opération hivernale abordées dans cette section. Des simulations visant

à offrir un aperçu de la durée d'ouverture et de fermeture ont été réalisées pour cette option, voir Section 8.2.

- > Ouverture aussi longtemps que le cumul de neige sur la piste est inférieur à 2 cm (sauf en cas de verglas ou de glace noire) ;
- > Fermeture de nuit entre 20h00 et 6h00, à titre d'exemple ;
- > Fermeture lors de précipitations de plus de 2 cm ;
- > Déneigement pendant ou après la fin des précipitations ;
- > Fermeture prolongée permise pour rétablir l'état de la piste multifonctionnelle (de l'ordre de la journée suivant la fin des précipitations) ;
- > Variante(s) applicable(s) : circulation unidirectionnelle (voir la Section 8.1.1) ; et / ou service de navette Vélobus (voir la Section 8.1.2) lors des travaux de déneigement.

2.3. **Ouverture flexible** : une option similaire à l'ouverture restreinte, mais avec l'apport de quelques améliorations afin d'offrir un meilleur niveau de service aux cyclistes. Des simulations visant à offrir un aperçu de la durée d'ouverture et de fermeture ont été réalisées pour cette option, voir Section 8.2.

- > Ouverture aussi longtemps que le cumul de neige sur la piste est inférieur à 2 cm (sauf en cas de verglas ou de glace noire) ;
- > Fermeture de nuit entre 22h00 et 5h00 à titre d'exemple ;
- > Fermeture lors de précipitations de plus de 2 cm ;
- > Déneigement pendant les précipitations en mode proactif et réactif, afin de réduire la durée des opérations de déneigement ;
- > Ouverture rapide après la fin des précipitations une fois que l'état de la piste multifonctionnelle est rétabli (de l'ordre de quelques heures suivant la fin des précipitations) ;
- > Variante(s) applicable(s) : circulation unidirectionnelle (voir la Section 8.1.1) ; et / ou service de navette Vélobus (voir la Section 8.1.2) lors des travaux de déneigement.

3. **Système combiné de chauffage et déneigement conventionnel** : installation d'un système de chauffage, complémenté par un déneigement mécanique au besoin, afin de pallier aux performances du système de chauffage en cas de tempête importante, ou pour remédier à tout bris ou défaillance du système.

- > Ouverture en continu, sauf en cas de tempêtes d'envergure exceptionnelle ou pendant les opérations de déneigement ;
- > Entretien par méthodes mécaniques combiné avec un système de chauffage, afin d'augmenter la résilience du système mis en place ;

- > Tributaire de la performance du système de chauffage ; une sous-option pourra cibler des sections spécifiques du pont dont l'entretien s'avère plus complexe (changements de pente, zone des chicanes, zone en courbe etc.). Dans cette option, le système de chauffage choisi devra être testé en profondeur durant la première année ;
 - > Installation du système chauffant de forme graduelle ; la première année devra être une année de calibration du système avant son application à grande échelle.
 - > Variante(s) applicable(s) : service de navette Vélobus (voir la Section 8.1.2) lors des travaux de déneigement.
4. **Système de chauffage seul** : dépendance complète d'un système de chauffage. Les particularités de cette option détaillées ci-dessous présupposent une situation idéale, avec un système fonctionnel tout l'hiver. En réalité, il se pourrait que l'efficacité varie fortement ou que le système cesse de fonctionner.
- > Ouverture en continu, sauf en cas de tempêtes d'envergure exceptionnelle ;
 - > Déneigement à l'aide d'un système de chauffage uniquement ;
 - > Niveau de service maximal si on présuppose un cas idéal, avec un système efficace et fonctionnel le long de l'hiver ;
 - > Tributaire de la performance du système de chauffage ; une sous-option pourra cibler des sections spécifiques du pont dont l'entretien s'avère plus complexe (changements de pente, zone des chicanes, zone en courbe etc.). Dans cette option, le système de chauffage choisi devra être testé en profondeur durant l'année de calibration.
 - > Pas de variante applicable.
5. **Options fondamentales** : options requérant beaucoup plus d'investissements et de travaux mais qui pourraient potentiellement réduire les coûts d'opération à long terme. Trois solutions sont considérées suite à une analyse d'opportunité très préliminaire, cependant une étude dédiée à explorer les différentes solutions devrait être envisagée par PJCCI.
- 5.1. Toiture sur la piste multifonctionnelle
 - 5.2. Élargissement de la piste multifonctionnelle
 - 5.3. Déplacement de la piste multifonctionnelle

Le Tableau 8.1-1 ci-dessous résume l'ensemble des options d'opération hivernale afin de mieux comparer leurs particularités (hors options fondamentales, traitées séparément).

Tableau 8.1-1 : Résumé de l'ensemble des options retenues pour l'ouverture de la piste en hiver

Option d'opération hivernale	Jour	Nuit	Précipitations < 2cm	Précipitations > 2cm	Mauvaises conditions de surface	Variante avec Navette	Variante avec circulation unidirectionnelle	Niveau de sécurité relatif	Niveau de service relatif	Ouverture en fin de semaine
1 Statu Quo	fermé	fermé	fermé	fermé	fermé	oui	fermé	pas applicable	1	Non
2.1 Limitée	ouvert	fermé	fermé	fermé	fermé	navette en option	bidirectionnelle	fort	2	Non
2.2 Restreinte	ouvert	fermé	ouvert	fermé	fermé	navette en option	variante : unidir	moyen / fort	3	Non
2.3 Flexible	ouvert	fermé	ouvert	ouverture rapide	fermé	navette en option	variante : unidir	moyen	4	Non
3 Combiné	ouvert	ouvert	ouvert	fermé pendant les déneigements	incertain	navette en option	bidirectionnelle	incertain	5	Potentielle
4 Chauffage seul	ouvert	ouvert	ouvert	ouvert	incertain	pas applicable	bidirectionnelle	incertain	6	Potentielle

Ouverture du trottoir en hiver

En aval, l'ouverture du trottoir aux piétons en hiver est une variante à considérer. La piste serait alors exclusive aux cyclistes et les piétons devraient emprunter le trottoir. La séparation des usagers permettrait notamment d'agrandir la largeur libre pour les cyclistes sur la piste multifonctionnelle, en amont.

Cette variante pourrait être appliquée aux scénarios 2.1, 2.2, 2.3, 3 et 4.

En cas d'ouverture simultanée du trottoir, des points d'accès et des panneaux de signalisation similaires à ceux de la piste multifonctionnelle seraient également requis. D'autres problématiques liées au déneigement du trottoir et à sa largeur utile sont discutées en Sections 3.9 et 2.3.1 respectivement.

Il faut noter que la fermeture du trottoir devra être faite simultanément avec la fermeture de la piste afin d'éviter que les cyclistes se détournent vers le trottoir qui est trop étroit pour eux.

Variantes additionnelles

Les options susmentionnées peuvent aussi être complémentées avec des variantes additionnelles pour améliorer soit le niveau de sécurité, soit le niveau de service. Les variantes étudiées sont la *variante unidirectionnelle* ainsi que la *variante Navette Vélobus*. Elles sont décrites ci-après.

8.1.1 Variante unidirectionnelle

Suite aux contraintes opérationnelles de déneigement (voir la Section 3.1), le dégagement latéral de la piste multifonctionnelle varie fortement, tel que discuté à la Section 3.4.1 du présent rapport. En fonction du résultat des opérations (voir Section 3.7) et notamment en cas de tempête de neige importante, la largeur résiduelle utilisable pour les cyclistes pourrait être inférieure à 1800 mm. De plus, tel que discuté à la Section 2.1 (potentiel d'achalandage hivernal), une très forte majorité de cyclistes utilisent le pont en direction

Montréal le matin et en direction Longueuil le soir. Dès lors, la possibilité de rendre la piste unidirectionnelle en hiver est étudiée.

Cette variante est applicable aux options 2.2 et 2.3.

Description de la variante

En période hivernale, la piste multifonctionnelle pourrait être aménagée en piste unidirectionnelle pendulaire. C'est-à-dire, les cyclistes devront prévoir l'utilisation de la piste de façon unidirectionnelle selon les déplacements pendulaires pour accommoder le mouvement de pointe le plus important ; soit vers Montréal pendant la période de pointe du matin et vers Longueuil pendant la période de pointe de l'après-midi.

Horaire proposé (option 2.3), pour l'ouverture de la piste multifonctionnelle :

- > Entre 5h et 12h : la piste multifonctionnelle est ouverte à sens unique en direction de Montréal ;
- > Entre 12h et 13h : la piste multifonctionnelle est fermée (période tampon) pour permettre le changement de direction et faire l'entretien au besoin ;
- > Entre 13h et 22h : la piste multifonctionnelle est ouverte à sens unique en direction de la Rive-Sud ;
- > Entre 22h et 5h : la piste multifonctionnelle est fermée (période de nuit) pour faire l'entretien et/ou du déneigement ;
- > La piste multifonctionnelle ne serait pas ouverte la fin de semaine.

Panneaux de signalisation restrictive et d'information

Des panneaux d'information doivent être installés à chaque accès/entrée pour informer les usagers du sens de la piste multifonctionnelle. Il y a actuellement cinq (5) accès à la piste multifonctionnelle.

- > Côté Montréal – rue des Confiseurs ;
- > Île Sainte-Hélène – accès pour la piste en direction Montréal ;
- > Île Sainte-Hélène – accès pour la piste en direction Longueuil ;
- > Côté Longueuil – rue Saint-Charles Ouest, par l'escalier ;
- > Côté Longueuil – boulevard La Fayette/Taschereau.

La piste multifonctionnelle est démontrée par la ligne bleue ci-dessous tandis que la ligne rouge indique l'emplacement du trottoir. Les accès sont indiqués par des cercles jaune.



Figure 8.1-2 : Accès à la piste multifonctionnelle (ouest) et au trottoir (est) – Google Maps, modifiée

À Installer en direction de la Rive-Sud**À installer en direction Montréal**

Figure 8.1-3 : Exemples de panneaux d'information à installer à chaque approche/accès



Figure 8.1-4 : Exemples de panneaux de signalisation restrictive à installer sur le pont aux accès de la piste

Note : La dimension des panneaux est à déterminer.

Fermerture nocturne et en fin de semaine

Pour des raisons de sécurité, aucun cycliste ne pourrait utiliser la piste multifonctionnelle lors des opérations de déneigement de la piste. La fermeture de 22h00 à 5h00 proposée pour l'option 2.3 se base sur les horaires typiques de déneigement dans la région de Montréal et correspond aux périodes d'achalandage faible sur la piste du pont (en été), tel que montré dans la Section 2.1 (Potentiel d'achalandage hivernal).

La piste multifonctionnelle ne serait pas non plus ouverte la fin de semaine en raison du faible achalandage attendu : les déplacements piétons et cyclistes en fin de semaine sont récréatifs et rares durant l'hiver.

Ces fermetures permettent une plage horaire plus étendue pour les opérations et l'entretien afin de maximiser la sécurité de la piste.

Barrières automatisées

Des barrières automatisées pourraient être installées à chacun des cinq (5) accès afin de gérer physiquement les fermetures lors du déneigement ou lorsque les conditions climatiques sont difficiles. Elles pourraient être installées aux mêmes endroits que les écrans/PMV. Les barrières, tout comme les écrans/PMV, doivent être contrôlées par le centre de gestion et de contrôle (système intégré). Autrement, la présence de vigiles ou de personnel de sécurité pourrait être considérée pour gérer les points d'accès.

Toutes opérations affectant les cyclistes doivent être communiquées au préalable par les outils de communications établis.

8.1.1.1 Résumé des enjeux liés à l'exploitation unidirectionnelle de la piste

Avantages

- > L'exploitation unidirectionnelle aide à mieux gérer les risques reliés à la sécurité des usagers en cas de croisement des cyclistes ;
- > L'exploitation unidirectionnelle aide à maximiser les plages d'ouverture suite aux opérations rapides (largeur dégagée nécessaire est réduite) ;
- > L'exploitation unidirectionnelle répond en partie aux normes de sécurité pour les nouvelles structures en termes de largeur en fournissant le minimum requis de 2,5 mètres, voir la Section 7.1 ;
- > L'exploitation unidirectionnelle répond aux attentes des cyclistes habitant sur la Rive-Sud qui travaillent à Montréal.

Inconvénients

- > Incohérence avec l'ouverture estivale bidirectionnelle ;
- > Risque de non-respect de la signalisation en place (cyclistes qui circulent en contre sens) ;
- > Risque d'augmentation de la vitesse des usagers (perception de sécurité, voir Section 7.2) ;
- > Nécessite un plan de communication rigoureux et en temps réel avec les usagers ;
- > Répond partiellement aux attentes des usagers. Le pendulaire favorise seulement les cyclistes habitant sur la Rive-Sud qui travaillent à Montréal ;
- > Coûts reliés à la navette VéloBus (optionnelle)

8.1.2 Variante navette VéloBus



Figure 8.1-5 : Service de navette VéloBus

La présente variante propose d'offrir le service de navette VéloBus. Celle-ci serait applicable à toutes les options, à l'exception de l'option 4. Avec les options de déneigement mécanique, soit la 2.1, 2.2, et 2.3 (ainsi que l'option 3 en partie), le service de navette VéloBus pourrait être offert sur demande pendant la fermeture de la piste en cas de tempêtes et de travaux de déneigement ou pour complémer une ouverture unidirectionnelle. En cas de fermeture imprévue au cours de la journée à cause d'une tempête majeure ou autre force majeure, le VéloBus transporterait les cyclistes d'un point à l'autre, leur permettant ainsi de compléter leurs trajets en hiver.

Le VéloBus pourrait être actif dans les deux directions, ou une seule dans le cas de la variante unidirectionnelle si celle-ci est mise en service. Un horaire similaire à celui du projet pilote 2017-2018 pourrait être considéré :

- > Un service de navette aller-retour, toutes les 20 minutes en heures de pointe, entre le terminus de Longueuil et le métro Papineau. La fréquence pourrait être évaluée et optimisée. Il faut noter que les heures de pointe ici correspondent aux horaires durant lesquels les vélos ne sont pas autorisés à bord des rames de métro : du lundi au vendredi, entre 05h30 et 10h00, et entre 15h00 et 19h00.
- > Les vélos seront transportés à l'intérieur de l'autobus et devront être immobilisés de manière sécuritaire ;
- > Il est important de noter le manque de panneaux pour indiquer l'emplacement des arrêts de la navette VéloBus. Il faut s'assurer de bien indiquer l'emplacement des arrêts à l'aide d'une signalisation permanente ;
- > Les emplacements pourront être évalués et déplacés au besoin ;

Il faut noter quelques points importants liés à l'utilisation du service de navette VéloBus durant le projet pilote 2017-2018 :

- > Le service de navette VéloBus a été accepté dans le cadre du projet pilote mais une proposition visant à prolonger le service de VéloBus devra être abordée avec le RTL ;
- > Un maximum de 10 vélos peut être accueilli à bord ;
- > Les tandems, remorques ou autres accessoires du même type sont interdits ;
- > La tarification en vigueur au RTL s'applique ;

- > Pendant l'hiver 2017-18, l'arrêt du VéloBus à Montréal se situait au nord du boulevard de Maisonneuve (entre Cartier et Dorion), soit en face du métro Papineau. À Longueuil, l'arrêt du VéloBus se situait au terminus Longueuil, à l'Aile F (porte 41).

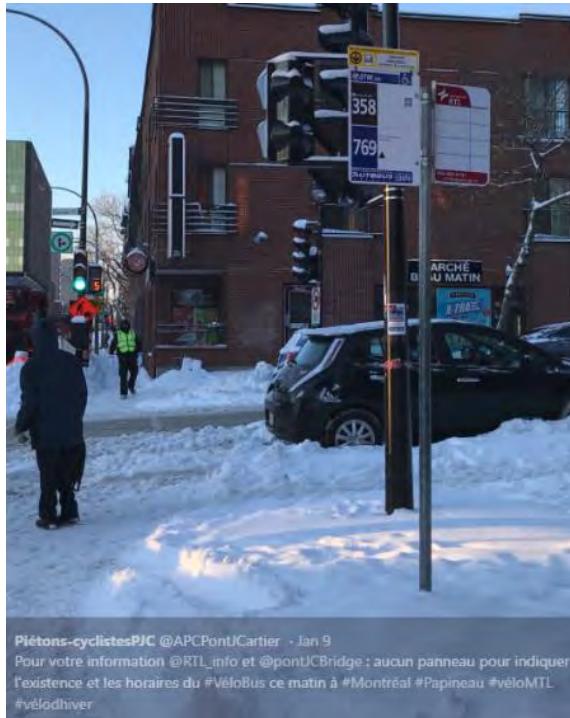


Figure 8.1-6 : Manque de panneaux pour indiquer l'arrêt et l'heure du VéloBus lors du projet pilote 2017-2018



Figure 8.1-7 : Exemples de panneaux à installer pour acheminer les usagers vers les arrêts VéloBus

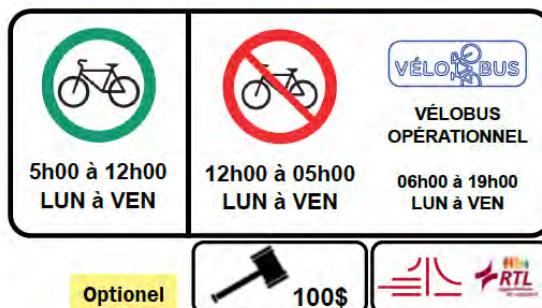
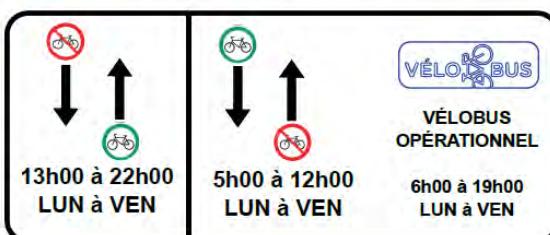
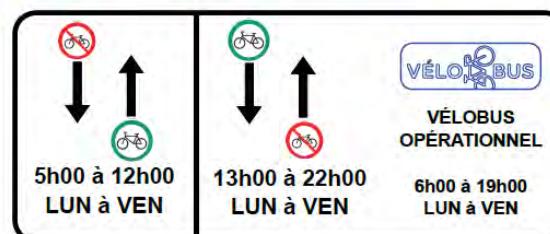
À installer en direction de la Rive-Sud**À installer en direction de Montréal****À installer en direction de la Rive-Sud****À installer en direction de Montréal**

Figure 8.1-8 : Exemples de panneaux à installer à l'entrée du pont, dans le cas d'une combinaison entre les variantes unidirectionnelles et navette Vélobus

8.2 Simulation des opérations hivernales sur une saison

8.2.1 Profils des hivers précédents

Afin de mieux anticiper les temps de fermeture liés aux tempêtes hivernales et aux opérations de déneigement qui suivent, des simulations sur la durée des travaux ont été réalisées pour les hivers 2016-17 et 2017-18. Des données météorologiques et statistiques, telles que le cumul de neige et de verglas ainsi que la durée des précipitations, ont été traitées pour en créer un profil hivernal, comme le montre la Figure 8.2-1. Ces deux profils démontrent la fréquence et le niveau d'intensité (cumul et durée des précipitations) des tempêtes hivernales qui se sont produites au cours de l'hiver 2016-17 et celui de 2017-18. En fonctions des résultats présentés, tous les événements ont ensuite été classés par catégories : soit comme une tempête majeure, moyenne ou mineure. Ainsi, le nombre total d'heures de fermeture peut être estimé pour les deux hivers et une décision en toute connaissance de cause pourra être prise.

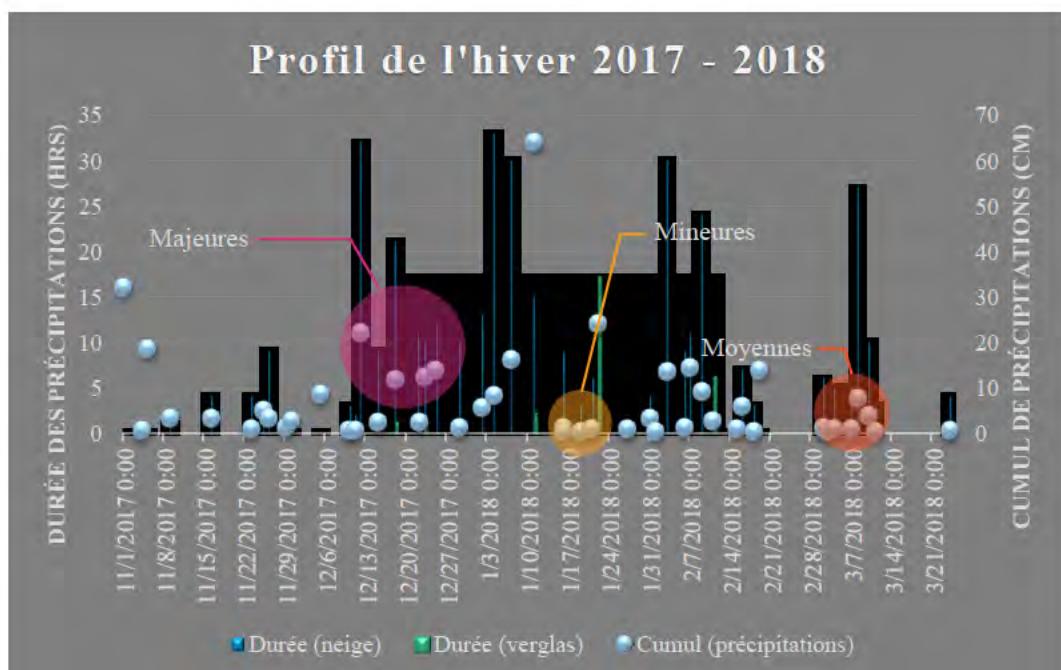
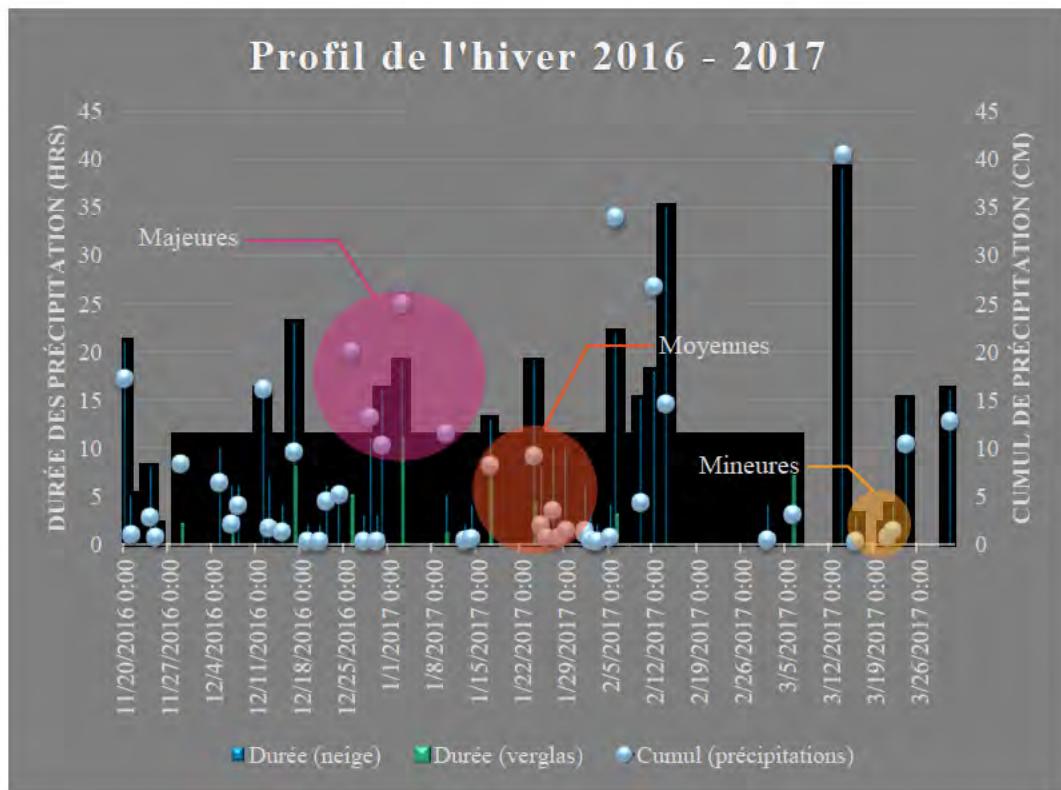


Figure 8.2-1 : profil de l'hiver 2016-17 et de l'hiver 2017-18, avec exemples de tempêtes majeures, moyennes et mineures

Le tableau suivant offre un aperçu de l'hiver 2016-17 et celui de 2017-18 en quelques chiffres :

Tableau 8.2-2 : résumé du nombre d'événements des hivers 2016-17 et 2017-18

Événements \ Hiver	2016-2017		2017-2018	
	Tempêtes majeures	11	Tempêtes moyennes	8
Tempêtes moyennes	8		12	
Tempêtes mineures	23		17	
Total	42		37	

8.2.2 Méthodologie, critères et hypothèses

En premier lieu, chaque événement hivernal a été regroupé en trois catégories différentes : tempêtes majeures, moyennes et mineures. Ensuite, la durée des opérations de déneigement a été estimée pour chaque catégorie de tempête. Ces estimations, basées sur la durée moyenne des travaux effectués lors du projet pilote (soit l'hiver 2017-18) ainsi que les critères de catégorisation sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8.2-3 : Durée moyenne des travaux (en heures) effectués lors du projet pilote

Événement / catégorie	Critère de catégorisation	Durée moyenne des travaux (heures)	Période tampon	Durée totale anticipée durant une ouverture restreinte (avec facteur de correction)	Durée totale anticipée durant une ouverture flexible
Majeure	Au-delà de 10 cm	21	8	35	29
Moyenne	Entre 2 - 10 cm ; Durée de plus de 10 heures	11	4	17	15
Mineure	En dessous de 2 cm	Épandage de produits sans déneigement	0	0	0

Étant donné que le déneigement de la section 2 à 5 représente 35% de la longueur du pont, les estimations présentées dans le Tableau 8.2-3 ont été extrapolées aux fins de la présente simulation. En adoptant une approche relativement conservatrice lors de cette analyse, un facteur de 1.2 a été considéré afin de tenir compte de la géométrie complexe de certaines sections du pont, des inconnues liées aux prévisions météo et du temps de déploiement des ressources. À noter qu'un autre facteur de 1.2 a également été appliqué au scénario d'ouverture restreinte afin de prendre en compte le manque d'expertise potentiel pendant les premières années d'ouverture. Puisque cette simulation se base sur des chiffres provenant des essais effectués dans un cadre de projet pilote, une optimisation future des opérations de déneigement selon une connaissance acquise au fil des années pourrait réduire davantage les durées estimées. De plus, une des hypothèses de cette analyse présume que les tempêtes mineures ne requièrent aucune opération de déneigement et ne nécessitent que l'application de produits de déglaçage. En réalité, quelques heures devront être allouées pour mobiliser une équipe.

Dans le cadre de cette analyse, deux options d'opération hivernale ont été étudiées : une ouverture restreinte (option 2.2) et une ouverture flexible (option 2.3), telle que décrite dans la Section 8.1. Les particularités et caractéristiques des deux options, ainsi que les hypothèses de simulation, sont les suivantes :

Tableau 8.2-4 : Options d'opération hivernale à l'étude et hypothèses de simulation

Option	Fermeture / ouverture de la piste			Hypothèses de simulation
	Nuit	Jour	Conditions défavorables	
Ouverture restreinte	Fermée (entre 20 h 00 et 6 h 00)	Ouverte	Fermée	Les opérations de déneigement commencent toujours après la fin d'une tempête. Afin de simuler le cas le plus défavorable, on a aussi supposé que les travaux auraient eu lieu durant les heures d'ouverture et non pendant les heures de fermeture (nuit).
Ouverture flexible	Fermée (entre 22 h 00 et 5 h 00)	Ouverte	Variable	Chaque tempête a été analysée cas par cas afin de maximiser les temps d'ouverture. Dans la mesure du possible, les travaux ont été reportés ou ont débuté pendant les tempêtes pour que ces derniers s'achèvent plus tôt. Dans certains cas, les opérations de déneigement se sont complétées vers la fin d'une tempête, permettant ainsi l'ouverture de la piste multifonctionnelle tout de suite après.

Les deux options à l'étude sont illustrées dans les figures suivantes (représentatives des cas typiques seulement ; pour plus d'informations, veuillez consulter les hypothèses de simulation) :



Figure 8.2-5 : Graphique représentatif de l'ouverture restreinte

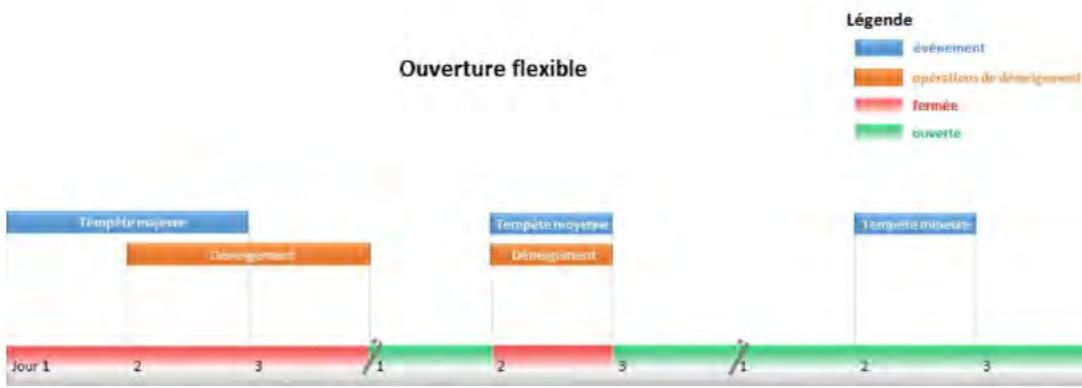


Figure 8.2-6 : Graphique représentatif de l'ouverture flexible

8.2.3 Résultats de la simulation

Si les mêmes critères d'intervention que ceux employés lors du projet pilote avaient été implantés pendant l'hiver 2016-17, les périodes d'ouverture ressembleraient au cas suivant :

Tableau 8.2-7 : Périodes d'ouverture pour l'hiver 2016-2017

Hiver 2016-17	Ouverture restreinte	Ouverture flexible
Durée de l'hiver (h)	3149	
Jour (ouverture) / nuit (fermeture)	1845 (59%) / 1304 (41%)	2231 (71%) / 918 (29%)
Période éligible à l'ouverture (h)	1845	2231
Durée des événements (h)	$381 \times 0,59 = 225$ (jour) $381 \times 0,41 = 156$ (nuit)	$381 \times 0,71 = 271$ (jour) $381 \times 0,29 = 110$ (nuit)
Opérations de déneigement la nuit (h)	0	ND
Opérations de déneigement le jour (h)	609	285
Plage de fermeture (h)	$1304 + 225 + 609 = 2138$	$918 + 271 + 285 = 1474$
Plage d'ouverture (h)	$3149 - 2138 = 1011$	$3149 - 1474 = 1675$
% ouverture / hiver	32%	53%
% ouverture / heures éligibles	55%	75%

Par comparaison, en se basant sur la période hivernale 2017-18, les résultats suivants ont été obtenus :

Tableau 8.2-8 : Périodes d'ouverture pour l'hiver 2017-2018

Hiver 2016-17	Ouverture restreinte	Ouverture flexible
Durée de l'hiver (h)	3553	
Jour (ouverture) / nuit (fermeture)	2074 (58%) / 1479 (42%)	2517 (71%) / 1036 (29%)
Période éligible à l'ouverture (h)	2074	2517
Durée des événements (h)	$327 \times 0,58 = 190$ (jour) $327 \times 0,42 = 137$ (nuit)	$327 \times 0,71 = 232$ (jour) $327 \times 0,29 = 95$ (nuit)
Opérations de déneigement la nuit (h)	0	ND
Opérations de déneigement le jour (h)	609	352
Plage de fermeture (h)	$1479 + 190 + 609 = 2278$	$1036 + 232 + 352 = 1620$
Plage d'ouverture (h)	$3553 - 2278 = 1275$	$3553 - 1620 = 1933$
% ouverture / hiver	35%	54%
% ouverture / heures éligibles	61%	77%

À partir de ces résultats, on peut noter que :

- > Le pourcentage que constituent les heures d'ouverture par rapport aux heures éligibles varie grandement entre les deux options d'opération hivernale, soit une différence d'environ 16-29% ;
- > Les heures d'ouverture pour l'hiver 2017-18 auraient été relativement plus longues en raison du déroulement, voire de la succession, des tempêtes ainsi que leurs durées ;
- > Les heures de travail requises pendant la période hivernale (période de déneigement pendant les heures d'ouverture) varient entre les années et options d'opération hivernale. Ces chiffres permettent néanmoins d'anticiper, de manière générale, les ressources et les heures requises pour les années à venir.

8.3 Opportunités à long terme

8.3.1 Général

Au cours des années à venir, le pont Jacques-Cartier pourrait potentiellement être en mesure d'incorporer d'autres solutions afin d'améliorer l'expérience cycliste et piétonnière, sans pour autant se limiter à l'amélioration des conditions de cyclisme hivernal. Il serait pertinent que la planification du maintien hivernal de la piste multifonctionnelle soit bien alignée avec la stratégie future de gestion et opération de l'actif. Ainsi, différentes options d'amélioration à long terme sont présentées comme suit :

Option 1 : Toiture sur la piste multifonctionnelle

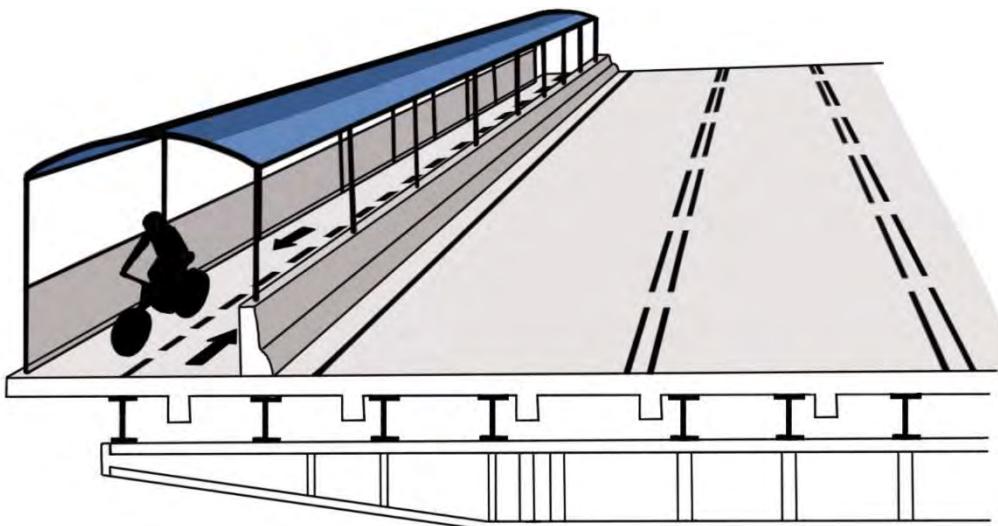


Figure 8.3-1 : Toiture sur la piste multifonctionnelle

La couverture de la piste multifonctionnelle a pour objectif de réduire, voire éliminer, les opérations de déneigement nécessaires en conditions hivernales. Cette solution pourrait être combinée avec l'élargissement de la piste multifonctionnelle présenté ci-dessous. Des trois options à long terme considérées, il s'agit de la seule envisageable sur la piste dans sa configuration actuelle.

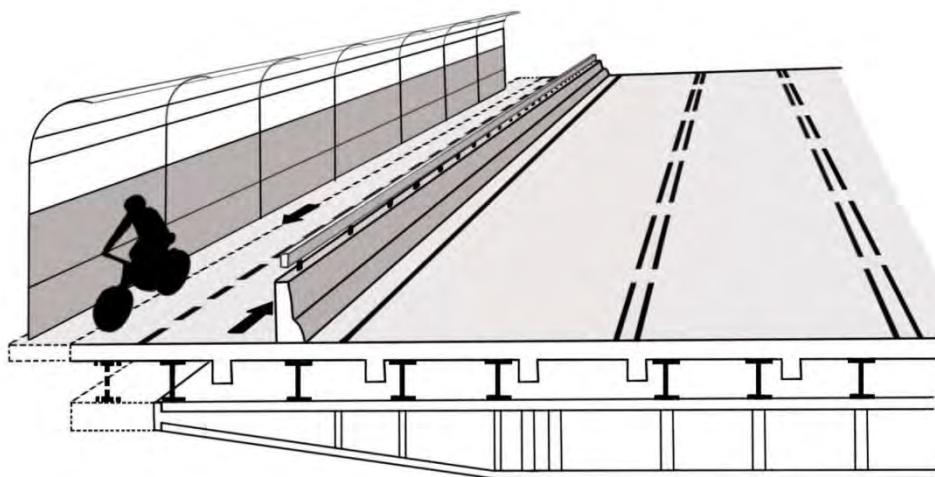
Option 2 : Élargissement de la piste multifonctionnelle

Figure 8.3-2 : Élargissement de la piste multifonctionnelle

L'objectif principal de l'idée d'élargissement de la piste du pont Jacques-Cartier est de se conformer aux exigences des normes au niveau de la largeur utile requise et par conséquent adopter une circulation bidirectionnelle en conditions hivernales. Cependant, il faut étudier la faisabilité structurale de cette solution.

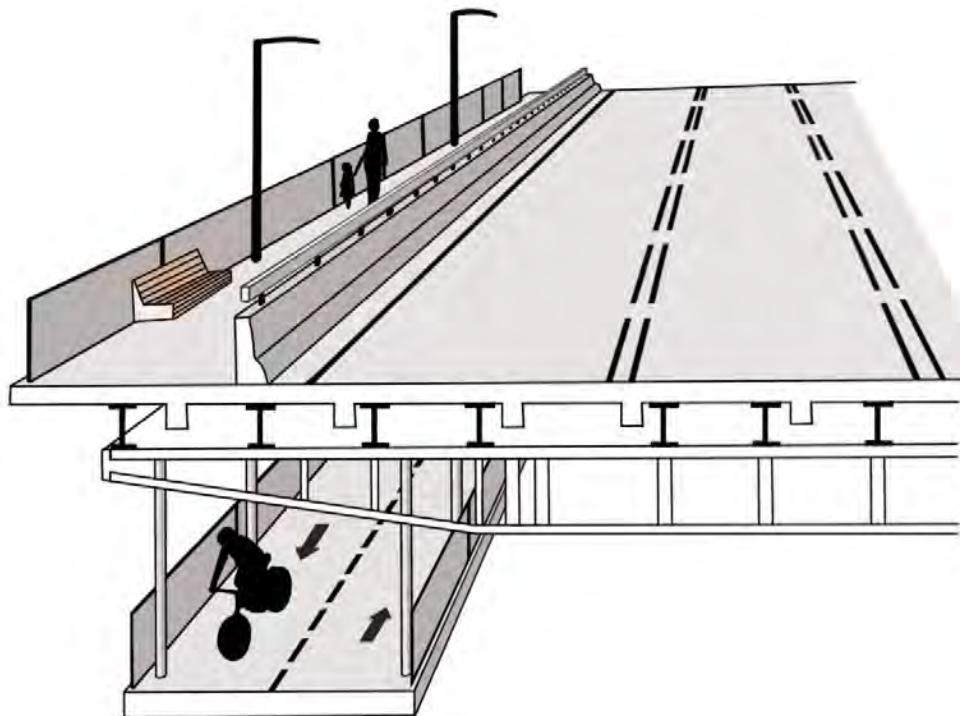
Option 3 : Déplacement de la piste multifonctionnelle

Figure 8.3-3 : Déplacement de la piste multifonctionnelle

Une autre option serait le déplacement de la piste multifonctionnelle en dessous du tablier du pont Jacques-Cartier. Cette option devrait éliminer le besoin d'effectuer des opérations de déneigement en hiver mais la présence de rafales pourrait mener à une légère accumulation de neige sur la piste, requérant ainsi un déneigement mécanique. Une construction selon les exigences des normes pourrait être envisagée.

Le tableau ci-dessous résume les avantages, les inconvénients et les considérations associés aux options susmentionnées :

Tableau 8.3-9 : Comparaison des opportunités à long terme

Piste d'amélioration	Avantages	Inconvénients	Considérations / travaux
Toiture sur la piste multifonctionnelle	<ul style="list-style-type: none"> Diminution de la dépendance envers les opérations d'entretien en hiver, et entraîne une réduction des coûts associés à celles-ci Augmentation du confort des cyclistes 	<ul style="list-style-type: none"> Création potentielle de turbulences, dues aux charges additionnelles imposées par le vent Interruptions requises durant les travaux d'aménagement Susceptibilité au vandalisme Création d'une zone plus confinée => Sentiment d'inconfort chez certains cyclistes 	<ul style="list-style-type: none"> Étude de la capacité de la superstructure requise Augmentation incertaine de la sécurité des cyclistes (à moins d'être combiné avec l'élargissement de la piste) Évaluation de l'impact sur l'aspect esthétique du pont requise
Élargissement de la piste multifonctionnelle	<ul style="list-style-type: none"> Conformité aux normes réglementaires sur la conception des pistes cyclables Augmentation de la sécurité des cyclistes, en été comme en hiver, en leur offrant plus d'espace pour manœuvrer Possibilité d'effectuer les opérations de déneigement pendant le passage des cyclistes 	<ul style="list-style-type: none"> Plusieurs interruptions requises durant les travaux d'aménagement Difficulté d'élargir la dalle d'un point de vue structurale (envisager son remplacement) Besoins en opérations de déneigement toujours présents en hiver 	<ul style="list-style-type: none"> Étude de la capacité structurale du pont requise
Déplacement de la piste multifonctionnelle en dessous du tablier actuel	<ul style="list-style-type: none"> Quasi-élimination des opérations d'entretien en hiver, réduisant ainsi les coûts opérationnels Possibilité d'élargir la piste multifonctionnelle ou de rajouter des voies de circulation Augmentation de la sécurité des cyclistes en leur offrant plus d'espace pour manœuvrer (si la piste est élargie) Possibilité d'utiliser la piste existante pour améliorer l'expérience des usagers (ex. aires de repos, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> Projet d'envergure et coûteux Considération du dégagement vertical (particulièrement au niveau de la voie navigable) 	<ul style="list-style-type: none"> Étude de faisabilité plus approfondie requise (ex. vérifier le dégagement) Étude de la capacité structurale des fondations requise

8.3.2 Détails supplémentaires pour l'option « toiture »

Tous les détails fournis ici ne sont qu'un exemple parmi les solutions qui pourraient être envisagées pour couvrir la piste ; certaines hypothèses ont été faites afin de mieux étudier la faisabilité d'un tel projet. Des études plus spécifiques sont requises afin de confirmer la viabilité de cette option pour la piste du pont Jacques-Cartier.

Quelques exemples de ponts couverts sont illustrés sur les photos suivantes :



Figure 8.3-4 : Pont Goodwill à Brisbane, Australie, conçu par Arup



Figure 8.3-5 : Pont Kurilpa à Brisbane, Australie



Figure 8.3-6 : Pont « Go Between » à Brisbane, Australie

8.3.2.1 Caractéristiques de la toiture proposée :

- Une toiture en verre et acier serait préférable pour des raisons esthétiques et pour fournir une luminosité suffisante aux usagers ;
- En largeur, la toiture couvrirait l'ensemble de la piste et même au-delà pour assurer une protection accrue contre les précipitations ;
- Des déflecteurs en verre ou en acier, en porte-à-faux pourraient aussi être ajoutés afin de mieux protéger la piste des intempéries, dépendamment des résultats en soufflerie, ou in situ, voir la Figure 8.3-7 ;
- Du côté intérieur, côté circulation routière, une barrière en verre de faible hauteur pourrait réduire les projections potentielles venant de la route, et rehausser la hauteur de la glissière selon les normes les plus récentes ;
- La structure serait appuyée de part et d'autre de la piste, au même endroit que les garde-corps existants afin de ne pas réduire la largeur libre ;
- La toiture serait à une hauteur entre 2,5 et 3,0 mètres au-dessus de la piste ;
- Une pente de la toiture permettrait l'écoulement vers l'intérieur du pont ;
- Pour une meilleure intégration architecturale avec la toiture, le remplacement des garde-corps et des clôtures dissuasives serait préférable. Ceci faciliterait l'installation et constituerait une opportunité supplémentaire pour valoriser la piste du pont Jacques-Cartier ;

- Les garde-corps dissuasifs pourraient être aussi constitués d'acier et de verre afin de réduire la quantité de neige soufflée, et afin d'apporter luminosité et esthétique. Une hauteur de 1,55m est conseillée afin de les rendre infranchissables ; telle que la conception utilisée pour le Pont Bessières à Lausanne, Suisse, et qui semble démontrer son efficacité, voir Figure 8.3-9. Ce concept pourrait être combiné avec un éclairage discret plus homogène afin d'améliorer l'expérience des usagers la nuit ;

Voici quelques exemples et concepts de toitures applicables à la piste :



Figure 8.3-7 : Exemple de déflecteurs en verre - Vertal-AGC[©]



Figure 8.3-8 : Pont Bell's à Glasgow, Écosse, réhabilité en 2013 par Arup



Figure 8.3-9 : Promenade couverte Twinfix® installée à l'aéroport John Lennon, Liverpool, Royaume-Uni

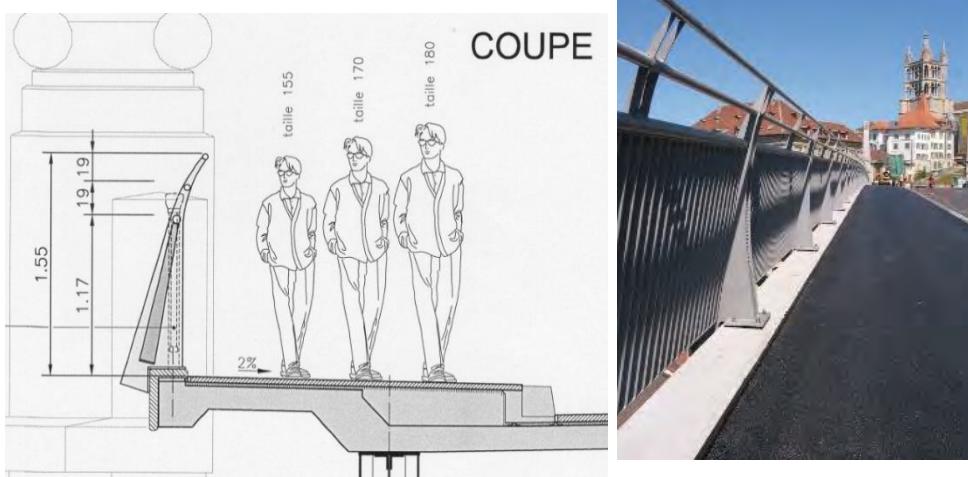


Figure 8.3-910 : Barrière dissuasive installée sur le pont Bessière à Lausanne, Suisse

8.3.2.2 Avantages apportés par la toiture

- + Réduction de la quantité de neige ou verglas accumulée sur la piste - la toiture doit toutefois faire l'objet de tests ou d'analyses spécifiques afin d'en confirmer son efficacité ;
- + Réduction du nombre d'entraves sur la piste causées par le déneigement ;
- + Protection des usagers contre la chute de glace depuis la superstructure - il faut cependant noter que le risque associé à de telles chutes est faible, tel que discuté dans la section 7.6;
- + Opportunité d'améliorer l'expérience des usagers ainsi que l'aspect esthétique de la piste.

8.3.2.3 Enjeux et risques

Enjeux importants :

- Investissement initial (CAPEX): à l'aide projets semblables et en fonction de la quantité de matériaux et de manutention requise pour une telle installation, les coûts d'investissement initial sont estimés plus de 15 millions ;
- Renforcement de la structure (CAPEX): il est relativement difficile d'estimer l'ampleur des renforcements nécessaires de la structure à ce stade, toutefois ces investissements pourraient être facilement du même ordre de grandeur que les investissements requis pour la toiture seule ;
- Opérations de déneigement (OPEX): bien que les quantités de précipitation accumulées sur la piste seront plus faibles qu'actuellement (une réduction estimée entre 25% et 75%), un déneigement minimal sera toujours requis ; étant acquis qu'une majeure portion des dépenses annuelles en déneigement sont des dépenses fixes, il est possible que les économies financières seraient faibles tout dépendamment des exigences contractuelles et des modalités de paiement ;
- Nettoyage (OPEX): d'expérience sur d'autres projets de toiture, la présence d'une toiture empêche la pluie de nettoyer les débris qui s'accumulent sur la piste en été. Ainsi un nettoyage plus fréquent de la piste sera requis en période estivale ;
- Entretien (OPEX): l'entretien de la toiture peut représenter jusqu'à 1% des coûts d'investissements, annuellement, c'est-à-dire approximativement 150 000\$;
- Durée des travaux de construction: avec deux équipes de travail en parallèle, supposant un avancement de 20 mètres par semaine et des horaires de travail qui minimisent les entraves de la piste (travaux de nuit principalement en été et quand la météo le permet en hiver), il sera requis entre 2 et 5 ans de travaux, hors conception, études et tests ;
- Entraves : la piste devra être fermée durant les travaux d'installation de la toiture qui auront lieu préféablement de nuit, et durant tout entretien de la piste ou de la toiture. L'optimisation de ces entraves devra être considérée dès la phase de planification du projet ;
- Efficacité de la toiture : la toiture doit faire l'objet de tests ou d'analyses spécifiques afin d'en confirmer son efficacité à réduire l'accumulation de neige sur la piste ; des analyses poussées et/ou des tests in situ lors d'un projet pilote pourraient être nécessaires ; tel que présenté à la Figure 8.3-10, malgré une protection sur plusieurs côtés, le vent a soufflé d'importantes quantités de neige à l'intérieur d'un abribus ;
- Comportement de la toiture sous le vent : des analyses voire des tests en soufflerie pourraient être aussi nécessaires afin d'estimer les charges additionnelles de vent sur le pont causées par la toiture ;
- Effet « Tunnel » sur les usagers: une couverture de la piste pourra donner un sentiment de confinement selon la perception de certains usagers. Une structure en verre est une solution acceptable afin réduire cet effet.



Figure 8.3-10 : Abribus durant une tempête à Montréal, La Presse Canadienne

Enjeux secondaires :

- L'éclairage nocturne de la toiture doit être réalisé en intégration avec le projet de *Mise en Lumière* du pont Jacques-Cartier ;
- La sécurité des usagers, notamment du point de vue de la largeur de la piste et la vitesse des cyclistes, reste inchangée malgré l'installation d'une toiture ;
- Il est pertinent d'adopter un concept qui permet une bonne ventilation durant les jours les plus chauds de l'été ;
- La conception devra s'assurer de ne pas créer un risque additionnel causé par la chute de glace depuis la toiture sur les voitures avoisinantes, ou en bas du pont sur des voies de circulation ;
- L'accès et la maintenance seront plus difficiles autant pour la toiture que pour la structure du pont en général; notamment lors des travaux sur la structure d'acier sur les sections 3 et 7 du pont.

8.3.2.4 Exemples existants pour une application similaire

Des projets de toiture similaires n'ont pas été répertoriés lors de notre recherche, c'est-à-dire pour protéger contre les précipitations hivernales, sur un projet de l'envergure du pont Jacques-Cartier. La ville d'Ottawa est connue pour ses innombrables passerelles piétonnes couvertes, toutefois, ces structures sont indépendantes (non intégrés sur un pont existant), de courte longueur (moins que 200 mètres), et entièrement fermées (toiture et baies vitrées latérales).

Bien qu'une passerelle entièrement fermée soit la seule conception qui assure une protection totale aux intempéries, une fermeture complète de la structure est généralement mieux adaptée entre deux lieux fermés et implique d'importants problèmes de ventilation, notamment en été.

De plus, dans le cas du pont Jacques-Cartier, l'intégration esthétique d'une passerelle entièrement fermée serait délicate ; à cela il faut aussi considérer le côté touristique de la piste, notamment en été, dont la vue panoramique serait fortement affectée par la présence de vitres. Une telle structure serait aussi beaucoup plus coûteuse, ajouterait davantage de charges de vent et de poids propre et pourrait rendre difficile tout accès à la piste en cas d'urgence.

8.3.2.5 Conclusion

Tel qu'indiqué, l'installation d'une passerelle entièrement fermée n'est pas réalisable. L'installation d'une toiture seule, à l'inverse, ne pourra protéger entièrement la piste des intempéries. Plusieurs études seront nécessaires afin de confirmer l'efficacité et l'applicabilité d'une telle solution pour le cas du pont Jacques-Cartier. Malgré certains avantages de cette solution (réduction des interventions et des opérations en hiver et protection contre la chute de glace), il serait pertinent de considérer les différents enjeux liés à l'installation d'une toiture, surtout en ce qui a trait de l'effet du vent, les entraves, l'entretien de la toiture et la complexité de mise en œuvre. En outre, une analyse coûts-bénéfices serait nécessaire afin de justifier les investissements reliés au projet.

8.4 Pratique mondiale pour l'entretien hivernal des pistes cyclables

Une évaluation des divers modes de gestion de pistes cyclables en hiver a été effectuée dans le cadre de ce projet pilote, en s'inspirant de l'expérience acquise dans d'autres pays. Une attention particulière a été portée aux villes nordiques avec lesquelles la ville de Montréal peut tirer plusieurs parallèles, notamment au niveau des températures extrêmes ressenties en hiver ainsi qu'au niveau du nombre croissant de cyclistes. Bien que cette section ne traite pas exclusivement les pistes cyclables et multifonctionnelles se trouvant sur des ponts, les réflexions tirées de cette évaluation, qui sont abordées de manière plus détaillée dans la section 8.4.2, restent applicables pour le cas du pont Jacques-Cartier. Un survol des pratiques de déneigement et de gestion des pistes cyclables en hiver est présenté dans cette section à travers d'études de cas qui figurent ci-dessous^{64 65 66}:

8.4.1 Études de cas

8.4.1.1 En Finlande

En Finlande, les facteurs déclencheurs en entretien hivernal dépendent de la caractérisation de la surface et du niveau d'adhérence. Pour chaque catégorie, une condition de surface type et une plage de coefficients de frottement sont ciblées. En général, les agences finlandaises chargées de l'entretien hivernal du réseau routier et cyclable tolèrent un coefficient de frottement entre 0,15 et 0,25 sur les pistes multifonctionnelles. Une fois en dessous de ces valeurs cibles, les opérations de déneigement sont enclenchées afin de rétablir un niveau d'adhérence et un état de surface acceptables. Un résumé des critères d'acceptabilité, tels qu'ils sont définis par les normes finlandaises, est présenté dans la Figure 8.4-1.

⁶⁴ International Federation of Municipal Engineering, IFME (1999) Best practice in winter maintenance, 31 pages

⁶⁵ Päättalo, M. (1999) Better Winter Maintenance by prioritizing Case Järvenpää, 27 pages

⁶⁶ Katko, K., "Goals and Methods of Winter Maintenance in Finland." Transportation Research Record, No. 1387 (1993) 4 pages.

TABLE 1 Maintenance Classifications

Class	Traffic Volume (ADT)	Length (%)
I Super Divided (Freeways)	0.6	
I Super	6,000 or more	2.1
I	1,500 to 6,000	11.0
II	200 to 1,500	42.4
III	Less than 200	40.6
IV	(Pedestrian and bicycle paths)	3.3

NOTE: ADT = average daily traffic.

TABLE 3 Target Condition Values and Cycle Times by Maintenance Class

Maintenance Class	Target Condition		Cycle Times (hr)	
	Day	Night	Deicing	Snow Removal
ISD, IS	4	4	2	2.5
I	4	3	2	3
II	3	2	4	4
III	2	1	6	6
IV	2	2	4	4

NOTE: ISD = I Super Divided, IS = I Super.

TABLE 2 Definition of Condition Standards

Quality class variable	Target Value	1	2	3	4	5
VARIABLE I, SLIPPERY CONDITION						
- Skid number	0,00-0,15	0,00-0,15	0,25-0,30	0,30-0,45	0,45-0,10	
- Road surface	Very icy driving or otherwise	Dry ice or snow path	Coarse ice or snow path in cold weather	Bare and wet or paths	Bare and dry between traffic ruts	
- Texture	very slippery					

Figure 8.4-1 : résumé des critères d'acceptabilité selon les normes finlandaises

La ville de Järvenpää, ayant récemment adopté une nouvelle façon de gérer le déneigement de son réseau routier et cyclable, fournit des indications intéressantes pour un entretien hivernal optimal. Anciennement, les opérations de déneigement étaient enclenchées suite à une accumulation de neige de plus de 5 cm. La planification et l'exécution des travaux liés au déneigement s'effectuaient avant l'heure de pointe, c.-à-d. 07h00 et 16h00. Dès l'annonce d'une tempête de neige importante, des opérations de sablage étaient effectuées sur les réseaux des pistes cyclables. Enfin, le nettoyage des pistes était généralement prévu pour le 1er mai afin d'enlever le sable et la poussière restants.

L'amélioration principale apportée à la gestion du déneigement des rues et des pistes se résume par un système de priorisation. Le déneigement des routes et des pistes cyclables est maintenant divisé en trois catégories (A, B et C), la catégorie A étant au plus haut niveau et celle qui comprend les routes principales, comme le montre le Tableau 8.4-2. La catégorie B comprend les pistes cyclables et les trottoirs jugés prioritaires tandis que la catégorie C inclut les sentiers moins empruntés dans des quartiers résidentiels ou dans des parcs. À noter également que la Finlande a depuis cessé de répandre le sel gemme à état solide sur les routes, optant plutôt pour des produits de déglaçage liquides ou ceux qui sont dilués afin de réduire la concentration de sel utilisé. Environ 150 g abrasifs par mètre carré, ayant une granulométrie entre 2 à 5,6 mm, complètent les opérations de déneigement et une approche antigivrage est adoptée en vue de tempêtes plus extrêmes.

Tableau 8.4-2 : résumé des facteurs déclencheurs établis par la ville de Järvenpää

	Ploughing starts after	Maximum	Anti-skid treatment (Prevention of slipperiness)	Sand and dust brushing and washing
Class A	3 cm snow	Maximum bumpiness 3 cm	Starts when weather or weather forecast indicates slipperiness. Done before 7 am.	1st
Class B	5 cm snow	Maximum bumpiness 5 cm.	When needed.	Before 1st of May
Class C	After class B	Maximum bumpiness 5 cm.		

Classes A and B ploughing is done in 4 hours after is needed. Ploughing is done before 7 am when snowing during night.

In class C ploughing is done in 6 hours. Ploughing is done before 10 am.

8.4.1.2 En Islande

La capitale de l'Islande, Reykjavik, fait également usage d'un système de priorisation afin d'optimiser le déneigement du réseau routier et cyclable. En particulier, les pistes cyclables jugées prioritaires font partie de la dernière catégorie principale, le G(1a) tandis que les pistes moins empruntées se font accordées moins de ressources (voir le Tableau 8.4-3). Par conséquent, la ville prévoit normalement une ouverture qui dure de 07h00 à 18h00 en essayant de compléter les opérations de déneigement entre 04h00 et 07h30.

De façon générale, la prise de décision ainsi que la planification des travaux peuvent durer une heure environ, tandis que la durée de la phase d'exécution peut varier entre 4 – 5 heures. Une accumulation de neige de plus de 2 cm enclenche le déneigement des rues et des pistes les plus empruntées alors qu'une accumulation de 5 - 7 cm sert d'indication pour les rues et pistes moins populaires. La ville de Reykjavik utilise principalement un produit de déglaçage à base de chlorure de sodium pour déneiger les routes principales et du sable ayant une granulométrie entre 2 et 8 mm pour les sites moins empruntés.

Tableau 8.4-3 : résumé des facteurs déclencheurs établis par la ville de Reykjavik

Priority	Service time All day	Action time hrs.	Clearing time hrs.	First action / snow thickness cm	Max snow depth cm	Limited view. day
1	04 - 22	0,5	2	2	5	1
2	07 - 22	1,0	3	5	10	1
3	08 - 21	1,5	3	7	12	1
4	08 - 21				15	
B	08 - 17					
G1a	07 - 18	1,0	5/4			
G1	08 - 18	1,0	5/4			
G2	12 - 18	1,0	10/8			
G3	Within 24 hrs.					
G4	Clearing is later.					

8.4.1.3 En Suède

En Suède, les facteurs déclencheurs se basent sur l'accumulation et la qualité de neige mais varie parmi les différentes municipalités. À titre d'exemple, le déneigement débute suite à un cumul de neige de plus de 2 cm sur les trottoirs et escaliers, 3 cm pour les pistes cyclables et 4 cm pour les routes. Une douzaine de municipalités déverse la neige dans des cours d'eau mais la durée de validité des permis, étant souvent très courte, les force à faire plusieurs demandes ou renouvellements. Le pays se tourne désormais vers le recyclage, en encourageant les industries et les commerces à faire usage de la neige récoltée autant que possible pour des applications de refroidissement.

De façon générale, les contrats de déneigement stipulent qu'une inspection du trajet devrait se faire au préalable par l'entrepreneur. Entre autres, l'entrepreneur est responsable d'identifier et de documenter, par GPS et photographie, toute complexité opérationnelle qui puisse survenir et d'inclure ces éventualités dans sa proposition. Par la suite, la municipalité sélectionne l'entrepreneur après avoir examiné toutes les difficultés liées au déneigement. Enfin, les villes suédoises soulignent l'importance d'une communication efficace, tant à l'interne qu'à l'externe, et d'une collaboration étroite entre les différentes parties prenantes afin d'optimiser les opérations de déneigement.

Depuis récemment, le pays expérimente en utilisant un mélange de sable chauffé et humidifié juste avant l'application et qui gèle immédiatement au contact avec le sol froid, ce qui augmente le niveau d'adhérence. Toutefois, cette option reste susceptible aux changements de température et peut générer une fine brume de poussière. Entretemps, la Suède considère d'autres solutions telles que des mélanges à base de sel et de glucose ou des systèmes de chauffage géothermiques.

8.4.1.4 Au Canada

La ville d'Ottawa, se basant autrefois sur son propre guide d'entretien hivernal qui regroupait douze municipalités, suit désormais les normes plus strictes établies par la province d'Ontario. En particulier, la ville tolère une accumulation d'environ 5 cm de neige sur les pistes cyclables officielles, comme le montre le Tableau 8.4-4. Une fois cette limite dépassée, les ressources sont déployées et la ville se donne une durée d'environ 12 heures pour rétablir une condition de surface acceptable mais seuls les trottoirs adjacents aux routes artérielles sont complètement déneigés ; la neige est compactée au bord de la route ou piste sur les autres sites tels que les pistes cyclables et multifonctionnelles. Par conséquent, les pistes cyclables sont parfois ouvertes aux usagers malgré la présence d'une couche de neige (ex. si l'accumulation de neige sur le sol n'atteint pas 5 cm), comme la Figure 8.4-5 le démontre. Un réseau informatique de prévisions météo et des capteurs à infra-rouge montés sur des véhicules servent à plus précisément identifier le niveau de ressources requis avant chaque tempête.

Tableau 8.4-4 : résumé des facteurs déclencheurs établis par la province d'Ontario

Sidewalk/ Pathway Maintenance Classification		Minimum Depth of Snow Accumulation for Deployment of Resources	Time to Clear Snow Accumulation From the End of Snow Accumulation or Time to Treat Icy Conditions	Treatment Standard	
				Bare Surface	Snow Packed
1	<ul style="list-style-type: none"> • Downtown business district • Byward Market • large employment centres • special tourism areas 	2.5 cm	4 h	✓	
2	<ul style="list-style-type: none"> • downtown/urban residential neighbourhoods where sidewalks are only safe place to walk • sidewalks in Villages • pathways that serve as main community links or to access transit services • sidewalks along roads with transit service, emergency facilities, public facilities or retail/commercial frontages • pathways designated as part of City cycling routes 	5 cm	12 h	Sidewalks directly adjacent to arterial roads	All other locations
3	<ul style="list-style-type: none"> • sidewalks along rural and suburban collector and residential roads • paved pathways in rural and suburban neighbourhoods (pathways that are winter maintained) 	5 cm	16 h		✓
4	<ul style="list-style-type: none"> • unpaved pathways and trails • paved pathways that are not winter maintained 	Not winter maintained			



Figure 8.4-5 : état de surface d'une piste cyclable ouverte aux usagers

8.4.2 Conclusions pertinentes pour le cas du pont Jacques-Cartier

L'évaluation des bonnes pratiques de déneigement des pistes cyclables permet de mettre en contexte les résultats, observations et conclusions obtenus suite à ce projet pilote. En particulier,

- > Une variation de la durée des opérations peut être constatée au travers des études de cas. Les villes étudiées spécifient une durée qui varie entre 4 et 12 heures.

L'expertise des villes, le nombre de ressources, la complexité du réseau (courbes, espaces restreints, etc.) et les intempéries peuvent justifier cet écart. La durée des opérations de déneigement, observée dans le cadre du projet pilote (voir la Section 3.7.4), reste néanmoins cohérent avec la plage de valeurs susmentionnée. Aux fins de simulation (voir la Section 8.2), des valeurs plus élevées ont toutefois été utilisées en appliquant des facteurs de correction pour prendre en compte la géométrie complexe du pont, le manque potentiel d'expertise pendant les premières années ainsi que le contexte général du pont Jacques-Cartier (enclavement, travail sur l'eau ...etc.).

- > Les conditions de surface ciblées par les villes étudiées démontrent qu'une surface complètement sèche et déneigée n'est pas requise comme critère d'opération hivernale des pistes cyclable. De même, les opérations de déneigement effectuées dans le cadre de ce projet pilote ont produit un état de surface plus ou moins humide, jugée néanmoins acceptable pour le passage des cyclistes en se basant notamment sur la caractérisation des sols au travers d'inspections visuelles et de mesures de coefficient de frottement dans le cadre du projet.
- > L'étude de cas en Suède, comme dans le cas du pont Jacques-Cartier, soulève la question de rejets de neige dans des cours d'eau. En Suède, malgré une durée de validité très courte des permis et des autorisations, ce qui nécessite plusieurs demandes ou renouvellements, plusieurs municipalités ont recours au déversement de neige dans les océans, lacs et autres cours d'eau.
- > Les facteurs déclencheurs établis par les villes et provinces étudiées s'avèrent être très proches de l'optique adoptée dans le cadre du projet pilote. En adoptant une approche conservatrice, une limite de 2 cm de neige a été choisie en tant que critère d'acceptabilité et a été utilisée dans le cadre des simulations des opérations hivernales (voir Section 8.2). En effet, le seuil de 2 cm a été adoptée dans d'autres pays tels que l'Islande et la Suède tandis que d'autres normes (ex. d'Ontario ou de Finlande) optent pour un plafond plus élevé se rapprochant de 5 cm de neige.
- > Le coefficient de frottement ne figure généralement pas parmi les facteurs déclencheurs conventionnels, sauf pour le cas de la Finlande qui utilise une plage de coefficient de frottement de 0,15 à 0,25 pour encadrer les opérations de déneigement. En adoptant une approche plus conservatrice, les résultats obtenus et conclusions tirées suite aux essais du projet pilote se basent sur une valeur minimum d'environ 0.48, ce qui équivaut à un BPN de 45.

9 Communication

9.1 Généralité

Un système de communication réciproque entre PJCCI, les cyclistes et autres parties prenantes est primordial pour mieux gérer les attentes des usagers de la piste multifonctionnelle et les imprévus inexorablement liés à la saison hivernale. Cela permettra aussi de changer ou d'améliorer les procédures et travaux de déneigement au cours des hivers prochains en fonction du retour sur l'expérience acquise et des commentaires reçus. Il est donc essentiel d'adopter un protocole de communication efficace aussi bien à l'interne de PJCCI qu'avec les cyclistes.

9.2 Analyse des besoins en communication

Quelle que soit l'option d'opération hivernale retenue (voir Section 8.1 pour les options envisagées), une communication entre les parties et les usagers est indispensable. Elle se présente en trois niveaux :

1. **Communication médiatique** au public : il s'agit de communiquer au public les décisions prises par PJCCI vis-à-vis de l'ouverture ou de la fermeture de la piste. Ce type de communication peut aussi être utilisé à des fins de sensibilisation (vitesse des usagers, risques liés à l'hiver...). La communication médiatique de PJCCI est déjà en place actuellement.
2. **Communication permanente** aux usagers, et sensibilisation : il s'agit de moyens de communication permanents sur place, que ce soit des panneaux d'avertissement (par exemple « surface glissante », radars pédagogiques, voir Section 7 sur la sécurité), ou des panneaux permanents explicatifs (horaires d'ouverture de la piste, horaires des navettes, etc.). Il faut souligner que ces panneaux peuvent aussi avoir un rôle de sensibilisation des usagers.
3. **Communication adaptative** aux usagers : en fonction de l'option d'opération hivernale retenue, une communication quotidienne, voire deux fois par jour, pourrait s'avérer nécessaire. Il s'agit de prévenir en temps réel, ou si possible au préalable, les usagers des conditions changeantes (fermeture de la piste, ouverture de la piste, conditions difficiles, etc.). Même certaines options d'opération impliquant un déneigement minimal, voire aucun, pourraient nécessiter ce type de communication adaptative. Par exemple en cas de dysfonctionnement du système chauffant ou encore en cas de fermeture hivernale, les usagers bénéficieraient d'un système d'alerte (SMS, réseaux sociaux, courriel...) en temps réel. La Section 9.3 aborde les différents modes de communications possibles ou existants.
4. **Communication interne** et aux parties prenantes : au sein de PJCCI, les différents départements comme Ingénierie / Planification et Opération / Entretien requièrent une communication quotidienne et efficace afin d'optimiser les opérations sur la piste et la communication aux usagers ; ainsi qu'une communication externe avec les autres parties prenantes comme les municipalités, etc.

9.2.1 Communication globale entre toutes les parties

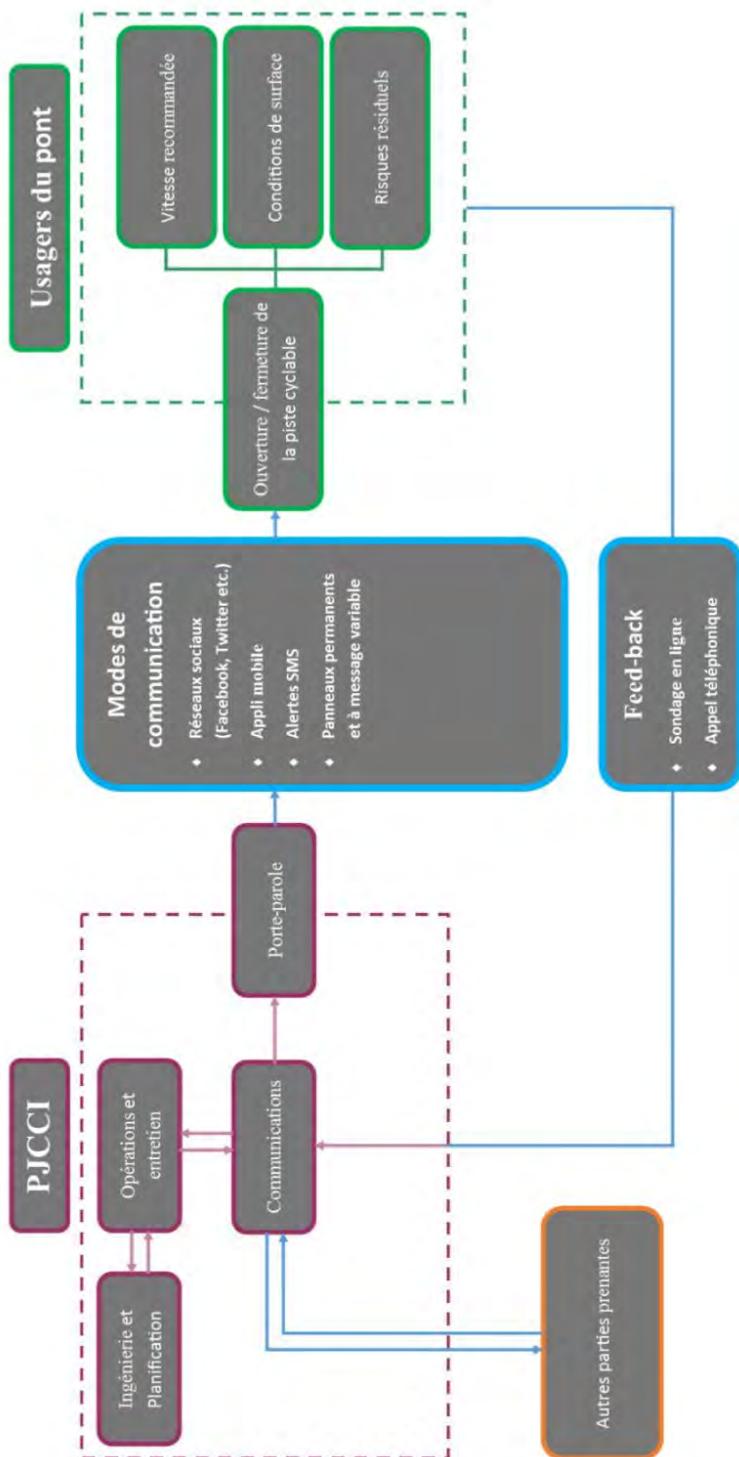


Figure 9.2-1 : communication réciproque entre PJCCI, les usagers du pont et les autres parties prenantes

Il est important de mettre en place un système de communication réciproque entre PJCCI, les usagers de la piste multifonctionnelle et les autres parties prenantes afin d'optimiser le protocole et les opérations de déneigement au fil des années.

9.2.2 Communication médiatique

En premier lieu, le système de communication établi par PJCCI porterait sur la prise de décision au niveau de l'ouverture de la piste multifonctionnelle en période hivernale et se ferait, très probablement, sur une base mensuelle. Cette communication devra être claire et simple à comprendre. Elle devra être bien diffusée et devra, au minimum, aborder les points suivants :

- > Une explication claire du fonctionnement de la piste en hiver, comme les heures d'ouverture et de fermeture de la piste multifonctionnelle ;
- > Une sensibilisation aux risques hivernaux : comme la variabilité des conditions de surface, la forte pente, etc. ;

Toute modification ou fermeture affectant la piste multifonctionnelle à long terme devrait être transmise aussi aux organismes concernés et être annoncée de façon rapide et officielle au travers de :

- > Médias : télévision, radio, et presse ;
- > Médias sociaux.

Par la suite, des informations en temps réel, tel que l'avancement des travaux de déneigement en temps réel, pourraient être transmises aux usagers de la piste multifonctionnelle.

9.2.3 Communication interne et avec les autres parties prenantes

Communication interne à PJCCI

L'équipe d'opérations et entretien doit notamment communiquer l'état d'avancement des travaux à l'équipe de communications, ainsi que rester informée des commentaires des cyclistes pour que des mesures correctives puissent être prises. Des lignes de communication sont aussi nécessaires entre l'équipe d'entretien et opérations, d'ingénierie et de planification. Idéalement, chaque équipe (opérations et entretien, communications, etc.) requiert un point de contact afin d'éviter la communication de messages contradictoires entre les différentes parties prenantes. La rédaction des messages doit se faire au préalable et en collaboration entre les diverses équipes de PJCCI. Cette coordination implique aussi la mise à jour du site web de PJCCI ainsi que du système d'envoi de SMS, entre autres.

Communication avec les autres parties prenantes

Deuxièmement, en fonction des opérations hivernales, une coordination devra être faite avec les autres parties impliquées dans la sécurisation et le déneigement de la piste, notamment :

- > La Ville de Montréal ;
- > La Ville de Longueuil ;
- > Sureté du Québec (sécurité du pont et de la piste).

9.3 Modes de communication

9.3.1 Réseaux sociaux (Twitter, Facebook, etc.)



Figure 9.3-1 : Groupe Twitter *Piétons-cyclistesPJC* (gauche) et groupe officiel de PJCCI (droite)

- > **Avantages :** le groupe *Piétons-cyclistesPJC*, déjà très fréquenté et actif, démontre l'intérêt que portent les usagers du pont à l'égard des problèmes pouvant affecter l'ouverture de la piste multifonctionnelle. L'ensemble des réseaux sociaux, dont Twitter et Facebook, constitue un moyen simple et rapide de diffuser l'état de la piste multifonctionnelle en temps réel et d'aviser les usagers, si les conditions météorologiques sont propices à une ouverture. Ainsi, les informations présentées pourraient aussi être centralisées sur un site web dédié à cet effet. Ce mode de communication permettrait de diffuser la durée anticipée des opérations de déneigement. Enfin, cette option ne représenterait pas un très grand investissement financier et pourrait donc être très facilement implantée.
- > **Inconvénients :** bien que rare, l'accès est parfois limité aux membres, réduisant ainsi le nombre de personnes tenues informées. À noter aussi que les réseaux sociaux ne devraient pas servir à enregistrer des plaintes ou d'autres commentaires. Une autre voie de communication, telle qu'un formulaire à remplir sur une autre page, devrait être réservée à cet effet.

- > **Situation actuelle :** il existe déjà une page Twitter officielle (non dédié aux usagers de la piste multifonctionnelle) et Facebook qui pourraient être exploitées davantage.
- > **Recommandations et ressources additionnelles requises :** selon la stratégie de communication externe mise en place, il serait nécessaire à PJCCI de désigner un porte-parole afin de mieux gérer les attentes du public et un modérateur web pour contrôler les forums de discussion. Une centralisation des informations présentées aux différentes associations et parties prenantes pourrait aussi servir à limiter les ressources requises et à éviter de transmettre des messages contradictoires.

9.3.2 Site internet en continu

- > **Avantages :** un site ou une page internet, dédiée à la communication avec les usagers du pont, serait accessible au grand public 24 h/24, 7j /7 sans aucune inscription requise au préalable. De plus, le site internet offre un plus haut niveau de personnalisation qui pourrait aider à promouvoir le projet davantage.
- > **Inconvénients :** même s'il existe beaucoup de similitudes entre le site internet et les réseaux sociaux en termes d'usage, la conception, l'entretien et le bon fonctionnement du site web pourraient requérir plus de ressources et pourraient être plus coûteux. Il peut néanmoins communiquer les heures d'ouverture et de fermeture normales et afficher d'autres changements connus à l'avance.
- > **Situation actuelle :** à l'heure actuelle, les fermetures sont déjà annoncées sur le site internet officiel.
- > **Recommandations et ressources additionnelles requises :** un développeur ou programmeur web serait nécessaire.

9.3.3 Application mobile



Figure 9.3-2 : Application mobile offrant un meilleur aperçu de l'état du pont et des conditions de surface

- > **Avantages :** une application mobile, conçue pour la piste multifonctionnelle et le trottoir du pont Jacques-Cartier, offrirait un meilleur aperçu de l'état du pont et des

conditions de surface. Par exemple, elle pourrait même permettre aux usagers de suivre le déroulement des opérations de déneigement comme le font déjà plusieurs villes, dont la ville de Montréal. Selon les différents niveaux de service abordés dans les sections précédentes, l'application pourrait aussi identifier les parties du pont où le risque de formation de glace serait plus élevé.

- > **Inconvénients :** La version de l'application devra, idéalement, être compatible avec les divers modèles de téléphones intelligents sur le marché. Des mises à jour fréquentes seraient nécessaires aussi.
- > **Situation actuelle :** cette option n'a pas encore été mise en pratique. Cet investissement pourrait être envisagé à long-terme.
- > **Recommandations et ressources requises :** un développeur ou programmeur d'applications mobiles.

9.3.4 Alertes SMS



Figure 9.3-3 : Exemple d'une alerte par téléphone

- > **Avantages :** des alertes téléphoniques, soit par SMS, soit par notification d'une appli mobile, peuvent également informer les usagers d'une fermeture non planifiée. Contrairement aux autres modes de communications proposées, cette option enverrait des messages courts et concis et servirait seulement à communiquer avec ceux inscrits au service SMS.
- > **Inconvénients :** à noter aussi que pour certains usagers, des frais additionnels pourraient être encourus. Par ailleurs, les usagers du pont devront faire parvenir à PJCCI tout changement au niveau de leurs coordonnées.
- > **Situation actuelle :** à l'heure actuelle, une variante de cette option existe déjà, comme on peut le constater avec les images ci-dessous :

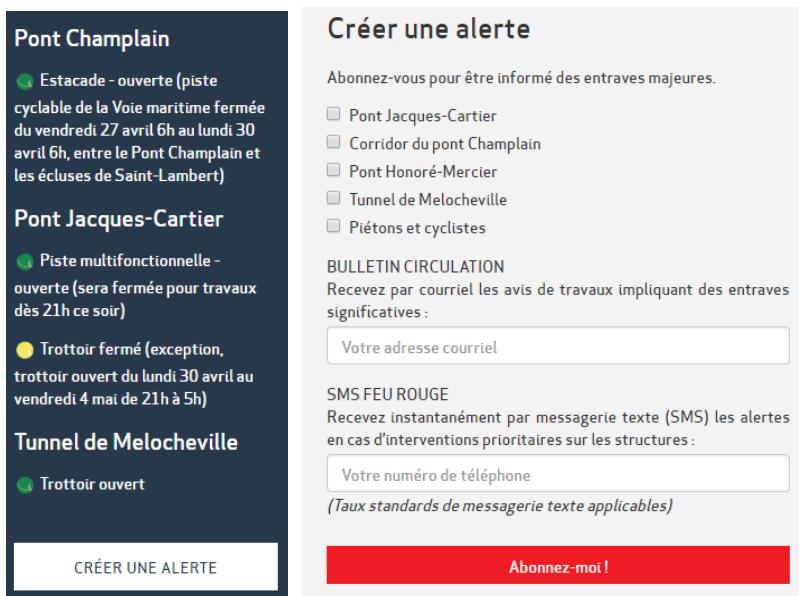


Figure 9.3-4 : Système d'alerte en vigueur

- > **Recommandations et ressources requises :** personne chargée de la création et maintien d'une base de données servant à enregistrer les coordonnées des cyclistes intéressés par le service SMS. Une attention particulière devra être portée à la gestion de l'information recueillie, surtout au niveau de la politique de confidentialité.

9.3.5 Panneaux d'information

Il existe plusieurs types de panneaux qui peuvent aider à la communication de messages importants ; or chaque catégorie possède des avantages et inconvénients uniques. De même, l'usage idéal varie d'un panneau à l'autre. Les particularités de chaque sont détaillées ci-dessous :

- > **Situation actuelle :** il existe déjà des panneaux sur la piste multifonctionnelle, mais aucun d'entre eux ne porte sur les particularités du déplacement à vélo en hiver.
- > **Recommandations et ressources additionnelles requises :** entretien des panneaux et coût d'électricité additionnel pour les écrans à message variable. À considérer les effets du vent sur les panneaux en cas de tempête. À s'assurer que les directives soient présentées de manière brève et concise pour éviter l'encombrement visuel.

9.3.5.1 Panneaux d'information explicatifs (messages permanents)

- > **Avantages :** les panneaux explicatifs engloberaient les avertissements liés aux conditions hivernales, les périodes de déneigement établies par PJCCI, le numéro de téléphone à contacter en cas d'urgence ou de plaintes et les heures d'ouverture et de fermeture si les horaires fixes sont respectés. Ces panneaux détailleront les

modalités d'utilisation de la piste multifonctionnelle et incluraient un rappel que l'emprunt de la piste en conditions difficiles s'effectue aux risques des usagers.

- > **Inconvénients :** l'installation de beaucoup de panneaux pourrait conduire au phénomène d'encombrement visuel qui, à son tour, pourrait réduire l'attention que prêtent les cyclistes aux messages présentés, diminuant ainsi leur efficacité.

9.3.5.2 Panneaux de signalisation (messages permanents)

- > **Avantages :** des panneaux de signalisation placés à des endroits stratégiques communiqueraient les règles de circulation à respecter sur la piste multifonctionnelle. Pour plus de détails, veuillez consulter la Section 7 (sécurité).
- > **Inconvénients :** l'installation de beaucoup de panneaux pourrait conduire au phénomène d'encombrement visuel qui, à son tour, pourrait réduire l'attention que prêtent les cyclistes aux messages présentés, diminuant ainsi leur efficacité.

9.3.5.3 Panneaux d'information à message variable



Figure 9.3-5 : écrans/ panneaux à message variable (PMV) et feu de signalisation affichant l'état de la piste multifonctionnelle

- > **Avantages :** des panneaux à message variable (PMV) peuvent informer les usagers d'un danger quelconque en temps réel. De plus, l'aspect dynamique attire beaucoup plus d'attention et permet d'adapter les messages en fonction des besoins et des conditions météorologiques.
- > **Inconvénients :** l'installation de beaucoup de panneaux pourrait conduire au phénomène d'encombrement visuel qui, à son tour, pourrait réduire l'attention que prêtent les cyclistes aux messages présentés, diminuant ainsi leur efficacité.

9.4 Système de plaintes

À noter que les modes de communication abordés précédemment fonctionneraient à sens unique et devraient donc être modérés. Les commentaires et suggestions de la part des usagers pourront se faire à l'aide d'un système complémentaire. Enfin, la rétroaction des cyclistes et piétons serait reliée à l'équipe d'opérations et entretien pour permettre une amélioration des stratégies mises en place en fonction des connaissances acquises. Un système de plaintes engloberait des sondages en ligne, des messages courriel et des appels téléphoniques. Il faudrait, par contre, prêter attention au coût d'un tel système. L'entretien des composants informatiques, le personnel requis et le traitement de données recueillies comportent tous un coût non négligeable.

10 Estimations des coûts

10.1 Généralité

La présente section porte sur l'analyse des coûts pour les deux options de déneigement précédemment abordées, soit par :

- > Déneigement au travers de méthodes conventionnelles, notamment en utilisant des équipements mécaniques et des produits de déglaçage ;
- > Déneigement au travers d'un système chauffant, notamment basé sur une utilisation du système de membrane chauffante.

Les coûts d'investissement initiaux (CAPEX) et les coûts d'opération (OPEX) ont été formulés pour chaque option abordée.

Étant donné la nature et la portée du présent mandat, une estimation de classe II (-10%, +30%) a été effectué. De plus, [REDACTED] a été ajoutée au total des estimations pour le CAPEX et l'OPEX.

Il est à noter que les coûts présentés sont non-exhaustifs et ne sont présentés qu'afin d'éclairer la prise de décisions dans le cadre du projet pilote. Des études approfondies devront être menées afin de confirmer le besoin et la nécessité des items présentés, leurs quantités précises ainsi que les prix unitaires.

10.2 Coûts d'investissements initiaux – Adaptation de la piste pour le cyclisme hivernal

Suivant les observations et les analyses présentées dans ce rapport, il est reconnu que certaines modifications peuvent être apportées à la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier afin d'en augmenter sa sécurité, assurer sa durabilité et permettre son ouverture lors des saisons hivernales. Certains travaux présentés ne sont que des options d'investissements et ne doivent pas être considérés comme absolument nécessaire pour l'ouverture de la piste multifonctionnelle en période hivernale.

L'étendue des coûts CAPEX pour la réhabilitation de la piste multifonctionnelle inclut les éléments suivants :

- > Installation d'une membrane d'étanchéité et d'usure afin de protéger et d'augmenter la durabilité de la dalle de la piste multifonctionnelle ;
- > Ajout d'un écran anti-éblouissement au niveau de la section courbe de la section 8 ;
- > Ajout d'une lisse galvanisée au pied de la barrière dissuasive afin de prévenir la projection de glace depuis la piste multifonctionnelle sur les passages routiers, piétons et cycliste sous le pont. Une longueur approximative de 1,5 km a été considéré pour couvrir ces passages sous-jacents qui se retrouvent sous la section 2, 4, 6 et 8 du pont;

- > Ajout de luminaire pour éclairer les zones sombres et/ou corriger les contrastes entre les différentes zones ;
- > Ajout de signalisation pour sensibiliser les utilisateurs sur les mesures de sécurité et pour identifier les zones à risques ;
- > Ajout de panneaux à messages variables ;
- > Ajout de radar pédagogique pour sensibiliser les usagers qui roulent trop rapidement ;

Le Tableau 10.2-1 suivant présente les coûts d'investissement initiaux en vue d'ouvrir la piste multifonctionnelle en hiver. Ces coûts sont jugés applicables, peu importe la méthode de déneigement retenue.

Tableau 10.2-1 : Coûts d'investissement initiaux- CAPEX

Description des travaux - Piste Cyclable Pont Jacques Cartier	Estimation LCO
CAPEX - Piste Cyclable	
Travaux de réhabilitation pour la piste cyclable	
Membrane : fourniture et installation	\$ [REDACTED]
Écran anti-éblouissement au niveau de la section courbe de la section 8	\$ [REDACTED]
Ajout de rail galvanisé acier 150 mm x 3-4 mm d'épaisseur pour empêcher la glace de tomber sur les voies en dessous du pont.	\$ [REDACTED]
Ajout de luminaires	\$ [REDACTED]
Signalisations pour sensibiliser les utilisateurs	\$ [REDACTED]
Panneaux à messages variables	\$ [REDACTED]
Radars pédagogiques	\$ [REDACTED]
Travaux de réhabilitation pour la piste cyclable Total	\$ [REDACTED]
CAPEX - Piste Cyclable Total	
* Travaux déjà réalisés.	
\$ 2,690,878	

Ces coûts sont basés sur les hypothèses suivantes :

- > Les travaux sont réalisés durant des périodes favorables pour les travaux de construction (automne, printemps et été) ;
- > Il est considéré que les travaux sont réalisés à temps régulier durant la semaine (pas d'heures supplémentaires) ;
- > Les coûts de main-d'œuvre sont basés sur la convention collective la plus récente ;
- > Le prix des équipements de construction est basé sur des taux internes de LCO ;
- > Le prix d'achat et d'installation de la membrane est basé sur le prix fourni par le fournisseur.

Il est important de noter que l'estimation des coûts d'investissements initiaux pour la réhabilitation de la piste multifonctionnelle exclut des coûts les travaux pertinents qui nécessitent une analyse approfondie et donc jugés hors de la portée du présent mandat. Ces travaux comprennent :

- > Évaluation de l'intégrité structurale du pont reliée à l'ajout de poids propres ou le passage d'équipement de déneigement ;
- > Travaux de renforcement de la structure du pont, ou autres travaux auxiliaires liés à la structure du pont qui seraient nécessaires afin de supporter le poids additionnel du système chauffant et de ses composantes ;
- > Protection de [REDACTED] existante [REDACTED]
[REDACTED] Dans le cas où l'ajout est choisi, un montant approximatif de 550,000 \$ serait ajouté aux coûts directs [REDACTED]).

10.3 Déneigement conventionnel

La section suivante présente l'estimation des coûts d'investissements initiaux « CAPEX » et des coûts d'opération estimés « OPEX » pour l'utilisation de la méthode conventionnelle de déneigement. Se référer à la Section 3 du présent rapport pour plus de détail sur la méthode de déneigement conventionnel.

10.3.1 Coûts d'investissements initiaux – CAPEX

Comme pour les voies de circulation du pont Jacques-Cartier, il est envisagé que le déneigement conventionnel serait effectué par une compagnie de déneigement privée et que ces services seraient procurés sous forme de contrat de déneigement conventionnel.

Toutefois, dans l'optique où PJCCI envisagerait l'exécution des opérations de déneigement à l'interne, c'est-à-dire par son équipe d'Opération et d'Entretien, le tableau suivant présente les coûts d'achat des nouveaux équipements requis pour accomplir cette tâche.

Tableau 10.3-1 CAPEX additionnel - Achat d'équipements de déneigement

Equipment déneigement - achat	Prix d'achat
Tracteur	\$ [REDACTED]
Lame à neige 54"	\$ [REDACTED]
Accessoire pour lame de 54"	\$ [REDACTED]
Balai rotatif Largeur de 60"	\$ [REDACTED]
Accessoire 62"	\$ [REDACTED]
Épandeur tractable pour produit de déglaçage solide ou liquide	\$ [REDACTED]
Souffleuse à neige 48"	\$ [REDACTED]
Total	\$ 104,600

10.3.2 Coûts d'opération – OPEX

L'estimation des coûts d'opération pour le déneigement de la piste multifonctionnelle est basée sur un historique des conditions hivernales des deux dernières années, soit les saisons 2016-17 et 2017-18.

À des fins d'analyse, la moyenne des deux hivers derniers a été utilisée pour déterminer le nombre d'événements de précipitations de neige et de verglas par saison hivernale. Chaque événement a été catégorisé selon le niveau d'effort qui est anticipé afin de bien dégager la piste multifonctionnelle et la rendre sécuritaire. Les catégories événements sont tel que définis à la Section 3.6.2. À noter qu'aux fins d'estimation, le nombre d'événements par année a été estimé à partir des données statistiques des années 2016-17 et 2017-18 tel que décrit dans l'analyse à la Section 3.8. Le tableau suivant présente les coûts sommaires des quatre scénarios d'intervention utilisant la méthode conventionnelle :

Tableau 10.3-2 OPEX - Coût d'opération pour la méthode conventionnelle de déneigement

Estimation Sommaire des 4 scénarios	Estimation
1/ Scénario B « Tempête Moyenne » - Intervention « de base »	
Équipement	[REDACTED]
Main d'œuvre	[REDACTED]
Matériaux	[REDACTED]
<i>Scénario B - Total</i>	\$ 17,856
2/ Scénario C « Tempête Majeure » - Intervention « améliorée »	
Équipement	[REDACTED]
Main d'œuvre	[REDACTED]
Matériaux	[REDACTED]
<i>Scénario C - Total</i>	\$ 44,897
3/ Scénario A « Tempête Mineure » - Intervention avec produits seulement	
Équipement	[REDACTED]
Main d'œuvre	[REDACTED]
Matériaux	[REDACTED]
<i>Scénario A - Total</i>	\$ 31,742
4/ Scénario D « Tempête de verglas » - Intervention « verglas »	
Équipement	[REDACTED]
Main d'œuvre	[REDACTED]
Matériaux	[REDACTED]
<i>Scénario D - Total</i>	\$ 43,266
Total - All scénarios	\$ 137,760
<i>Sous-total - Équipement</i>	[REDACTED]
<i>Sous-total - Main d'œuvre</i>	[REDACTED]
<i>Sous-total - Matériaux</i>	[REDACTED]
<i>Total - All scénarios</i>	\$ 137,760
Grand Total	\$ 179,088

Ces coûts sont basés sur les hypothèses suivantes :

- > Les taux de location d'équipement sont basés sur les données internes, sur lequel un facteur multiplicateur de trois a été appliqué basé sur l'expérience du type d'octroi du mandat ;
- > Une marge de profit de [REDACTED] a été inclus dans les montants ci-dessus ;
- > Les taux de main d'œuvre sont basés sur la convention collective.

10.3.3 Documents de référence

Les documents majeurs suivants ont été utilisés à des fins d'estimation :

- > Rapport No. 2954 par CIMA+ ;
- > Courriel daté 18 avril 2018 – Juan E., Arup – PJCCI – Profil de l'hiver 2016-2017 et 2017-2018 ;
- > Courriel daté 8 mars 2018 – Christian T., PJCCI – Question sur le temps requis pour les opérations de déneigement ;
- > Prix des produits – Facture No. 12370 et 12332 ;
- > Courriel daté 19 avril 2018 – Prix d'achats des équipements ;
- > Courriel daté – 27 novembre 2017 – Soumission Hiver 2017-2018 – Fourniture de dégagement liquide pour piste multifonctionnelle au pont Jacques-Cartier.

10.4 Système chauffant

La section suivante présente l'estimation des coûts d'investissements initiaux « CAPEX » et des coûts d'opération estimés « OPEX » pour l'utilisation d'un système de membrane chauffante pour effectuer le déneigement de la piste multifonctionnelle. Se référer à la Section 6 du présent rapport pour plus de détail sur le système de membrane chauffante.

10.4.1 Coûts d'investissements supplémentaire– CAPEX

En plus des coûts d'investissement initiaux présentés au Tableau 10.2-1, des coûts d'investissement supplémentaire doivent être considérés afin d'implémenter un système de membrane chauffante sur toute la superficie du tablier de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier.

Cette superficie représente approximativement 6 750 m² (2 700 par 2,5 m). En supposant qu'une puissance de 560 W/m² suffise pour déneiger efficacement la dalle du pont, une puissance totale de 3,78 MW serait nécessaire pour alimenter le système chauffant. À ce stade préliminaire, il est supposé que la distribution électrique s'effectue via deux sous-stations électriques au pied du pont ainsi qu'une série de mini-stations et de répartiteurs situés au niveau du pont. Chaque sous-station aura une capacité de 2 MVA et distribuera une alimentation de 600V.

Le tableau suivant présente les coûts d'investissement initiaux requis pour installer une membrane chauffante opérationnelle sur toute la superficie de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier et inclus, sans toutefois s'y limiter, les coûts additionnels pour l'intégration de la pellicule chauffante à la membrane d'usure et d'étanchéité (pour le système de membrane chauffante, la construction de deux sous-stations électriques de 2 MVA de type E-house préfabriqué ainsi que les équipements de distribution électriques vers la membrane chauffante (câblage, gaines de protection, transformateurs, répartiteurs, fusibles, panneaux électriques, etc.)

Tableau 10.4-1 CAPEX additionnel - Système de membrane chauffante

Description des travaux	Estimation
CAPEX - Système de chauffage	
Intégration de la pellicule chauffante à la membrane d'étanchéité et d'usure	
Sous-station électrique 1	
Distribution électrique à partir de la sous-station électrique 1	
Sous-station électrique 2	
Distribution électrique à partir de la sous-station électrique 2	
Contrôle de la circulation pour les travaux d'installation du système électrique au niveau du tablier	
CAPEX - Système chauffant Total	\$ 12,210,863

Les hypothèses suivantes ont été prises en compte afin de faire cette estimation :

- > Les travaux sont réalisés durant des périodes favorables pour les travaux de construction (automne, printemps et été) ;
- > Il a été considéré que les travaux sont réalisés à temps régulier durant la semaine (pas d'heures supplémentaires) ;
- > National Electrical Contractors Association (NECA) est utilisé pour l'estimation des travaux électriques ;
- > Un facteur de 15% est inclus dans la productivité pour tenir compte de la difficulté et de la complexité d'effectuer des travaux sur le pont ;
- > Les coûts de main-d'œuvre sont basés sur la convention collective la plus récente ;
- > Le prix des équipements de construction est basé sur des taux internes ;
- > L'achat des équipements électriques, tels que les câbles et les conduites, est basé sur les données internes pour des travaux similaires ;
- > Le prix de fourniture et d'installation du système de membrane chauffante est basé sur le prix du fournisseur ;
- > Le système de membrane chauffante fonctionne à l'aide d'un système d'opération manuelle ;
- > Un contrôle de la circulation est effectué pour la durée des travaux de construction.

Il est important de noter que l'estimation exclut les coûts reliés aux éléments suivants :

- > Évaluation de l'intégrité structurale du pont afin de considérer le poids additionnel des systèmes chauffants ;
- > Travaux de renforcement de la structure du pont, ou autres travaux auxiliaires liés à la structure du pont, qui seraient nécessaires afin de supporter le poids additionnel du système chauffant et de ses composantes ;
- > Le coût intrinsèque qu'implique la construction d'une ligne de 13.8KV de Hydro Québec ainsi que le raccordement de cette dernière aux deux sous-stations électriques afin de fournir l'électricité nécessaire au fonctionnement du système chauffant ;
- > Traitement architectural des façades des structures des sous-stations afin de mitiger leur apparence industrielle ;
- > Appropriation et achats des terrains pour la construction des sous-stations électriques ;

- > Le chauffage des drains du pont et autres travaux connexes reliés à l'installation du système chauffage ;
- > Coût additionnels reliés aux travaux en hauteur sous le pont Jacques-Cartier.

10.4.2 Coûts d'opération – OPEX

Deux options d'opération de la membrane chauffante ont été tenues en considération afin d'évaluer les coûts d'opération potentiels de cette technologie, soit l'option de système de chauffage seul et l'option combinée.

L'option du système de chauffage seul consiste à l'activation de la membrane chauffante avant les précipitations, pendant les précipitations et à la suite des précipitations. Selon les conclusions de la Section 6 du présent rapport, il est avancé que le système de chauffage devra être activé une heure avant toutes précipitations afin de permettre au système d'atteindre sa température maximale avant le début des précipitations. De plus, il serait pertinent que le système soit maintenu en marche une heure après chaque intempérie afin de drainer et assécher complètement la surface de la membrane. Selon les données météorologiques de l'hiver 2016-2017 et 2017-2018, ceci aurait représenté 1 124 et 997 heures d'activation respectivement. Pour plus d'information sur les données consultées, se référer à la Section 3.8 du présent rapport.

L'option combinée consiste à une utilisation du système de chauffage combinée aux méthodes conventionnelles de déneigement par déblayage mécanique. Cette option est explorée afin de minimiser les coûts en électricité de la membrane chauffante. Ici, le déneigement mécanique de la piste est effectué à la suite des événements où plus de 5 cm de neige s'accumulent. La pelle mécanique du tracteur laisserait une épaisseur de neige résiduelle de 5 cm derrière elle et le système de chauffage serait ensuite activé jusqu'à ce que la neige fonde et que la surface se draine et s'assèche. Il est jugé que le système de membrane chauffante devra être activé 2,4 heures pour chaque centimètre d'accumulation. Lors de l'hiver 2016-2017 et 2017-2018, ceci aurait représenté 545 et 405 heures d'activation respectivement.

L'estimation des coûts d'opération inclut la consommation d'énergie électrique utilisée par le système de membrane chauffante durant les tempêtes de neige basée sur une moyenne des hivers 2016-2017 et 2017-2018. Une prestation monétaire pour le déneigement de la piste multifonctionnelle au travers de méthodes conventionnelles a été incorporée à l'option combinée pour les événements avec une accumulation de neige de plus de cinq centimètres.

Pour le coût de l'électricité, une hypothèse a été effectuée où PJCCI entre dans la catégorie « Tarif G-9 » d'Hydro-Québec. Le tarif G-9 s'applique aux abonnements de moyenne ou grande puissance qui se caractérise par une faible utilisation de la puissance appelée, telles les entreprises qui utilisent des équipements demandant une grande puissance sur de courtes périodes, par exemple, des pompes d'irrigation de terrain de golf ou des canons à neige de station de ski. Ce tarif est facturé au prix de 9,97 ¢/kWh et 4,20 \$/kW.

Le tableau suivant présente les coûts d'opération pendant l'hiver pour les deux options étudiées :

Tableau 10.4-2 : OPEX - Système de membrane chauffante

OPEX - Système chauffant	Option membrane seule	Option combinée
Consommation d'énergie	\$ 443,093	\$ 222,438
Déneigement par méthode conventionnelle	-	\$ 68,881
OPEX - Système chauffant Total	\$ 576,021	\$ 378,714

Les hypothèses suivantes ont été prises en compte afin d'effectuer cette estimation :

- > Des frais d'entretien du système électrique et de la membrane chauffante ont été inclus sur approximativement 1% de la longueur du pont chaque année ;
- > Aucune prestation monétaire pour le déneigement par méthode conventionnelle n'a été incluse pour l'option membrane seule. Toutefois, il devrait être envisagé qu'une intervention minimale par déneigement mécanique pourrait devenir nécessaire afin de remédier à tout mauvais fonctionnement ou bris du système chauffant et assurer l'ouverture de la piste à court terme.

10.4.3 Documents de référence

- > Courriel daté 9 avril 2018 – [REDACTED] – Arup – PJCCI piste multifonctionnelle – Membrane chauffante
- > Document Arup : Estimation – Installation + Opération – Membrane chauffante
- > Hydro-Québec site internet/business – Rate G-9
- > Rapport No. 2954 par CIMA+
- > Courriel daté 18 avril 2018 – Juan E., Arup – PJCCI – Profil de l'hiver 2016-2017 et 2017-2018
- > Courriel daté 8 mars 2018 – Christian T., PJCCI – Question sur le temps requis pour les opérations de déneigement
- > Prix des produits – Facture No. 12370 et 12332
- > Courriel daté – 27 novembre 2017 – Soumission Hiver 2017-2018 – Fourniture de dégagement liquide pour piste multifonctionnelle au pont Jacques-Cartier
- > Document – Arup Electrical Site Plan
- > Single Line Diagram – Full length bridge distribution

10.5 Comparaison financière entre les deux alternatives

Le Tableau 10.5-1 suivant compare les coûts CAPEX et OPEX requis pour les deux systèmes de déneigement analysés dans cette section : Méthode de déneigement conventionnelle (avec l'option location des équipements de déneigement) vs Système de membrane chauffante. Ces estimations ont pour but d'aider PJCCI lors de la prise de décision.

Tableau 10.5-1 : Coûts CAPEX et OPEX requis pour la Méthode de déneigement conventionnelle vs Système de membrane chauffante

Description	Système de membrane chauffante		Méthode de déneigement conventionnelle
	Système de membrane chauffante - Scénario membrane seule	Système de membrane chauffante - Scénario combiné	
CAPEX - Investissement Initial			
Réhabilitation de la piste cyclable			
Installation de la membre chauffante			
Total CAPEX	\$ 14,901,740	\$ 2,690,878	
OPEX - Coût d'opération à chaque hiver			
Coûts d'opération annuels			
Total OPEX	\$ 576,021	\$ 339,609	\$ 133,994

10.6 Analyse de coûts spécifique à l'analyse multicritère

Afin de pouvoir réaliser une analyse multicritère des options d'opération hivernale (abordée plus en détail dans la section 12), une étude de coûts distincte, autre que celle décrite dans les sections précédentes, a été effectuée. Cette étude simplifiée se penche notamment sur l'option Statu Quo (avec navette Vélobus) ainsi que l'option à long terme avec toiture sur la piste, afin de les comparer avec les trois autres options développées dans la partie précédente. De plus, cette étude est annualisée afin de pouvoir comparer les composantes OPEX et CAPEX ensemble, et l'actualisation de la valeur monétaire sur 50 ans a été prise en compte. Veuillez consulter l'annexe 12.4 pour avoir une liste détaillée des coûts.

10.6.1 Annualisation et actualisation

Comme dans l'analyse de coûts précédente, une évaluation et comparaison des dépenses d'exploitation (OPEX) et des dépenses d'investissement (CAPEX) sont présentées. Cependant, en raison de l'annualisation de coûts et du taux d'actualisation appliquée, les totaux peuvent fortement varier par rapport à l'analyse précédente.

Les coûts CAPEX et OPEX sont calculés ensemble afin d'obtenir la Valeur Actuelle Nette (VAN) :

$$VAN = CAPEX + OPEX$$

Par conséquent, il est nécessaire d'annualiser les coûts dans un premier temps, ce qui implique une division des coûts totaux par la durée de 50 ans pour les valeurs CAPEX. À noter que cette analyse suppose que chaque investissement a une durée de vie déterminée de 12.5, 25 ou 50 ans. En ce qui concerne les coûts OPEX, les valeurs sont déjà données annuellement. Dans un second temps, il s'agit d'actualiser les coûts avec le taux d'actualisation de 2.5%, qui comprend une partie inflation (2%) et une partie risque (0.5%). Le Tableau 10.6-1 résume le facteur équivalent à appliquer sur le montant total d'investissement. Pour les coûts d'opération typiquement, le facteur d'actualisation équivalent est de :

Tableau 10.6-1 : Facteur d'actualisation équivalent en fonction de la récurrence de l'investissement

Durée (années)	Facteur d'actualisation équivalent (-)
1	1.95
12.5	1.69
25	1.43
50	1

10.6.2 Autres hypothèses et distinctions

Au-delà de l'annualisation et de l'actualisation des dépenses anticipées, d'autres hypothèses ont été formulées dans le cadre de cette étude. Ces hypothèses et considérations sont détaillées ci-dessous :

- > Dans le cadre de cette analyse, l'ajout du rail en acier galvanisé n'est pas applicable pour l'option 4, en supposant qu'il y ait un risque minimal de chute de glace en dessous du pont en l'absence d'opérations de déneigement ;
- > L'option 1 presuppose des frais liés à l'exploitation de la navette estimés à 240k \$ par an (3015 \$/jour sur 4 mois, 5 jours sur 7). Il est à noter que le service d'une navette est une option et ne sera pas systématiquement offert (voir section 8.1.2) ;
- > Cette analyse suppose aucun frais de service de navette pour l'option 3. En réalité, la variante « navette VéloBus » pourrait aussi servir à transporter les cyclistes pendant les heures de fermeture liées aux opérations de déneigement ;
- > L'option 5 utilise des valeurs approximatives basées sur des projets comparables (ex. [REDACTED] pour la toiture) ; elle suppose que des frais d'entretien de la toiture s'élèveront à 1% du montant initial des travaux chaque année ; et qu'un montant équivalent à l'investissement initial devra être consacré au renforcement du pont ;
- > [REDACTED] sont intégrées dans le montant total ;
- > Les options 2, 3 et 4 ont été évaluées plus en détail au cours de l'analyse de coûts précédente.

10.6.3 Résultats

Les résultats obtenus suite à cette analyse de coûts sont présentés dans le Tableau 10.6-2 suivant (CAPEX, OPEX et VAN séparément) :

Tableau 10.6-2 : résumé des coûts CAPEX, OPEX et VAN pour chaque option d'opération hivernale

	Coûts CAPEX pour chaque option			Capital Expenditures	
	(1) Statu Quo uniquement	(2) Déneigement mécanique	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable
Amélioration de la sécurité					
Déneigement et opérations					
Système de chauffage					
Long terme et durabilité					
Total	\$0	\$142,781	\$484,457	\$484,457	\$764,245
Coûts OPEX pour chaque option			Operation Expenditures		
	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique			(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable	
	(1) Statu Quo uniquement	(2) Déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable	
Amélioration de la sécurité					
Déneigement et opérations					
Système de chauffage					
Long terme et durabilité					
Total	\$493,778	\$349,168	\$738,374	\$1,123,060	\$544,128
Valeur Actuelle Nette, par année, VAN = CAPEX + OPEX					
Valeur Actuelle Nette, par année	\$493,778	\$491,949	\$1,222,831	\$1,607,518	\$1,308,372
VAN sur 50 ans	\$24,688,886	\$24,597,456	\$61,141,549	\$80,375,879	\$65,418,623

* Coûts de service de navette sont optionnels.

11 Analyse préliminaire des risques

Afin de prioriser l'ensemble des décisions et actions à prendre sur le projet d'ouverture de la piste multifonctionnelle, une analyse préliminaire des risques a été préparée. Elle présente une liste non exhaustive des risques, enjeux et opportunités liés aux différentes options d'opération hivernale de la piste.

Le contenu de cette liste est spécifique au sujet de présent mandat. Il représente le résultat des connaissances acquises ainsi que les conclusions de différentes analyses et études effectuées lors du présent projet ; c'est un outil décisionnel avant toute chose dont le but principal est de réduire les risques liés à l'exploitation de la piste.

11.1 Explications

Le risque est quantifié selon la formule :

$$C = G * P$$

Avec :

- > C , la criticité d'un événement ;
- > G , la gravité d'un événement ; et
- > P , la probabilité d'occurrence de l'événement.

Une note de 1 à 5 est donnée pour G et P , et le résultat obtenu qualifient l'événement d'extrêmement critique (note de 25) à négligeable (note de 1). La matrice ci-dessous illustre ce résultat.

Tableau 11.1-1 : Matrice de risque (criticité d'un événement)

C, Criticité = GxP		G, Gravité				
P, Probabilité d'occurrence	Négligeable	Faible	Moyenne	Importante	Certain	
	1	2	3	4	5	
	Négligeable	1	2	3	4	5
	Faible	2	4	6	8	10
	Moyenne	3	6	9	12	15
	Importante	4	8	12	16	20
	Certaine	5	10	15	20	25

Types d'événements

Si certains événements représentent un **risque** pour PJCCI ou ses usagers (accidents liés à la vitesse des usagers par exemple), d'autres se décrivent plutôt comme des **enjeux** dont la problématique n'est pas négligeable et pourrait influencer la prise de décision (ex. enjeux sociopolitiques liés à la fermeture totale de la piste en hiver). Finalement, certains événements peuvent aussi se révéler être une **opportunité** pour PJCCI ; par exemple l'expertise acquise par les équipes d'Opération & Entretien, en cas d'ouverture même partielle de la piste en hiver, fournirait à PJCCI une meilleure réactivité en cas de tempête hors saison (novembre, avril).

Catégories d'événements

Les événements sont regroupés en 5 catégories :

- > Structure et durabilité
- > Sécurité
- > Enjeux socio-politiques et niveau de service
- > Entretien hivernal
- > Autres

Il faut toutefois noter que la catégorisation des événements est parfois délicate car les événements peuvent avoir des causes ou conséquences dépendantes d'autres catégories. De plus, la cotation de 1 à 25 du niveau de risque cache une autre réalité : certains risques, par exemple liés à la sécurité, peuvent avoir un niveau de risque critique (inacceptable), cependant les enjeux liés à l'ouverture ou non de la piste peuvent avoir des implications aussi importantes, à une autre échelle.

Plan d'action

Pour chaque événement, une liste préliminaire de mesures est proposée afin de réduire, voire éliminer, les causes ou les conséquences du risque.

Les actions sont regroupées en 4 types :

- > Évitement : éliminer les causes et les conséquences d'un risque quelconque ;
- > Atténuation : réduire la probabilité d'occurrence et/ou la gravité d'un risque quelconque ;
- > Transfert : détourner le risque vers un tiers ;
- > Acceptation : risque jugé tolérable par PJCCI et où il peut être considéré de ne rien faire (aucune action requise).

11.2 Résultats

La liste complète des événements considérés, leur criticité et le plan d'action proposé sont fournis en Annexe 10.1. Un extrait de cette liste, qui présente les événements déterminés comme les plus critiques, peut être consulté dans le tableau ci-dessous.

Tableau 11.2-1 : Extraits de l'analyse de risque - Préliminaire

Événement					Cotation			
Catégorie	#	Événement	R Enj Op	Cause(s) de l'événement	Conséquence(s)	G	P	C
STR	4	Capacité structurale insuffisante pour l'augmentation des charges (équipements de déneigement, membrane d'étanchéité, etc.)	R	Conception actuelle de la structure ne considère pas les charges additionnelles ; Vieillissement et détérioration de la structure	Rupture des éléments structuraux	5	3	15
SEC	5	Ouverture de la piste lors des conditions climatiques sévères	R	Gestion inadéquate de la piste multifonctionnelle	Accidents Plaintes	5	3	15
STR	2	Corrosion des barres d'armature et des câbles de précontrainte	R	Application directe de produits de déglaçage lors de déneigement de la piste	Réduction potentielle de la capacité structurale Nécessité d'augmenter la fréquence d'inspection Fermerture de la piste pour réparation Augmentation des contraintes internes ; Fissuration de la dalle (dépassant le seuil acceptable)	3	4	12
STR	3	Défibrillateur de température sur le tablier dû à l'installation d'un système de chauffage	R	Isolation non-présente / insuffisante entre le système de chauffage et le tablier	3	4	12	
SEC	8	Ouverture bidirectionnelle de la piste malgré une largeur insuffisante (à cause des opérations ou de la géométrie)	R	Ouvrir le trafic pour tous les usagers	Accidents Plaintes	3	4	12
SEC	9	Ouverture unidirectionnelle de la piste	R	Largeur en deçà des normes de nouvelle construction Largeur dégagée réduite en hiver	Augmentation de la vitesse des usagers en sens unique Incohérence avec l'ouverture en été Mauvaise presse Gestion difficile	3	4	12
SEC	12	Cyclistes ne respectant pas les consignes de sécurité et/ou de la signalisation	R	Comportement inadéquat de certains cyclistes Signalisation et consignes peu claires et / ou peu visibles sur la piste	Accidents Plaintes	3	4	12
SEC	14	Vitesse excessive des usagers sur la piste	R	Perte d'adhérence en hiver Pente abrupte de la piste Comportement inadéquat de certains cyclistes	Accidents Plaintes	4	3	12
ENT	41	Sous-estimation d'une tempête	R	Tempête de neige ou de verglas non prévue ou plus forte que prévue	Baisse de la sécurité des usagers (conditions de la piste)	3	4	12
SOC	20	Décision de fermeture complète de la piste multifonctionnelle en hiver	E	Variables (manque de fonds / politiques / techniques)	Mécontentement des comités de cyclistes Mauvaise presse Pression socio-politique	4	3	12
SOC	21	Divergence entre les décisions sur l'ouverture de la piste et la planification à long terme pour le pont Jacques-Cartier	E	Manque d'étude et de planification à long terme Manque d'un plan de gestion d'actif	Investissements non nécessaires Travaux mal ciblés Mauvaise presse Perte de crédibilité	3	4	12
SOC	30	Fermeture imprévue de la piste au cours de la journée	E	Événements météo imprévus Communication inadéquate avec les usagers Force majeure (accident / incendie ...etc.)	Plaintes / mécontentement du public Mauvaise presse	3	4	12

12 Analyse multicritère

Dans le but d'évaluer les options pour l'ouverture hivernale de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier, une analyse multicritère a été réalisée. L'analyse multicritère sert comme un outil pour supporter une prise de décision surtout lors de situations complexes et aux multiples facettes.

12.1 Options évaluées

Les options évaluées sont présentées dans le Tableau 12.1-1 suivant :

Tableau 12.1-1 : Options évaluées

Options	Hypothèses	Enjeux Majeurs
Option 1 – Statu Quo	<ul style="list-style-type: none"> - Fermeture de la piste cyclable durant l'hiver, entre le 1er décembre et le 31 mars ; - Mise en service d'une navette Vélobus aux heures de pointe afin de transporter les cyclistes de deux côtés du pont (service optionnel) ; - Aucun investissement additionnel n'est prévu. 	<ul style="list-style-type: none"> - Insatisfaction des usagers et des cyclistes ; - Service de navette relativement couteux (service optionnel et n'est pas systématiquement offert).
Option 2 – Déneigement Conventionnel	<ul style="list-style-type: none"> - Exécution des opérations de déneigement par méthodes conventionnelles ; - La piste demeurera ouverte autant que possible avec une circulation unidirectionnelle pendulaire avec fermeture de nuit et pendant les fins de semaine. 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté opérationnelle et logistique ; - Difficulté de communication avec les usagers ; - Fermeture nécessaire pour effectuer les opérations.

Options	Hypothèses	Enjeux Majeurs
Option 3 – Système de chauffage uniquement	<ul style="list-style-type: none"> - L'utilisation d'un système de chauffage fonctionnelle le long de l'hiver avec une membrane chauffante sur toute la longueur du pont ; - Système de chauffage utilisé en mode proactif, avec mise en marche avant les précipitations et jusqu'à la fin de l'événement ; - Performance de fonte de glace adéquate (évaluation indépendante des résultats de l'essai de performance effectué. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande consommation énergétique ; - Coûts d'investissement initiaux et d'opérations très élevés ; - Jamais testée sur une structure existante à cette échelle.
Option 4 – Déneigement mécanique combiné avec un système de chauffage	<ul style="list-style-type: none"> - L'utilisation d'un système de chauffage fonctionnelle le long de l'hiver avec une membrane chauffante sur toute la longueur du pont ; - Système de chauffage utilisé en mode réactif en cas des événements majeurs (grande tempête) suivant les opérations de déneigement mécanique ; - Coûts d'entretien et de consommation énergétique réduits et niveau de service plus bas par rapport à l'utilisation du système de chauffage uniquement (option 3). 	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation énergétique élevée ; - Coûts d'investissement initiaux et d'opérations très élevés ; - Système de chauffage jamais testé sur une structure existante à cette échelle ; - Difficulté opérationnelle et logistique ; - Difficulté de communication avec les usagers ; - Fermeture nécessaire pour effectuer les opérations.

Options	Hypothèses	Enjeux Majeurs
Option 5 – Solution fondamentale (Toiture)***	<ul style="list-style-type: none"> - Installation d'une toiture légère à 2,5 m de la surface de la dalle ; - Déneigement mécanique toujours requis mais moins fréquent ; - Circulation bidirectionnelle en tout temps en considérant très peu d'accumulation de neige. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coûts élevés (investissement et opérations) ; - Charges additionnelles sur la structure (vent, neige, poids propre) ; - Efficacité de la protection contre la neige incertaine ; - Effet « tunnel » sur les usagers, confinement ; - Entretien additionnel de la toiture requis ; - Aspect esthétique à considérer.

*** *L'option 5 est montrée dans cette analyse pour fins de comparaison avec les autres options évaluées dans le cadre du projet pilote. Elle représente un exemple d'une réflexion ciblant une amélioration future dans le cadre de la planification et la gestion de l'actif. Néanmoins, d'autres variantes pourraient être considérées dans le cadre d'une étude plus détaillée.*

12.2 Définition des dimensions

Cette analyse multicritère se penche sur quatre dimensions principales : les trois composantes du développement durable auxquelles a été ajoutée la dimension Technique jugée particulièrement importante pour ce projet :

- > Dimension environnementale ;
- > Dimension sociale ;
- > Dimension économique ;
- > Dimension technique.

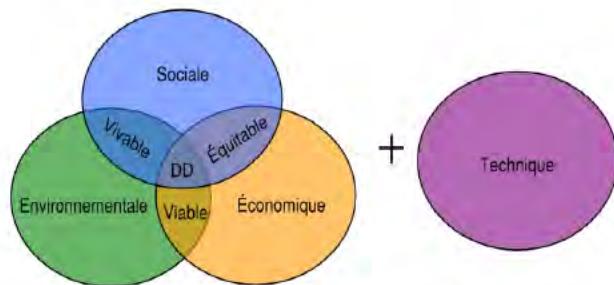


Figure 12.2-1 : Les quatre dimensions de l'analyse multicritère

12.3 Définition des critères d'analyse

Les critères sont les éléments de base qui seront évalués.

Dans un premier temps, un groupe de réflexion composé de personnes clés de Arup et PJCCI a identifié 45 critères liés à la performance du projet et aux besoins et objectifs de l'étude. Les critères ont notamment été établis selon les études effectuées et la connaissance acquise lors du projet pilote. Suivant cet exercice, les critères ont été associés à la dimension correspondante.

Par la suite, le nombre de critères a été distillé en regroupant ceux ayant des caractéristiques similaires, ou en éliminant ceux qui étaient jugés de moindre importance pour la prise de décision.

Finalement, cet exercice a donné lieu à une liste de treize (13) critères englobant de manière compréhensive la performance du projet. Les treize (13) critères sont décrits dans le Tableau 2 ainsi que dans l'Annexe 1. La liste complète des quarante-cinq (45) critères est disponible en Annexe 2 de la présente note.

Tableau 12.3-1 : Description des critères retenus

No.	Dimension	Critère	Description du critère
1	Économique	Dépenses Opérationnelles (OPEX)	Critère quantitatif Comprend généralement les coûts d'entretien, opérations et maintenance : la consommation énergétique, la main-d'œuvre et la logistique, l'opération de navettes Vélobus, si applicable. Ne comprend pas l'achat initial des engins de déneigement. Ces coûts sont actualisés en valeur de cette année, 2018, et sont annualisées sur 50 ans.
6	Économique	Dépenses d'investissement (CAPEX)	Critère quantitatif Comprend généralement l'ensemble des coûts initiaux d'investissement : construction / fabrication, installation, réfection, études préliminaires, achat d'équipement... La difficulté d'implémentation d'une option est aussi incluse dans le coût, indirectement. Ces coûts sont actualisés en valeur de cette année, 2018, et sont annualisées sur 50 ans.
10	Environnementale	Impact sur l'atmosphère (Émissions CO2)	Critère quantitatif Un calcul simplifié des émissions de CO2 (uniquement) a été réalisé et prend en compte l'impact de chaque option sur l'atmosphère : énergie fossile et électrique, réduction des déplacements automobiles, énergie grise (fabrication de matériaux de construction), navette... L'impact de la mobilité douce (incitation à l'utilisation du vélo, etc.) est donc considéré dans ce calcul.

No.	Dimension	Critère	Description du critère
12	Environnementale	Rejet de produits de déglaçage dans l'environnement	L'impact du rejet de produits de déglaçage dans l'environnement est évalué ici. L'impact du rejet de neige pure dans l'environnement n'est pas considéré ici, car nul.
13	Sociale	Impact sociopolitique avis du public :	Il s'agit ici d'évaluer l'impact de chaque option sur le public, de manière très générale, en combinant l'ensemble des aspects du projet et ses conséquences sur l'opinion générale du public : notamment les aspects économique, environnemental, social, touristique, sécurité qu'ils soient réels ou perçus. Ce critère a été évalué selon la perspective de l'équipe du projet – un sondage public est recommandé pour une évaluation plus approfondie.
16	Sociale	Difficulté liée à la communication et à la sensibilisation	Communication nécessaire aux usagers ; que ce soit en temps réel (ouverture de la piste en temps réel, communication des alertes météorologiques et prévisions de fermeture de la piste...), ou de façon permanente (signalisation, panneaux informatifs, radars pédagogiques...), ou dans une moindre mesure pour la sensibilisation (campagne médiatique, panneaux de sensibilisation sur place...). La sensibilisation des usagers apparaît comme un minimum dans chacune des options d'opération y compris en cas de fermeture hivernale de la piste.
18	Sociale	Niveau de service : ouverture hivernale	Critère quantitatif La décision d'ouverture hivernale de la piste aura un impact important sur le niveau de service fourni et sur la satisfaction des cyclistes. Selon la solution retenue, différentes durées d'ouverture de la piste en hiver pourraient être atteintes sur une semaine de 7 jours. Ceci dépend de la performance de l'option en question par rapport à l'efficacité et la rapidité des opérations.
22	Sociale	Niveau de service : ouverture bidirectionnelle	À cause de limitations géométriques, la piste pourrait ne pas être ouverte de manière bidirectionnelle pour l'option en question.
24	Sociale	Niveau de confort et de sécurité	Niveau de confort et de sécurité fournis par les conditions de surface, la largeur de la piste dégagée ou résiduelle, le comportement des usagers et leur vitesse. Ce critère est évalué du point de vue de l'usager et de sa sécurité, indépendamment de la responsabilité de PJCCI (notamment en cas de piste fermée, la sécurité de l'individu n'est pas acceptable, d'où la fermeture de la piste par PJCCI).
29	Technique	Difficulté d'implémentation	Études et travaux additionnels requis afin de compléter l'implémentation de l'option retenue ; complexité des études, étendue des travaux nécessaires (multidisciplinaire) ; étendue de la réfection.

No.	Dimension	Critère	Description du critère
32	Technique	Difficulté opérationnelle et entretien	Efficacité et complexité des opérations : fréquence, expertise nécessaire, uniformité du résultat, communication interne requise et conséquences sur d'autres éléments secondaires (drains, joints...)
38	Technique	Impact sur la durabilité	Impact de la solution retenue sur la durabilité de la piste et plus généralement sur sa longévité.
42	Technique	Résilience	Il s'agit ici d'évaluer la résilience de chaque option. Ceci inclus la redondance du système en cas de bris ou tout autre événement affectant le niveau de sécurité, et l'adaptabilité de l'option aux changements futurs (décisions politiques, changements au niveau de la mobilité...). La redondance est considérée comme un critère plus important que l'adaptabilité ici.

12.4 Pondération des critères

Parmi les 13 critères importants retenus, une pondération avec une échelle à trois niveaux a été choisie afin de distinguer leur niveau d'importance dans l'analyse :

- > 1 : important, mais non indispensable ;
- > 2 : très important ;
- > 3 : essentiel et incontournable.

Les critères moins importants n'ont pas été considérés dans cette étude. La liste des critères retenus et de leur pondération est donnée dans le Tableau 12.4-1 :.

Tableau 12.4-1 : Critères retenus et leur pondération

No	Dimension	Critère	Pondération	Justification de la pondération
1	Économique	Dépenses Opérationnelles (OPEX)	3	Les coûts associés aux différentes options sont importants, ainsi leur considération est essentielle dans la présente analyse. De plus, les coûts initiaux (CAPEX) sont annualisés sur 50 ans afin d'être comparables aux coûts opérationnels (OPEX). Ceci permet de simplifier la comparaison des coûts sur la durée de vie voulue.
6	Économique	Dépenses d'investissement (CAPEX)	3	
10	Environnementale	Impact sur l'atmosphère (Émissions CO2)	1	Suite à l'analyse des émissions de Gaz à Effet de Serre, l'impact sur l'atmosphère des options considérées est relativement faible même pris à l'échelle du pont uniquement (comparé aux émissions de l'ensemble du trafic routier sur le pont par exemple).
12	Environnementale	Rejet de produits de déglaçage dans l'environnement	1	L'impact du rejet de produits de déglaçage dans l'environnement est très faible, voire négligeable, comme démontré dans l'étude préparatoire dans le cadre du même projet.
13	Sociale	Impact sociopolitique : avis du public	2	Les impacts sociopolitiques liés aux décisions d'ouverture ou de fermeture de la piste peuvent être importants et remettre en cause l'ensemble du projet. Toutefois ils sont difficiles, voire impossibles à évaluer et prévoir et peuvent être atténués par certaines mesures (communication). Une pondération moyenne de 2 a ainsi été choisie.
16	Sociale	Difficulté liée à la communication et à la sensibilisation	1	Les difficultés liées à la communication ont des conséquences sociopolitiques importantes, toutefois elles peuvent être atténuées par un certain nombre de mesures
18	Sociale	Niveau de service ouverture hivernale	3	Le niveau de service est un enjeu majeur dans cette étude, il porte ainsi une très forte pondération. Le niveau de service comprend l'impact de la décision de l'ouverture de la piste, la durée d'ouverture potentielle, impact des conditions climatiques sévères, etc.
22	Sociale	Niveau de service :	1	Une ouverture unidirectionnelle affecterait le niveau de service, mais de manière secondaire, surtout si les

No	Dimension	Critère	Pondération	Justification de la pondération
		ouverture bidirectionnelle		ouvertures sont organisées selon les périodes de pointes fortement directionnelles.
24	Sociale	Niveau de confort et de sécurité	3	La sécurité est un critère essentiel dans le choix d'une option. Il faut noter que la sécurité est généralement associée à un niveau d'acceptabilité du risque. Un point de sécurité inacceptable va nécessiter des mesures de mitigation du risque, voire la fermeture de la piste. Le seuil de tolérance des risques est à identifier par PJCCI et selon l'analyse des risques.
29	Technique	Difficulté d'implémentation	2	La difficulté d'implémentation d'une option pourrait remettre en cause la réalisation de l'ensemble du projet. Cependant, toute difficulté est associée à un coût d'implémentation, abordé dans la section économique.
32	Technique	Difficulté opérationnelle et entretien	2	Les difficultés opérationnelles peuvent affecter l'efficacité globale de l'option choisie, cependant elles ne remettent pas en cause sa faisabilité et elles peuvent être mitigées.
38	Technique	Impact sur la durabilité	2	Bien que la durabilité est primordiale dans les structures d'envergure, nous avons vu ici qu'elle est peu affectée par la plupart des options étudiées. Une pondération moyenne est ainsi donnée puisqu'elle est identifiée comme un risque à faible probabilité. De plus, des mesures sont faciles à implémenter afin de mitiger ce risque.
42	Technique	Résilience	1	La résilience est un critère important. Cependant, les conséquences d'un manque de redondance du système seront raisonnablement tolérables pour les usagers. Du point de vue de l'adaptabilité du système, les conséquences sont principalement liées aux coûts; d'où une pondération faible de ce critère.

12.5 Notation

Pour chaque option, chaque critère est noté de 1 à 5. L'échelle de notation est personnalisée pour chaque critère avec 5 étant la plus haute note. Les critères quantitatifs sont jugés selon les données du projet alors que les critères qualitatifs sont jugés par chaque évaluateur.

Pour la notation des critères qualitatifs, un comité d'évaluation a été formé :

- > Emmanuelle Andrée Hoga, ing. (PJCCI) – *service d'ingénierie*
- > Raphaël Lavoie, ing. (PJCCI) – *direction de projets et construction*
- > Éric Luci, tech. (PJCCI) – *service d'ingénierie*
- > Jean-François Rousseau, ing. (PJCCI) – *service de planification*
- > Moctar Sidibé, ing. (PJCCI) – *direction de recherche appliquée*
- > Pascal Villeneuve, ing. (PJCCI) – *direction de projets et construction*
- > [REDACTED] ing. (Arup) – *Ponts et ouvrages d'art*
- > [REDACTED] ing. (Arup) – *Ponts et ouvrages d'art*
- > Juan Echague, ing. (Arup) – *Ponts et ouvrages d'art*
- > Omar Moussa, ing. (Arup) – *Ponts et ouvrages d'art*
- > [REDACTED] ing. (Arup) – *Civil et développement durable*
- > [REDACTED] ing.jr. (Arup) – *Civil*
- > [REDACTED] ing.jr. (Arup) – *Civil*
- > [REDACTED] bio. [REDACTED] – *Environnement*
- > [REDACTED] géo. [REDACTED] – *Environnement*
- > [REDACTED] ing. [REDACTED] – *Maintien de la circulation*
- > [REDACTED], ing. [REDACTED] – *Maintien de la circulation*

Suite à l'évaluation par le comité, les résultats sont agrégés. La moyenne générale pour chaque critère et chaque option est calculée. L'écart type et les moyennes du comité évaluateur sont aussi calculés.

Suite à l'analyse des données pour chacun des critères par le comité d'évaluation, une réunion entre Arup et PJCCI a permis d'arriver à un consensus sur la note pour chaque critère et chaque option.

En utilisant les notes consensuelles de l'analyse multicritère, les notes des critères sont agrégées en calculant le produit de la note d'évaluation et de la pondération pour arriver à une note finale pour chaque option.

Un total de point est déterminé par dimension et un diagramme en losange est réalisé pour chaque option. Alors que le nombre de critères par dimension varie, les dimensions sont pondérées de manière équivalente, soit 25% pour chacune des quatre dimensions. Le diagramme permet de visualiser le profil de performance de chaque option pour les quatre dimensions avec la note 5 étant la plus optimale.

De plus, pour fins de comparaison de la performance des critères par option, un diagramme en anneau inspiré par l'outil SPeAR (Sustainable Project Appraisal Routine) développé par Arup est créé. Ce diagramme permet de visualiser la performance globale des options et aide à souligner les forces et faiblesses de l'option retenue par dimension. Les notes les plus performantes se situent vers le centre du diagramme en anneau et sont indiquées avec un vert foncé. En s'éloignant de la note optimale, les couleurs changent de vert foncé, à

vert pale, jaune, orange et rouge. La pondération est indiquée par la largeur du secteur de l'anneau relatif au critère. Il faut cependant noter que le diagramme en anneau présenté ici utilise des cercles dont le diamètre augmente régulièrement ; ainsi, l'aire de chaque portion augmente en s'éloignant du centre. Les pires notes (1) sont donc mises en évidence, contrairement aux meilleures notes (5) qui sont dissimulées au centre de l'anneau. Une note aux extrémités du diagramme en anneau occupe plus de place sur le diagramme, mais n'occupe pas plus d'importance.

12.6 Résultats de l'analyse multicritère

Les résultats de l'analyse multicritère permettent d'évaluer la performance des options de manière compréhensive. Suite à l'analyse, les résultats selon plusieurs dimensions fournissent des moyennes proches. Pour fins de discussion, les résultats sont présentés dans cette section dans le

Tableau 12.6-1. Les résultats détaillés sont présentés en Annexe 12.1.

Tableau 12.6-1 : Sommaire des résultats d'analyse

Résultats par Dimension	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable
Économique	4.2	4.4	2.6	2.2	2.6
Environnementale	2.5	3.1	2.8	3.2	3.2
Sociale	1.5	3.4	3.8	3.8	4.0
Technique	4.1	3.1	2.6	2.3	3.0

Résultats par dimension

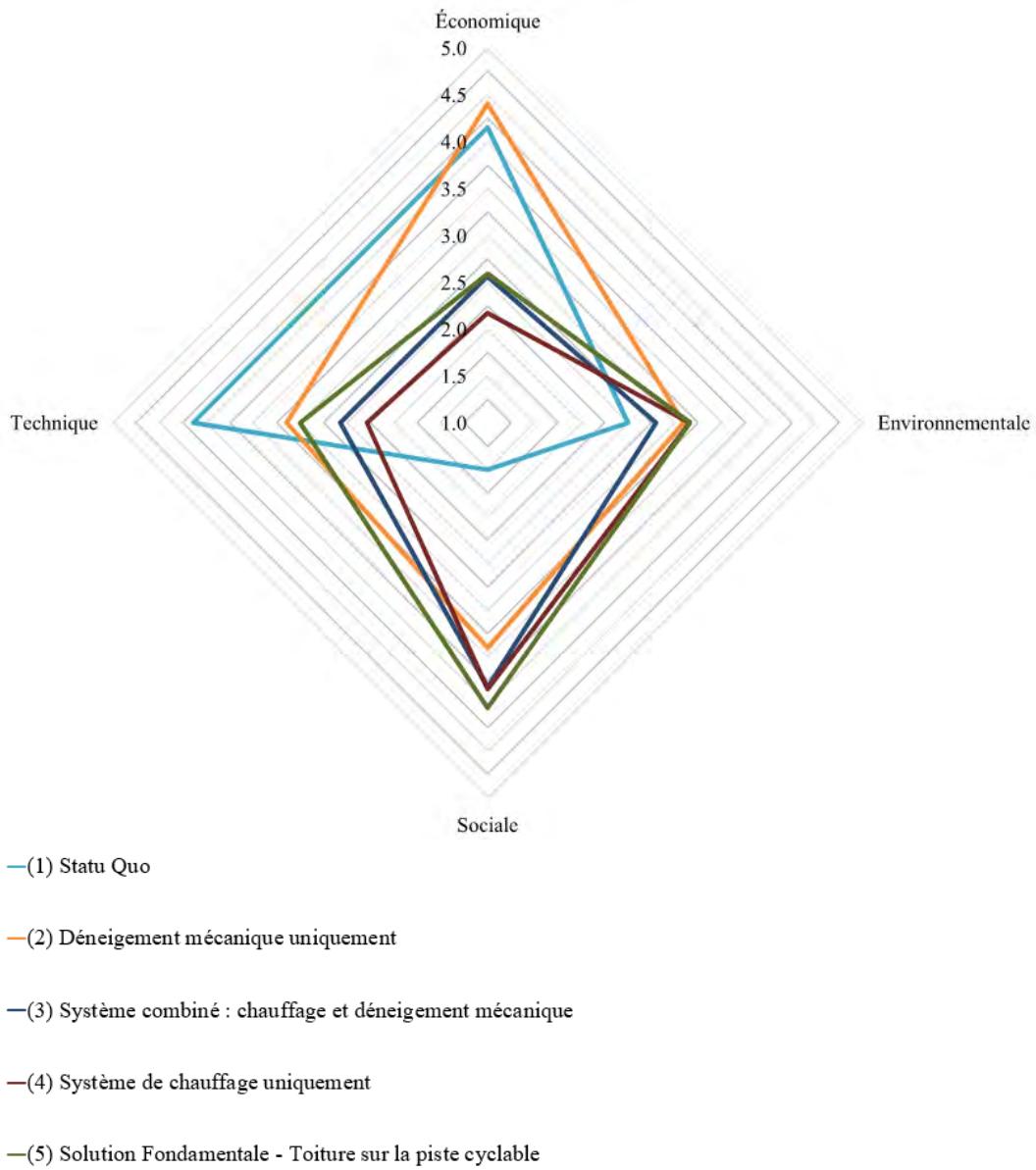


Figure 12.6-2 : Diagramme en losange

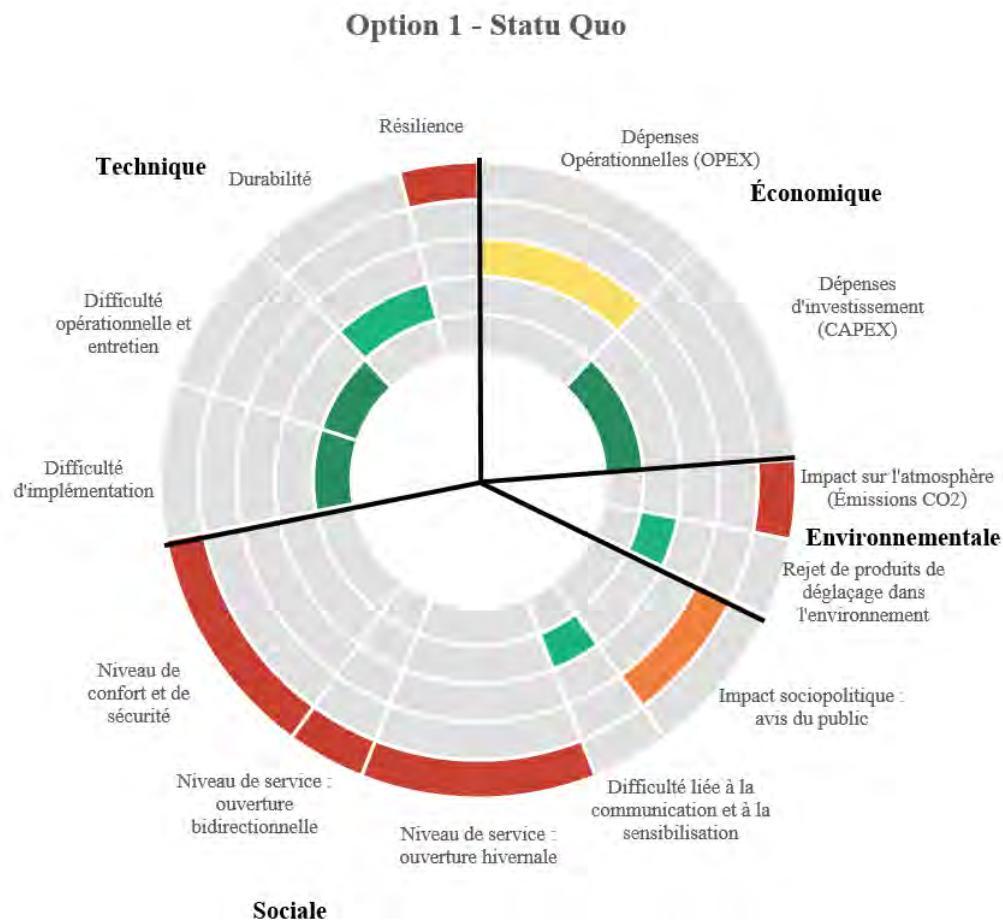


Figure 12.6-3 : Diagramme en anneau – Option 1 : Statu Quo

Option 2 - Déneigement conventionnel

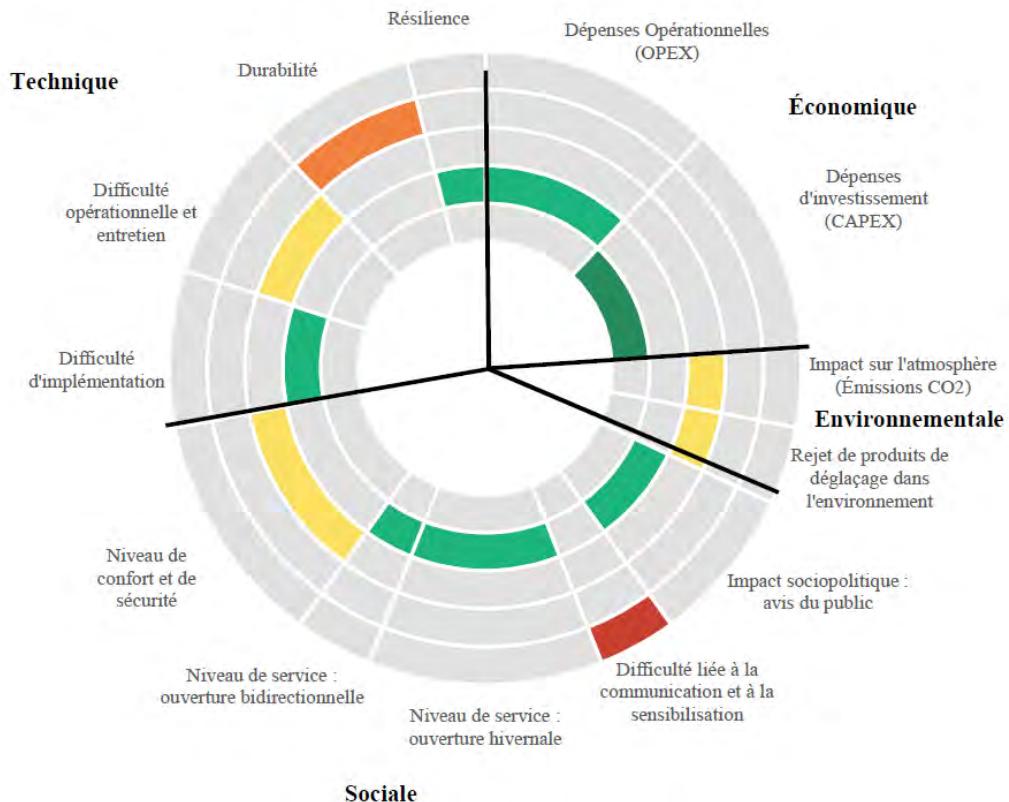


Figure 12.6-4 : Diagramme en anneau, Option 2 : Déneigement conventionnel

Option 4 - Système de chauffage uniquement

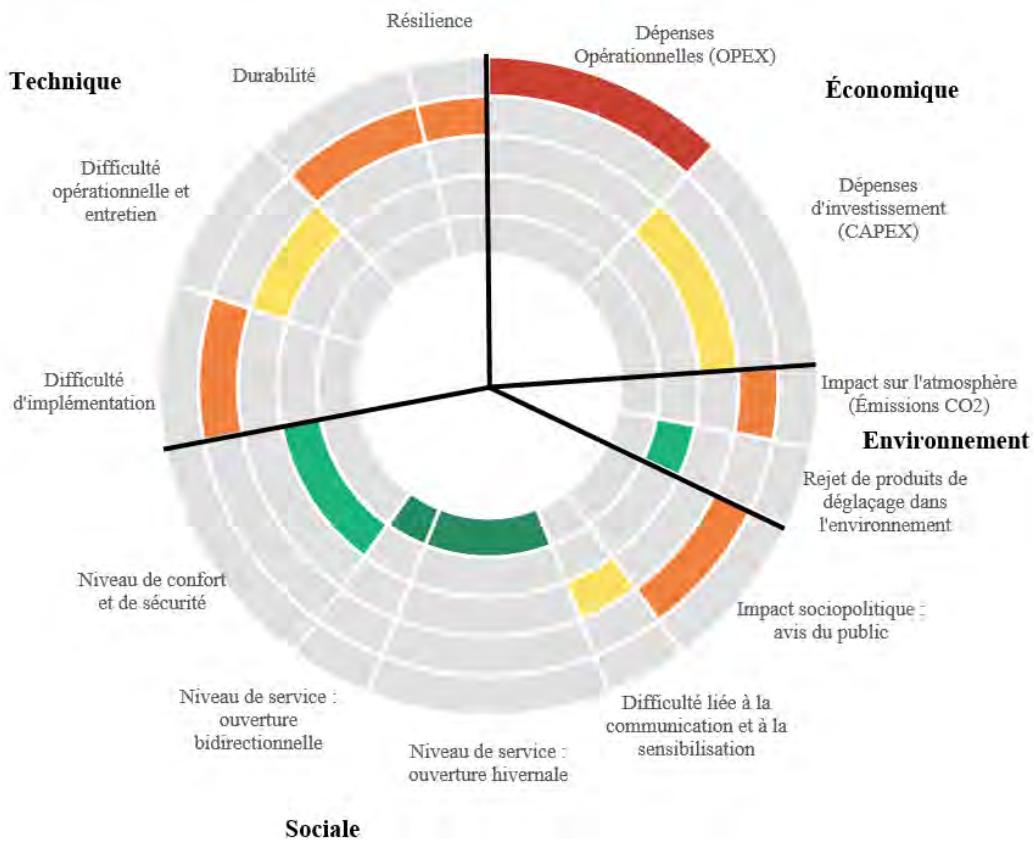


Figure 12.6-5 : Diagramme en anneau, Option 4 : Système de chauffage uniquement

Le diagramme en anneau pour l'option 3 n'est pas présenté ici puisque les résultats sont très similaires à ceux de l'option 4. Le diagramme de l'option 5 n'est pas présenté non plus, car il s'agit d'une solution à long terme non privilégiée.

Ces diagrammes sont toutefois disponibles à l'Annexe 12.1.

12.7 Discussion des résultats

Selon les résultats de l'analyse, dont notamment le tableau sommaire des résultats, le diagramme en losange et les diagrammes en anneau, les points suivants sont notés :

- > L'option 1 - Statu Quo, fourni des résultats très contrastés : elle obtient de bonnes moyennes dans les dimensions économique et technique (aucun investissement nécessaire et donc aucune complexité technique), mais de bien mauvaises moyennes du côté social et environnemental (avis potentiellement négatif du public si l'on garde la piste fermée en hiver, et aucune incitation à l'utilisation du vélo en hiver).
- > Le déneigement conventionnel (option 2) a obtenu des notes relativement proches pour les 4 dimensions comme présenté à la Figure 12.6-2. En effet, économiquement et techniquement c'est l'option ayant le plus haut pointage (hors Statu Quo). Du côté environnemental, la note est relativement bonne et proche des autres options. Au niveau social, elle obtient toutefois une note légèrement plus basse à cause des enjeux liés à la communication. Cette option s'avère envisageable, cependant nécessite une gestion opérationnelle intense afin de gérer les enjeux qui s'en découlent (voir risques inhérents abordés dans la Section 12.1). De plus, une communication presque quotidienne avec le public sera indispensable, et ceci implique une importante coordination entre tous les acteurs du projet.
- > Les options avec système de chauffage (option 3) et système combiné (option 4) obtiennent des notes plus basses globalement (à l'exception de la dimension Sociale) notamment à cause des difficultés techniques engendrées par le système de chauffage et les coûts importants d'investissement. Bien que le système de chauffage soit innovant, il est complexe à adopter sur une si grande envergure et les coûts d'installation et d'opération sont élevés.
- > L'option 5 – installation d'une toiture, fournit une basse note économique malgré une note potentiellement élevée au niveau social à cause de l'importance d'investissement et les travaux additionnels associés. Comme expliqué au début de cette section, l'option 5 est montrée dans cette analyse pour fins de comparaison avec les autres options évaluées dans le cadre du projet pilote. Elle n'a donc pas été testée ni étudiée en autant de détail que les autres options (2, 3 et 4). Une étude dédiée à explorer cette option est recommandée et surtout en considérant la taille de cet investissement. Cette étude devra adresser les enjeux soulevés dans la Section 8.3.2 du présent rapport.

13 Conclusion

Le présent mandat vise l'exploration et l'évaluation de différentes options d'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle du pont Jacques-Cartier. Des essais in situ ont été effectués afin de statuer sur la faisabilité de l'entretien hivernal par déneigement mécanique et par l'utilisation de systèmes de chauffage. Des études additionnelles ont été effectuées pour identifier les risques et les enjeux associés à l'entretien hivernal et ainsi explorer des pistes de solutions potentielles. Enfin, une analyse multicritère a été élaborée afin d'évaluer certaines options d'entretien hivernal et appuyer la prise de décision.

Basé sur l'expérience acquise et les résultats obtenus lors du projet pilote, le déneigement par méthodes conventionnelles pourrait représenter une solution envisageable. Néanmoins, la sélection de produits et d'équipements adéquats ainsi que la bonne planification des travaux sont indispensables afin d'assurer la réussite des opérations de déneigement et de mitiger les risques. Les essais réalisés ont également démontré qu'une largeur utile de 1,8m est atteignable suite aux opérations de déneigement mécanique. Cette largeur pourrait être considérée comme une exigence minimale bien que les nouvelles conceptions soient désormais plus exigeantes. En effet, la largeur obtenue suite aux opérations influence non seulement la sécurité des usagers, mais aussi la possibilité d'une circulation bidirectionnelle. Une surface dégagée et des coefficients de frottement qualifiés de « satisfaisant » à « très bon » ont également été obtenus lors des essais. En raison de leur « pouvoir de fonte » de neige et de glace, la grande majorité des produits de déglaçage utilisés ont fourni des valeurs de coefficient de frottement acceptables et une surface relativement adhérente. Cependant, il existe un certain nombre d'inconnus et de risques inhérents à cette option et qui pourraient présenter des enjeux, notamment la charge communicationnelle requise et la complexité de gestion opérationnelle face aux conditions météorologiques imprévues.

Par ailleurs, selon une étude préliminaire de la durabilité, il existe un risque négligeable ou faible d'initiation de la corrosion d'armature de la dalle suite à l'utilisation de produits de déglaçage. Certaines mesures immédiates ou futures (ex. inspection, suivi, instrumentation et installation d'une membrane d'étanchéité), qui ont pour objectif de monitorer et de minimiser l'impact sur la durée de vie utile de la structure existante, doivent être mises en place. D'autre part, l'analyse environnementale conclut qu'aucun impact majeur n'est envisagé, étant donné la faible quantité de sels utilisée par rapport au débit du fleuve. Néanmoins, un avis formel du Ministère de l'Environnement serait requis. Environnement Canada et le ministère des Pêches et Océans pourraient également confirmer cette approche. Il est cependant conseillé de minimiser les rejets dans le fleuve. En outre, aucun effet sur la faune et les espèces à statut particulier dans la zone à l'étude n'est prévu.

L'utilisation de systèmes de chauffage sur un ouvrage de l'envergure du pont Jacques-Cartier nécessite des investissements importants en raison de leur consommation énergétique très élevée. Parmi les deux systèmes de chauffage mis à l'essai dans le cadre du projet pilote, la technologie qui réunit à la fois une membrane d'étanchéité et une pellicule chauffante, s'avère être mieux adaptée pour le pont Jacques-Cartier. De plus, cette option se combine plus facilement aux méthodes de déneigement conventionnel. Cependant, l'efficacité de la membrane chauffante n'a pas été suffisamment validée lors des essais. Des essais additionnels sont donc nécessaires pour confirmer le niveau de performance réel en saison hivernale. En outre, une isolation appropriée entre les éléments

de chaleur et le tablier en béton est nécessaire afin d'éviter l'effet néfaste du différentiel thermique entre les surfaces supérieures et inférieures de la dalle.

D'autres améliorations sont également à considérer pour accompagner l'option d'entretien hivernal envisagée. Ces améliorations visent principalement à optimiser les opérations de déneigement tout en facilitant l'accès à la piste et en améliorant le confort et la sécurité des usagers. Les enjeux relatifs à la sécurité des usagers de la piste, tels que le niveau d'éclairage et la vitesse empruntée, doivent aussi être considérés pour minimiser, voire éliminer, les risques associés au cyclisme hivernal. Des installations telles que des radars pédagogiques ou des panneaux à messages variables peuvent davantage influencer le comportement des cyclistes et ainsi améliorer la sécurité des usagers. Enfin, les besoins en communication entre PJCCI, les usagers et les autres parties prenantes doivent être pris en considération afin d'établir un protocole de communication efficace qui pourra tenir les usagers au courant de toute information pertinente.

En outre, il ressort de l'analyse multicritère que les différentes options étudiées démontrent des avantages et des limites. Une gestion adéquate des risques et une mise en place de mesures de mitigation appropriées seraient requises de ce fait en fonction de l'option envisagée.

Annexes

A3 Annexe – Opérations de déneigement

- A3.1 Tableau d'évaluation globale des produits de déglaçage
- A3.2 Fiche de contrôle
- A3.3 Procédure d'essais et résultats
- A3.4 Rapports photographiques et suivi d'évolution des essais

A4 Annexe – Durabilité

- A4.1 Note technique : Service Life Model

A5 Annexe - Environnement

- A5.1 Revue réglementaire
- A5.2 Note technique : Discussion of the Environmental Effects and Mitigation for the De-icing Application of Road Salt

A6 Système de chauffage

- A6.1 Projet pilote – Tapis chauffants
- A6.2 Essai de performance tapis chauffants en atelier
- A6.3 Projet pilote – Membrane chauffante
- A6.4 Fiches de contrôle – Systèmes de chauffage

A11 Analyse préliminaire de risques

- A11.1 Tableau integral

A12 Analyse Multicritère

- A12.1 Analyse multicritère (tableau complet avec critères retenus)
- A12.2 Critères d'analyse retenus et non retenus
- A12.3 Causes principales d'émission de gaz à effet de serre (GES)
- A12.4 Comparaison des coûts

A13 Réflexion sur les futures opérations

- A13.1 Exemple de protocole de communication durant les précipitations

A3 Annexe – Opérations de déneigement

A3.1 Tableau d'évaluation globale des produits de déglaçage

Produit		Composant principal	Solide ou Liquide	Environnement						Environnement		Durabilité			Durabilité	Efficacité	Note Global	Classement	Commentaires
				Salinisation	Consommati	Toxicité	Persistante	Eutrophisation	sur 100	Corrosion	Attaque du	ASR	sur 100	sur 100	sur 100				
Produit A		Sel	Solide	1	5	4	5	5	84.0	1	5	4	61.7	70.0	77.1	4	Produit de référence		
Produit B		Sel + Eau	Liquide	1	5	4	5	5	84.0	2	5	4	70.0	S. O.	S. O.	S. O.	Produit non testé ; évaluation faite sans tenir compte des résultats du projet pilote		
Produit C		Sel	Solide	1	5	4	5	5	84.0	1	4	4	55.0	65.0	68.2	6	Produit essentiellement à base de sel gemme plus magnésium et calcium en tant qu'additifs		
Produit K		Copeaux	Solide	2	2	3	4	3	58.0	3	4	5	76.7	50.0	61.4	8	Ce produit est plutôt un abrasif Il flotte sur la glace et ne se dilue pas		
Produit I		Chlorure de magnésium	Liquide	5	4	2	4	4	75.0	0	0	5	25.0	70.0	61.1	9	Chlorure de magnésium corrosif A ne pas utiliser non dilué		
Produit J		Chlorure de calcium	Liquide	5	4	2	4	4	75.0	2	1	5	48.3	95.0	77.2	3	Chlorure de calcium corrosif A ne pas utiliser non dilué		
Produit D		Dérivés naturels	Solide	2	2	3	4	3	61.0	3	5	5	83.3	90.0	80.4	1	Sel traité avec dérivés naturels		
Produit E		Dérivés naturels	Liquide	4	1	3	3	3	56.0	3	5	5	83.3	15.0	66.1	7	Produit mieux utilisé comme agent pro-actif (antigivrage)		
Produit G		Dérivés naturels	Solide	5	2	5	3	2	70.0	4	5	5	91.7	75.0	79.4	2	Produit à base de composants biologiques Idéalement dilué avec du saumure		
Produit F		Acetate	Liquide	5	4	3	2	4	62.0	5	5	4	95.0	S. O.	S. O.	S. O.	Produit non testé ; évaluation faite sans tenir compte des résultats du projet pilote		
Produit H		Dérivés naturels	Liquide	5	3	3	3	3	61.0	5	5	5	100.0	75.0	76.8	5	Produit à base de composants biologiques et apparemment complètement biodégradable		

5 Note élevée
 0 Note faible (inconvénient)
 Notes (1) pas d'information disponible (secret industriel)
 (2) en attente d'études environnementales plus précises, valeurs préliminaires selon revue d'études
 (3) Evaluée à -30°C au minimum, pas au-delà

Recommandé
Déconseillé

A3.2 Fiche de contrôle

Fiche de contrôle - Projet Pilote

Le présent formulaire est privé et destiné uniquement aux personnes ayant obtenu le lien par voie directe.

En cas d'erreur lors de la saisie vous pourrez modifier la fiche avec le lien reçu par courriel.
Il n'est pas nécessaire de remplir chaque section si les données n'ont pas changées ou si ce n'est pas applicable.

Section 1 - Information préliminaires

Section 2 - Météorologie

Section 3 Déneigement

Section 4 - Épandage

Section 5 - Observations

1 Adresse e-mail électronique *

2 Est-ce un déneigement ou un suivi ?

Si c'est un suivi, inutile de remplir les informations préliminaires ou sur le déneigement, et passer directement à la section Produits.

Marquez un seul ovale

Déneigement

Suivi

Informations Préliminaires

3. Personnes présentes

Cochez toutes les réponses qui s'appliquent.

Opérateur [REDACTED]

Christian T.

Emmanuelle H

Représentant du consultant

Autre _____

4 Date du déneigement ou suivi

Exemple : 15 décembre 2012

5. Qui a déclenché le déneigement

Cochez toutes les réponses qui s'appliquent.

Christian (Opération & Entretien)

Autre : _____

6. Heure (et date) de la prise de décision

Heure (format 24h)

Exemple : 15 décembre 2012 à 11 h 03

7. Heure de début des opérations

Heure à laquelle le déneigement commence (sur place). Format 24h.

Exemple : 8 h 30

8. Heure de fin des opérations

Heure à laquelle le déneigement se termine (sur place). Format 24h.

Exemple : 8 h 30

9. Commentaires généraux

Préciser par exemple pourquoi le déneigement n'a pas débuté immédiatement (suite à la prise de décision).

Météorologie

10. Température extérieure

Température extérieure mesurée sur place, ou selon internet. Précision au degré requise entre -3 et +3°C.

Marquez un seul ovale.

- 11°C ou moins
- 10°C à -4°C
- 5°C à -3°C
- 3°C
- 2°C
- 1°C
- 0°C
- +1°C
- +2°C
- +3°C ou plus

11. Vent (hors rafales)

* Si les vents annoncés sont supérieurs à 63km/h, une tempête est alors annoncée par Environnement Canada
Marquez un seul ovale.

- Nul
- Faible (10km/h ou +)
- Moyen (23km/h ou +)
- Fort (37km/h ou +)
- Tempête de vent (63km/h ou +)*

12. Précipitations actuelles

Plusieurs sélections possibles.
Cochez toutes les réponses qui s'appliquent.

- Aucune
- Neige légère
- Neige forte
- Pluie
- Pluie verglaçante
- Brume / Brouillard
- Poudrerie
- Autre : _____

13. Épaisseur de neige (section typique)

Épaisseur de neige mesurée sur la piste avant le déneigement sur la piste. Ne pas mesurer l'épaisseur maximale présente à un seul endroit sur la longueur du trajet, mais plutôt sur une section représentative.

Marquez un seul ovale par ligne.

	0cm+	2.5cm+	5cm+	10cm+	15cm+	20cm+	30cm+	40cm+	50cm+	60cm+
Maximale	<input type="radio"/>									
Minimale	<input type="radio"/>									
Théorique, Montréal	<input type="radio"/>									

14. Qualité de la neige

Plusieurs sélections possibles.
Cochez toutes les réponses qui s'appliquent.

- Neige sale (projections depuis la route)
- Neige légère (poudreuse)
- Neige soufflée (bancs de neige)
- Neige lourde (humide)
- Neige "gadoue" (sloche)
- Neige gelée sur le dessus (verglas)
- Verglas sur la piste
- Autre : _____

15. Commentaires sur la neige

Opérations de déneigement

Le raclage et l'évacuation de la neige sont traités dans cette section. L'épandage de produits est traité plus loin.

16. Type de déneigement (hors épandage)

En cas de changement de matériel durant les opération indiquez l'heure de rotation et le nombre de passage dans "Autre".

Cochez toutes les réponses qui s'appliquent.

- Aucun
- Raclage à la lame (gratte)
- Évacuation de la neige (souffleuse)
- Balai rotatif
- Déblaiement manuel des drains ou des plaques couvre-joints
- Autre : _____

17. Zones déneigées (trajet)

Indiquer les axes si possible.

Cochez toutes les réponses qui s'appliquent.

- Tracé par défaut (Sections 1 à 5)
- Autre : _____

18. Nombre de passages réalisés

Si certaines sections ont été déneigées davantage ou moins que d'autres, merci de le préciser dans "Autre".

Cochez toutes les réponses qui s'appliquent.

- Aller simple (retour à vide)
- 1 aller-retour
- 2 aller-retour
- Autre : _____

19. Évacuation / Stockage de la neige

Si la neige a été déplacée, précisez à quel endroit
Cochez toutes les réponses qui s'appliquent.

- La neige a été accotée sur la glissière (pas d'évacuation de la neige)
- La neige a été soufflée sur la voie 1 (fermée au trafic)
- La neige a été déplacée en plusieurs tas (*)
- Autre : _____

20. Gestion de la neige à la section 3

L'absence de glissière à la section 3 rend les opérations de déneigement plus difficiles. Précisez quelles actions ont été prises, si applicable.

Cochez toutes les réponses qui s'appliquent.

- La neige a été stockée sur la piste, non accotée aux garde-corps
- Autre : _____

21. Rejets de neige hors des garde-corps

Cochez toutes les réponses qui s'appliquent.

- Aucun
- Rejets accidentels (précisez la localisation)
- Autre : _____

22. Hauteur de neige accumulée contre la glissière suite au déneigement

Évaluation approximative de la hauteur de neige en [cm] ou en [%] de la hauteur de glissière en béton.

Marquez un seul ovale par ligne.

7cm(10%) 20cm(25%) 35cm(50%) 50cm(75%) 70cm(100%)

Hauteur

23. Largeur utile de la piste suite au déneigement

Évaluation approximative de la largeur utile (cyclable) de la piste en [cm] ou en [%] de la largeur totale (230cm typique).

Marquez un seul ovale par ligne.

60cm(25%) 90cm(40%) 120cm(55%) 150cm(65%) 170cm(75%) 230cm(100%)

Largeur

24. Qualité de la surface après déneigement

Qualité moyenne du fini de surface le long du trajet. Plusieurs sélections possibles.

Cochez toutes les réponses qui s'appliquent.

- Surface sèche
- Béton visible
- Fine pellicule de neige restante
- Couche de neige dure (glissante)
- Glace vive (noire)
- Autre : _____

25. Commentaires sur le déneigement

Est ce que certaines sections étaient plus difficiles à déneiger? Y'a-t-il des problèmes lorsque la neige a été soufflée en voie 1? Avez vous des remarques à faire sur les drains? Sur les joints transversaux?

26. Épandage de produits

Avez-vous utilisé des produits (solides ou liquides) pour le déverglaçage ?

Marquez un seul ovale.

- Oui *Passez à la question 26.*
- Non *Passez à la question 32.*

Épandage de produit

L'épandage de produits n'est pas recommandé pour le moment. En particulier à la section 3.

27. Quel produit a été utilisé ?

Marquez un seul ovale.

- Produit A
- Produit B
- Produit C
- Produit D
- Produit E
- Produit F
- Produit G
- Produit H
- Produit I
- Produit J
- Produit K

28. Remarques sur le produit

Cochez toutes les réponses qui s'appliquent.

- Le produit est solide
- Le produit est liquide
- Rejets accidentels hors des gardes-corps
- Le produit fait fondre la glace
- Le produit fait fondre la neige
- Formations de flaques / accumulations de produit
- Le produit se draine convenablement
- Autre : _____

29. Efficacité du produit

Pour faire fondre la neige ou la glace.

Marquez un seul ovale.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

-
-
-
-
-
-
-
-
-

30. Fonctionnement de la cuve

Marquez un seul ovale.

Normal

Autre : _____

31. Quantités utilisées

En % de la cuve ou en litres (400L)

Observations

33. Autres commentaires

Commentaires ou observations générales (par exemple, sur la chute de glace ou neige depuis la superstructure (localisation, taille); ou sur les projections de sels venant de la route...)

34. Futures opérations

Cochez toutes les réponses qui s'appliquent.

- Il est nécessaire d'évacuer la neige (souffleuse)
 Il est nécessaire d'appliquer des produits de dé verglaçage
 Autre : _____

35. Niveau de sécurité (pour cyclistes) suite au déneigement

Avis général en fonction de la qualité de surface, largeur utile, etc...
Marquez un seul ovale.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

36. Commentaires sur la sécurité

37. Efficacité des opérations de déneigement

Problèmes rencontrés avec les produits, engins, ou sur le trajet; rapidité du déblaiement; communication...
Marquez un seul ovale.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

38. Commentaires sur l'efficacité

39. Photo (désactivée)

Dans la mesure du possible, prendre une photo avant et après le déneigement; à un endroit clé, au choix. La transmettre au consultant par courriel.

Une copie de vos réponses sera envoyée à l'adresse que vous avez indiquée

Fourni par



A3.3 Procédure d'essais et résultats

[REDACTED]

Le 3 juillet 2018

Monsieur Juan Echague, ing., M.ing., MBA
Associé – Ponts & Ouvrages d'Art
Arup
600, boulevard de Maisonneuve Ouest, bureau 750
Montréal (Québec) H3A 3J2

Objet : Mesures de glissance sur la piste cyclable du pont Jacques-Cartier

Rapport d'étude final

V/Dossier : Contrat PJCCI n° 62576 - Projet pilote d'entretien hivernal de la piste cyclable

N/Dossier : 024-B-0018835-1-CH-0001-00

Monsieur,

Il nous fait plaisir de vous transmettre notre rapport final présentant les résultats des mesures de glissance au pendule britannique dans le cadre du projet cité en rubrique, conformément au contrat de service qui nous a été transmis le 5 février 2018 suite à notre proposition portant le n° 2018-P025-0011 datée du 18 janvier 2018.

Nous espérons que les informations contenues dans ce rapport sauront vous être utiles. N'hésitez pas à communiquer avec nous pour toute question concernant cette étude.

Veuillez agréer, Monsieur, l'expression de nos sentiments les meilleurs.

[REDACTED]
[REDACTED] ing.
Chargé de projet

MP/sb

p.j. Rapport

[REDACTED]



Arup

RAPPORT D'ÉTUDE

**Mesures de glissance sur la piste cyclable
du pont Jacques-Cartier**

JUILLET 2018

024-B-0018835-1-CH-0001-00



VERSION FINALE

Arup

**Rapport d'étude final
Mesures de glissance sur la piste
cyclable du pont Jacques-Cartier**

N/Réf. : 024-B-0018835-1-CH-0001-00

Préparé par :

[REDACTED]
ing.

Chargé de projet
N° membre OIQ [REDACTED]

Rapport émis le 3 juillet 2018

Registre des émissions		
Nº de révision	Date	Description
00	3/07/2018	Rapport d'étude final
0A	17/04/2018	Rapport d'étude préliminaire

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. [REDACTED] ne fournit aucune garantie ni ne fait aucune représentation autre que celles expressément contenues dans le rapport.

Ce document est l'œuvre [REDACTED]. Toute reproduction, diffusion ou adaptation, partielle ou totale, est strictement prohibée sans avoir préalablement obtenu l'autorisation écrite [REDACTED] et de son Client. Pour plus de certitude, l'utilisation d'extraits du rapport est strictement interdite sans l'autorisation écrite [REDACTED] 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 [REDACTED] et de son Client. [REDACTED] se dégage de toute responsabilité pour toute reproduction, diffusion, adaptation ou utilisation non autorisée du rapport. »

Table des matières

1	INTRODUCTION.....	1
2	MÉTHODOLOGIE.....	1
2.1	Procédure d'essai.....	1
2.2	Traitement des données.....	2
2.2.1	Correction de température	2
2.2.2	Conversion des mesures de BPN en coefficient de frottement	3
3	INTERPRÉTATION DES MESURES	4
4	RÉSULTATS LIVRABLES.....	5

Tableaux

Tableau 1 : Valeur minimum de BPN estival suggérée par le manufacturier.....	5
--	---

Figures

Figure 1 : Pendule britannique SRT et accessoires typiquement utilisés lors d'un relevé de glissance	1
Figure 2 : Correction des valeurs de BPN à une température de référence de 30°C	3
Figure 3 : Correction des valeurs de BPN à une température de référence de 30°C	3

Annexes

Annexe 1	Tableau des résultats
Annexe 2	Support numérique contenant :
	+ Résultats
	+ Photos
	+ Copie PDF du rapport

1 Introduction

Ce rapport est produit dans le cadre d'un mandat octroyé à [REDACTED] le 5 février 2018 pour la réalisation de mesures de glissance à divers emplacements et sous diverses conditions de température et d'application de produits d'entretien hivernal sur la piste cyclable du pont Jacques-Cartier. Les mesures de glissance ont été effectuées à l'aide d'un pendule britannique SRT (Skid Resistance Tester) selon la norme ASTM E303-93 (Reapproved 2018) dans le cadre d'un projet pilote d'entretien hivernal.

2 Méthodologie

2.1 Procédure d'essai

La glissance de la surface a été évaluée à l'aide d'un pendule britannique SRT (Skid Resistance Tester, voir la figure 1) selon la norme ASTM E303-93 (Reapproved 2018). L'essai de mesure de la glissance de la surface consiste à mesurer la quantité d'énergie perdue, suite à une chute d'un marteau et au frottement d'un sabot en caoutchouc dans un mouvement de balancier (pendule). Cet essai mesure les propriétés antidérapantes de la chaussée.

Le pendule est un appareil équipé d'un sabot de caoutchouc qui balance autour d'un axe. La mise à niveau du pendule est d'abord effectuée à l'aide de trois (3) pattes ajustables et d'un niveau à bulle intégré afin de pallier à la pente de la piste cyclable. Le sabot de caoutchouc est positionné pour entrer en contact avec la chaussée sur une surface d'environ 25 mm de large sur une longueur de 125 mm, après avoir effectué un arc de cercle de 90°. Un cadran gradué de 0 à 150 mesure la hauteur de remontée du pendule. Le frottement minimum correspond à une lecture de 0 et le frottement maximum à 150. La valeur obtenue s'exprime sous la forme du British Portable tester Number (BPN). Plus la valeur BPN est élevée, plus l'adhérence de la surface est grande. Un essai sans frottement permet d'étalonner l'appareil à une lecture de 0. L'usure des sabots en caoutchouc est vérifiée périodiquement et ceux-ci sont remplacés selon les exigences de la norme. Le pendule britannique que nous avons utilisé simule la performance d'un véhicule en freinage avec les roues bloquées à partir d'une vitesse de 50 km/h sur une surface mouillée.

Figure 1 : Pendule britannique SRT et accessoires typiquement utilisés lors d'un relevé de glissance



Normalement, ce type de relevé est effectué en période estivale sur une surface propre et humide. Ainsi, la surface de la chaussée doit être brossée avant de procéder à l'essai. Un jet d'eau est envoyé à l'endroit où le sabot entre en contact avec la chaussée. La première mesure est rejetée. L'opérateur procède ensuite avec quatre nouvelles mesures qui sont consignées, en mouillant au préalable la surface avant chaque mesure.

Les relevés de glissance réalisés dans le cadre du présent mandat visaient à mesurer l'efficacité de divers produits d'entretien hivernal. Ainsi, l'essai devait être effectué sur la surface existante au moment de la mesure. Aucun nettoyage ni application d'eau ne fut effectué lors des essais hivernaux. Suite aux premiers essais, il fut convenu de noter toutes les lectures, y compris la première, celle-ci étant vraisemblablement plus représentative de l'état du site avant le premier balayage du sabot du pendule qui, par son action, peut chasser des débris (produit déglaçant, sable, copeaux de bois, neige, glace, etc.) présents à la surface du revêtement.

Des relevés de glissance hivernaux ont été effectués à 7 reprises par un technicien [REDACTED] soit les 8, 9, 12, 13 et 16 février 2018 ainsi que les 8 et 9 mars 2018. Lors des relevés, un représentant d'Arup était présent afin de localiser les emplacements des essais à effectuer. Typiquement, une première mobilisation était effectuée de nuit afin de réaliser des mesures peu avant ou après l'application d'un produit d'entretien hivernal. Une deuxième mobilisation était subséquemment effectuée le lendemain matin afin de réaliser des mesures après la période requise pour l'atteinte de l'efficacité du produit appliqué. Tous les sites d'essais étaient situés sur la piste cyclable en direction sud, dans les sections 2 ou 4 du pont. À chaque site d'essai, des mesures étaient effectuées à 3 emplacements transversalement sur la piste cyclable.

Un dernier relevé d'été a été effectué le 12 juin 2018 à une température ambiante de l'ordre de +18°C, sur une surface propre, en condition sèche et après application d'un jet d'eau, afin d'établir une base de comparaison se rapprochant des propriétés de glissance du revêtement bitumineux de la piste cyclable dans des conditions optimales d'utilisation en période estivale. Afin d'établir la propriété de glissance du site, les consignes de la norme ASTM E303-93 (Reapproved 2018) ont été appliquées en rejetant la 1^{re} lecture et en mesurant la moyenne des lectures 2 à 4 sur une surface mouillée.

2.2 Traitement des données

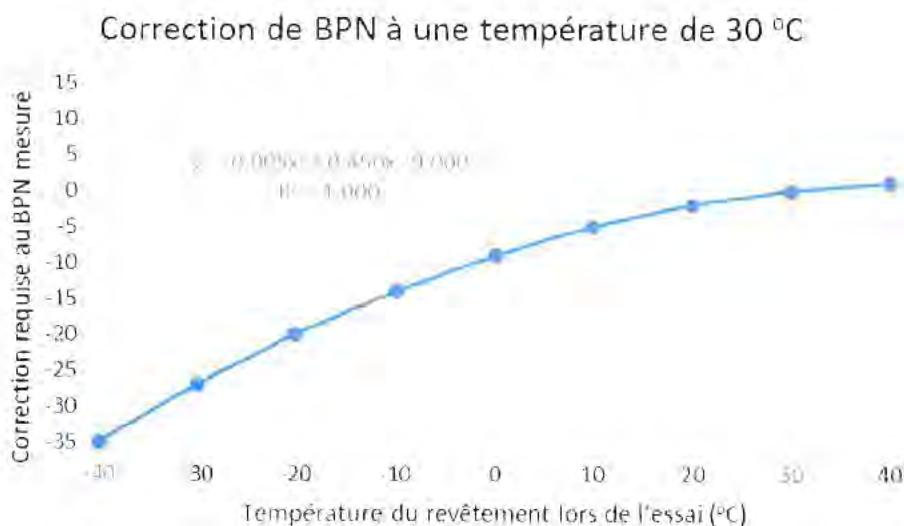
Le présent mandat prévoyait la fourniture des mesures au pendule britannique sous la forme de valeurs de BPN (British Portable tester Number) telles que lues sur l'appareil, accompagnées des mesures de la température de la surface au moment des essais. Toutefois, à la demande d'Arup, des mesures corrigées suite à l'application d'une correction de température suggérée par le manufacturier du pendule ont été fournies. De plus, une conversion des valeurs de BPN en coefficient de frottement a également été effectuée selon une relation établie par le MTMDET.

2.2.1 Correction de température

Les valeurs de BPN obtenues avec le pendule sont sensibles à la température du revêtement. En effet, les propriétés du caoutchouc du sabot du pendule varient quelque peu selon la température. À l'aide d'une relation fournie par le manufacturier, les valeurs de BPN mesurées sur le site ont été corrigées à une température de référence afin d'établir une base de comparaison commune. Une correction a été effectuée pour des températures de 0, 10 et 30°C. La figure 2 illustre la correction suggérée par le manufacturier pour une température de

référence du revêtement de 30°C au moment des essais, soit une température proche des 32°C et 33°C mesurées lors des relevés d'été du 12 juin 2018.

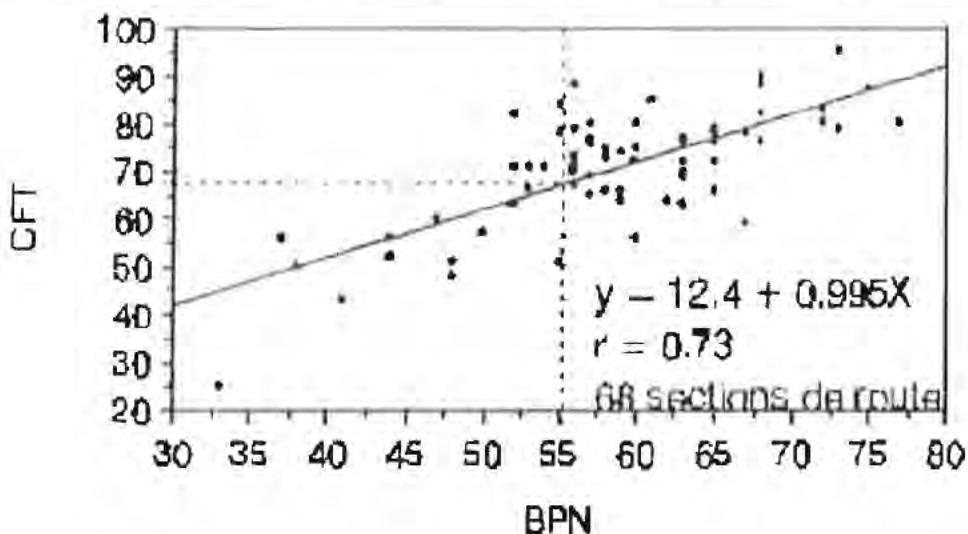
Figure 2 : Correction des valeurs de BPN à une température de référence de 30°C



2.2.2 Conversion des mesures de BPN en coefficient de frottement

Les valeurs de BPN mesurées sur la piste cyclable du pont Jacques-Cartier ont été converties en coefficient de frottement à l'aide d'une relation établie par le MTMDET (Réf. Bulletin d'information technique Vol. 1, no 5, janvier 1996, MTMDET). Cette relation a été établie à partir de données de CFT (coefficient de frottement transversal) mesurées à l'aide de l'appareil SCRIM en période estivale et des valeurs estivales de BPN du pendule britannique, recueillies sur 68 sections de route. Les valeurs de BPN mesurées sur la piste cyclable ont d'abord été corrigées à une température de 30°C puis converties en CFT selon la relation du MTMDET.

Figure 3 : Correction des valeurs de BPN à une température de référence de 30°C



3 Interprétation des mesures

Les résultats sont présentés de façon plus succincte au tableau de l'annexe 1 et en version numérique Excel plus détaillée sur le disque numérique à l'annexe 2. En plus des valeurs de BPN mesurées sur le site, le fichier Excel contient les valeurs corrigées à 0, 10 et 30°C. De plus, le fichier Excel contient une conversion en coefficient de frottement transversal (CFT) de la moyenne des premières lectures hivernales de BPN à chaque site (ou des lectures de BPN 2 à 4 après jet d'eau pour les relevés du 12 juin).

Tel que mentionné à la section 2.2.1, toutes les valeurs de BPN mesurées sur le site ont été corrigées à une température de référence de 30°C, soit une température proche de celles mesurées lors des relevés d'été du 12 juin 2018. Cette approche avait les objectifs suivants :

- mesurer les propriétés de glissance du revêtement bitumineux de la piste cyclable dans des conditions optimales d'utilisation en période estivale;
- établir une base de comparaison commune des mesures de BPN à une même température de référence;
- permettre une évaluation de la performance de divers produits d'entretien hivernal au niveau de la glissance, en comparaison avec les propriétés du site à l'été;
- obtenir des mesures de glissance que l'on peut apprécier par rapport aux suggestions ou recommandations que l'on retrouve dans la littérature, notamment de la part du manufacturier du pendule britannique ou du MTMDET par exemple.

Deux sites ont été retenus pour les mesures d'été du 12 juin.

Le premier site était situé sur la piste cyclable à la section 4, structure de signalisation LS-10 du pont. On y retrouve des dalles de béton préfabriquées en usine, soit un revêtement similaire à celui testé lors des relevés hivernaux, cependant la surface a été récemment recouverte d'une membrane en silane, présente au moment des relevés d'été du 12 juin. Sur ce site, on obtient un BPN moyen de 67,7 à la température de référence de 30°C, ce qui représente une bonne adhérence qui rencontre la valeur minimale suggérée par le manufacturier du pendule pour un site à condition difficile. Il est possible que la membrane silane ait réduit un peu l'adhérence de ce revêtement.

Le deuxième site était situé sur le trottoir à la section 1, structure de signalisation LS-15 du pont. On y retrouve du béton coulé in situ et fini à la truelle, donc un revêtement différent de celui ayant fait l'objet de mesures lors des relevés hivernaux. Sur ce site, on obtient un BPN moyen de 86,2 à la température de référence de 30°C, ce qui représente une excellente adhérence.

Nous présentons ci-après des suggestions du manufacturier ou du MTMDET pour l'interprétation des valeurs de BPN. Dans les deux cas, on réfère à des mesures au pendule britannique en période estivale et selon la norme ASTM E303-93 (Reapproved 2018), donc sur une surface propre et préalablement mouillée.

Le tableau 2 présente des valeurs minimales de BPN suggérée par le manufacturier du pendule selon la nature du site.

Tableau 1 : Valeur minimum de BPN estival suggérée par le manufacturier

Nature du site	BPN minimum suggéré
Conditions difficiles	65
Urbain > 2000 véhicules par jour	55
Autres sites	45

À la lumière du tableau 1, une valeur minimale de BPN corrigée à 30°C de 45 devrait être visée sur la piste cyclable. En comparaison, les mesures d'adhérence de l'hiver, corrigées à 30°C, varient entre 37,3 à 52,9.

À titre indicatif, le MTMDET suggère les valeurs de CFT estival suivantes pour la gestion de son réseau routier :

- 0,00 à 0,25 Très pauvre, pavage à corriger
- 0,25 à 0,40 Médiocre, intervention requise
- 0,40 à 0,55 Satisfaisant
- 0,55 à 0,70 Bon à très bon
- 0,70 à 0,99 Excellent, moyenne des pavages neufs

4 Résultats livrables

Dans le cadre de ce mandat, les résultats livrables suivants sont inclus au rapport.

D'abord, l'annexe 1 présente les principaux résultats des mesures de glissance.

Un fichier Excel avec les résultats détaillés est fourni au fichier nommé *024-B-0018835-1-CH-0001-00_Résultats.xlsx* situé dans le répertoire « Résultats » du disque numérique à l'annexe 2 du rapport.

Enfin, les photos prélevées lors des relevés sont livrées dans le répertoire « Photos » sur le même disque numérique en annexe.

A3.4 Rapports photographiques et suivi d'évolution des essais

FICHE DE CONTRÔLE

Contrat : 259172

Fiche N° : 6

Titre : Maintenance Hivernale de la Piste Cyclable du Pont Jacques Cartier (PJCCI)

Nom :	XXXXXXXXXX	Date :	<u>2018 / 02 / 07</u>
Température :	<u>-23°C</u>	Facteur vent :	<u>-26°C</u>
Vent :	<u>15 km/h</u>	Rafales :	XXXXXXXXXX
Pression atmosphérique :	<u>102.71 kPa</u>	Humidité :	<u>65%</u>
Conditions météorologiques :	<u>Aucune précipitation pendant</u>		
Personnes présentes lors des essais :	XXXXXXXXXX		

Etat des lieux

Environ 15 - 35 cm de neige accumulée avant le déneigement

Une partie de la neige provient de l'autoroute

Conditions météorologiques similaires à celles prévues ;

Début des opérations à 20:00 et fin à 02:00

Scénario amélioré :

- soufflage (largeur complète de la piste cyclable, le véhicule avançait et reculait au fur et à mesure pour coordonner son passage avec le camion de déneigement sur l'autoroute) ;
- 2 passages avec la pelle ;
- épandage du Produit C ;
- épandage du Produit I

Test - Produit N° 1

Nom du produit N° 1 : Produit C

Application : ouverture minimale mais la sortie était pratiquement bouchée, dû peut-être à l'humidité ou compression du sel

Remarques additionnelles : contient du sel gemme

Constatation sur le terrain : pas assez de produit répandu pour en tirer une conclusion

Test - Produit N° 2

Nom du produit N° 2 : Produit I

Application : le taux d'application est indiqué à l'aide d'une jauge de pression (6.5 psi noté lors de l'épandage)

Remarques additionnelles : contient du chlorure de magnésium qui a un grand potentiel corrosif

Selon le fabricant : le point de congélation très bas. Après l'enlèvement de la neige, le liquide déglaçant permet d'accélérer la fonte de la neige qui reste sur la chaussée, sans laisser de résidu granulaire

Constatation sur le terrain : en tenant compte de la quantité de neige importante, une légère application du produit laisse des traces visibles mais n'est pas assez efficace

Conclusion

Processus très lent (soufflage débute à 20:00 et s'achève vers 00:00)

La quantité de produit utilisée insuffisante ;

Complications :

Fuite hydraulique vers 00:00 qui a causé un peu de retard ;

Sortie bloquée lors de l'épandage du sel amélioré

Conclusion : avec un cumul de neige de 15 à 35 cm, il faudrait utiliser beaucoup plus de produit

Complétée par :

2018-02-07

Date

Photos – État des lieux	
	
Description : Qualité de la surface avant le déneigement	Description : Qualité de la surface après le passage de la souffleuse
	
Description : Qualité de la surface après le 1er passage de la pelle	Description : Qualité de la surface après le 2ème passage de la pelle
Description :	Description :

Photos – Produit N° 1	
	
Description : Epandage avec ouverture minimale	Description : Qualité de la surface juste après l'épandage (pratiquement <u>pas de col à sauter d'une complication avec l'ouverture de</u>)
	
Description : Qualité de la surface juste après l'épandage <u>/ sans toutefois déceler de col à sauter d'une complication</u>	Description :
Description :	Description :

Photos – Produit N° 2

Description :	Description :
6.5 psi pendant l'épandage (0 quand le véhicule est stationné.)	Qualité de la surface juste après l'épandage
	
Description :	Description :
Qualité de la surface juste après l'épandage	



FICHE DE CONTRÔLE

Contrat : 259172

Fiche N° : 8

Titre : Maintenance Hivernale de la Piste Cyclable du Pont Jacques Cartier (PJCCI)

Nom : [REDACTED]	Date : <u>2018 / 02 / 07</u>		
Température : <u>1°C</u>	Facteur vent : <u>-3°C</u>	Vent : <u>36 km/h</u>	Rafales : <u>Oui</u>
Pression atmosphérique : <u>99.30 kPa</u>	Humidité : <u>95%</u>	Date de la fiche antérieure : <u>2018 / 01 / 24</u>	
Conditions météorologiques : <u>Pluie verglaçante</u>		[REDACTED]	
Personnes présentes lors des essais :			
État des lieux			
Environ 2 - 5 cm de neige accumulée avant le déneigement ; Verglas de 30 mm sur une couche de neige (sandwich de neige) ; Conditions météorologiques similaires à celles prévues ; Début des opérations à 21:00 et fin à 00:00 Suivi le lendemain de 14:00 à 15:30 Neige non dégagée et coincée entre la dalle et la couche de verglas, facile à enlever avec la pelle ; Pluie verglaçante en journée, le timing a été excellent Procédure : • 2 passages avec la lame ; le 1er pour casser la croute de verglas sur la neige et la neige coincée entre la dalle et la croute de glace ;			
Test - Produit N° 1			
Nom du produit N° 1 : <u>Produit A</u> Application : bris de la machine qui a empêché de faire un épandage uniforme (seulement sur deux travées du pont) ; Environ 30% utilisé Remarques additionnelles : sel gemme pur sans ajout, sans activation, efficacité moyenne ; Constatation sur le terrain : stratégie de verglas "sandwich de neige", c.-à-d. laisser la neige s'accumuler sans l'enlever facilite l'enlèvement subséquent de glace et de neige mais laisse des morceaux de glace qui pendent dangereusement au dessus des voies			
Test - Produit N° 2			
Nom du produit N° 2 :			
Conclusion			
Sandwich de glace est une bonne méthode pour les tempêtes de verglas, sous condition qu'il soit installée une protection contre la chute des blocs de glace en dessous des voies ; Plusieurs blocs de glace pendent dangereusement sur les voies de circulation ; Situation dangereuse : on recommande d'ajouter une lisse rigide par le dessous de la clôture afin d'éviter la chute des morceaux de glace Suivi : sel inefficace pour des conditions météo semblables (tempêtes de verglas avec une forte baisse de			

Complétée par :

2018-02-07

Date

Photos – État des lieux			
		Description : Qualité de la surface avant le déneigement	Description : Morceau de glace avant le déneigement
		Description : Verglas sur le haut du garde-corps qui pose un risque pour les cyclistes	Description : Jour du suivi : verglas (étendu) sur le haut du garde-corps qui pose un risque pour les cyclistes
		Description : Qualité de la surface après le passage de la pelle	Description : Qualité de la surface pendant le jour du suivi

Photos – Produit N° 1			
		Description : Qualité de la surface après l'épandage	Description : Morceau de glace au dessus de la route qui pose un grand risque pour les automobilistes en dessous.
		Description : Qualité de la surface après l'épandage (vue agrandie)	Description : Sel et neige gelés
Description :	Description :		

Photos – Produit N° 2	
Description :	Description :
Description :	Description :
Description :	Description :

FICHE DE CONTRÔLE

Contrat : 259172

Fiche N° : 11

Titre : Maintenance Hivernale de la Piste Cyclable du Pont Jacques Cartier (PJCCI)

Nom :	<u>[REDACTED]</u>	Date :	<u>2018 / 02 / 07</u>
Température :	<u>-7°C</u>	Facteur vent :	<u>-10°C</u>
Vent :	<u>5 km/h</u>	Rafales :	<u>[REDACTED]</u>
Pression atmosphérique :	<u>100.44 KPa</u>	Humidité :	<u>85%</u>
Conditions météorologiques :	<u>Neige légère/poudrerie penda</u>		
Personnes présentes lors des essais :	<u>[REDACTED]</u>		

Etat des lieux

Environ 2 - 3 cm de neige accumulée avant et pendant le déneigement ;
 Conditions météorologiques similaires à celles prévues ;
 Début des opérations à 21:00 et fin à 23:00
 Suivi le jour du lendemain de 14:00 à 15:30
 Procédure - Scénario de base (rapide) :
 • Un passage avec la lame ;
 • Epandage du produit J ;
 • Cumul d'une fine pellicule de neige ;
 • Flaques de glace à certains endroits
 A noter aussi que l'équipe d'entretien a localisé/marqué les drains avec des rubans attachés aux garde-corps et ont

Test - Produit N° 1

Nom du produit N° 1 : Produit J

Application : 60 gallons du produit répandu sur la section 2, 3 et 4 au complet ;
 Remarques additionnelles : produit constitué de chlorure de calcium liquide qui possède un grand potentiel corrosif.
 Selon le fabricant : il a été spécialement conçu pour les pistes cyclables et adapté aux climats rudes
 Constatation sur le terrain : avec un jet sous pression (max), il en résulte une formation de traces de produits, pas de dispersion (à changer les buses de la citerne pour obtenir un jet « éventail »)

Test - Produit N° 2

Nom du produit N° 2 : [REDACTED]

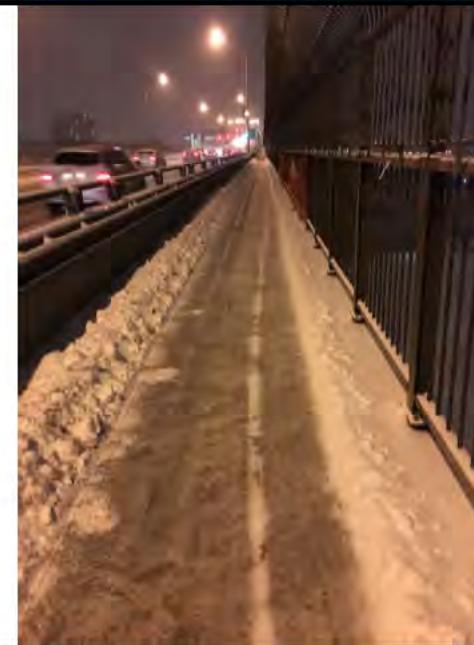
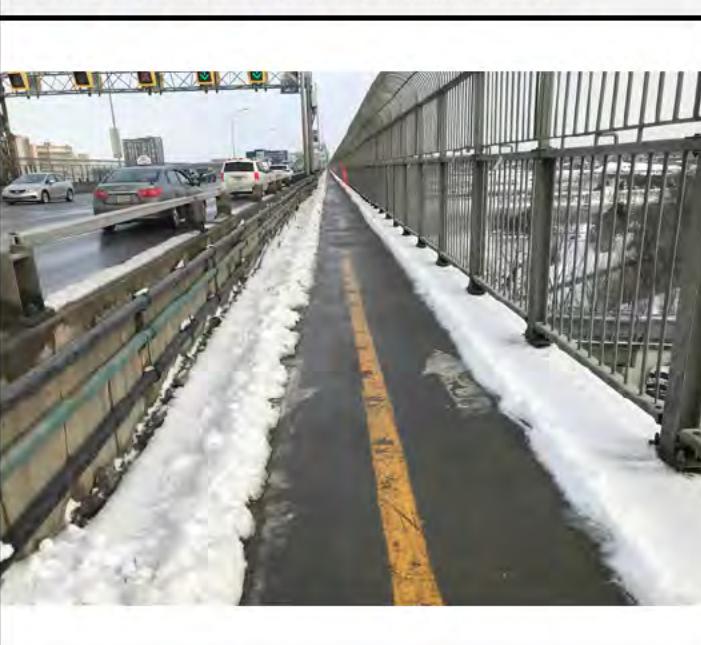
Conclusion

Neige légère sur flaques de glace à quelques endroits. Les buses de la citerne ne sont pas adéquates (jet sous pression au lieu de "fan spray"). Faible glissement sur les chemins du liquide, glissant entre eux (neige non fondu) ;
 Suivi : Surface sèche (S3), béton visible (la plupart des sections) et flaques d'eau (points bas où il y a une accumulation d'eau et de sloche). Application/produit très efficace mais il faut aussi prendre en compte les conditions météorologiques favorables (un peu de soleil en mi-journée et température assez élevée l'après-midi) qui ont sans

Complétée par :

2018-02-07

Date

Photos – État des lieux			
		Description : Qualité de la surface avant le déneigement	Description : Qualité de la surface après le passage de la pelle
		Description : Qualité de la surface après l'épandage du produit J	Description : Qualité de la surface pendant le jour du suivi
Description :	Description :		

Photos – Produit N° 1			
		Description : Qualité de la surface juste après l'épandage	Description : Qualité de la surface 5 minutes après l'épandage
		Description : Qualité de la surface 10 minutes après l'épandage	Description : Qualité de la surface pendant le jour du suivi
Description :	Description :		

Photos – Produit N° 2	
Description :	Description :
Description :	Description :
Description :	Description :
Description :	Description :

A4 Annexe – Durabilité

A4.1 Note technique : Service Life Model

A4.1.1 Design life

This note considers that the end of service life of a reinforced concrete member is verified when the limit state of depassivation or initiation of reinforcement corrosion is met.

A4.1.2 Durability model

The ingress of chloride in a marine atmosphere environment can be assumed to follow a modified Fick's second law of diffusion, and to obey the following equation:

(1)

Where:

- C_0 is the initial chloride content [wt.-%/c]
- $C_{s,\Delta x}$ is the chloride content at the depth Δx [wt.-%/c]
- Δx is the depth of the convection zone (concrete layer up to which the process of chloride penetration differs from Fick's 2nd law of diffusion) [mm]
- a is the concrete cover to the reinforcement [mm]
- x is the depth with a corresponding content of chloride $C(x,t)$ [mm]
- k_e is the environmental transfer variable, defined by Eq. (2)

(2)

Where:

- b_e is the regression parameter [K]
- T_{ref} is the reference temperature [K]
- T_{real} is the temperature of the environment [K]
- t is the time [years]
- $D_{app}(t)$ is the apparent chloride diffusion coefficient [m^2/s]

The apparent chloride diffusion coefficient is regarded as a time dependent variable and is determined by Eq. (3) adopting references available from the technical literature. Nevertheless further testing could improve the accuracy of the predicted ingress.

(3)

where

$D_{app,0}$ is the non-steady state, chloride diffusion coefficient of water-saturated concrete prepared and stored under predefined conditions, determined at reference age t_0 [m^2/s]

$D_{RCM,0}$ is the rapid chloride migration coefficient, determined at reference age t_0 [m^2/s]

t_0 is the reference age e.g. 28 days [seconds or years]

t is the concrete age [seconds or years]

α is the relationship of time-dependent diffusion coefficient with time (age factor) [-]

Generically the probabilistic model considers the following family of parameters that are to be statistically defined:

Material: , C_0

Environmental: T_{real} , $C_{s,\Delta x}$

Exposure time: t

Test: k_e , k_t

Geometry:

The apparent chloride diffusion coefficient at any given time is dependent on various factors including:

cementitious materials composition and consequent continued hydration and pozzolanic reactions

exposure time

degree of saturation of the concrete

the effect of any time-dependent pore blocking within the surface layer of the concrete

temperature

A4.1.3 Exposure environment and basic variables

The concrete is assumed to be exposed to chloride based deicers. A nominal concrete cover to galvanized steel reinforcement of 2 inch (50 mm) is assumed. The drawing notes also depict the use of *Silica fume* concrete to a max. water-to-cement ratio between 0.40.

A4.1.4 Durability design verification methodology

The durability design was checked using Arup's in house Probabilistic Durability Modelling Tool. This is a full probabilistic method developed in accordance with the *fib* Model Code for Service Life Design [1]. The reliability of the output has

been checked against similar models developed by other members of the fib Technical Committee to which we belong.

The target reliability index employed is 1.3, corresponding to a probability level of 10%, in consideration of the consequences of failure following de-passivation of the reinforcement. This limit is appropriate of an irreversible serviceability limit state and is in accordance with *fib-34*⁶⁷.

A4.1.5 Durability design verification

A4.1.5.1 Assumptions

The durability limit state is defined by the initiation of reinforcement corrosion (de-passivation), reached when a critical chloride content is exceeded at the rebar surface causing disruption of the protective passive oxide layer. At this stage, no corrosion-induced deterioration will have yet occurred in the structure. In the analysis, no account is taken of any additional protection against corrosion initiation provided by the use of surface sealers which might have been applied, since it is not clear whether these products offer an effective degree of protection. Moreover, and to introduce some conservatism in the analysis, the chloride concentration on the surface of the concrete is assumed to reach its ultimate value instantaneously, rather than increase progressively with time.

Typical values for initial chloride diffusion coefficient and ageing factor have been selected based on published guidance, review of literature and engineering judgement based on experience. Two values for chloride surface concentration have been used to represent two degrees of exposure:

- Spray from nearby road: 2.0%-wt/cem.
- Splash (vertical elements): 3.0%-wt/cem (when salt is spread in the bike path)
- surface runoff: 4.0%-wt/cem (when salt is spread in the bike path)

The intent is to represent pessimistic exposure scenarios. These assumptions can be confirmed by evaluating the chloride profile data available.

A4.1.5.2 Calculation

To assess the initiation period, the mathematical model described in Eq. (1) is used to estimate the time and depth-dependant chloride concentration $C(x,t)$ in the concrete, based on the error function solution of Fick's second law of diffusion in one-dimensional form.

Adopting reliability analysis methods, the limit state function as defined by Eq. (4) is calculated at 5-year increments. The end of service life is highlighted when the limit probability of failure of approx. 10% is exceeded or, by contrast, if a reliability index of less than 1.3 at 100 years is achieved.

⁶⁷ fib bulletin no. 34, Model Code for Service Life Design (MC-SLD), International Federation for Structural Concrete (fib), Case Postale 88, CH-1015 Lausanne, Switzerland. 2006

$$p\{\} = p_{dep.} = p\{C_{crit}, C(x=a, t_{SL})\} = p\{C_{crit} - C(x=a, t_{SL}) < 0\} < p_0 \quad (4)$$

Where:

- $p\{\}$ is the probability that de-passivation occurs
- C_{crit} is the critical chloride content [wt.-%/binder content]
- $C(a, t_{SL})$ is the chloride content at the depth $x=a$ (concrete cover) and time t [wt.-%/binder content]
- a is the concrete cover [mm]
- t_{SL} is the design life [years]
- p_0 is the target value for failure probability

The selected values and statistical distributions for the durability modelling input parameters are shown in Tableau 1.

Tableau 1: Input parameters, variables and distributions used for full probabilistic analysis

Parameter	Variable	Dist.	Values	Unit	Ref.
Non steady state chloride diffusion coefficient design values:					
Chloride migration coefficient	$D_{cm,0}$	Normal	$\mu=4.0, \sigma=0.2\cdot\mu$ $\mu=0.4, \sigma=0.2\cdot\mu$	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	[2] [-]
Reference point of time	t_0	Constant	28	days	[1]
Ageing factor					
Ageing factor	a	Beta	$\mu=0.40, \sigma=0.16\cdot\mu, a=0, b=1$	-	[2]
Temperature effects					
Reference temperature for laboratory tests	T_{ref}	Constant	293.15	K	[1]
Real temperature of the structural element	T_{real}	Normal	$\mu=278.4, \sigma=10.9$	K	[-]
Environmental variable	b_e	Normal	$\mu=4800, \sigma=700$	-	[1]
Concrete cover					
Concrete cover to reinforcement	a	Normal	$\mu=50.0, \sigma=15.0/1.64$ $\mu=50.0, \sigma=10.0/1.64$ (vertical)	mm	[-]
Initial chloride content of concrete					
Initial chloride content	C_0	Normal	$\mu=0.055, \sigma=0.028$	wt.-%/cem.	[3]
Chloride content					
Convection depth	Spray or surface runoff	Δx	Constant	0	mm [1]
	Splash / wetting-drying effects		Beta	$\mu=8.9, \sigma=5.6, a=0, b=50.0$	mm [1]
Surface chloride concentrations					
		$C_{\Delta x}$	Lognormal	(C-1.2) $t < 15$ years, spray $\mu=2.0, \sigma=0.75\cdot\mu$ (C-1.2) $t > 15$ yr, deck $\mu=4.0, \sigma=0.75\cdot\mu$ (C-1.3) $t > 15$ yr, glissière $\mu=3.0, \sigma=0.75\cdot\mu$	wt.-%/cem. [2]
Critical chloride concentration					
Conventional steel reinforcement	C_{crit}	Beta	$\mu=1.2, \sigma=0.30, a=0.6, b=3.0$	wt.-%/cem.	[4]

Parameter	Variable	Dist.	Values	Unit	Ref.
Design life					
Time	SL	Constant	5-year increments until 75 years	years	[•]

The evolution of the probability of de-passivation of reinforcement (ignoring the influence of any surface sealer) is analysed at 5-year increments for concrete surfaces exposed to chloride based deicers. The results have been calculated adopting the First Order Reliability Method (FORM), which is an analytical method, and provides conservative answers. Monte Carlo simulation methods would have offered a slightly lower probability result.

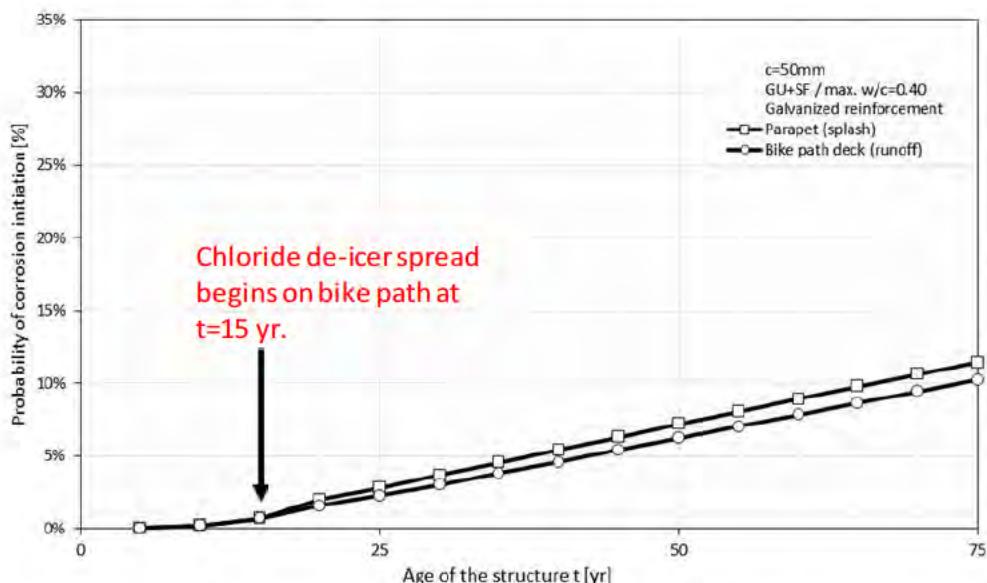


Figure 1. Probability of corrosion initiation analysed at 5-year increments considering the exposure conditions.

Référence :

- > S. Lay, Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion Baustein eines Systems zum Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken, München: Technischen Universität München, 2005

A5 Annexe - Environnement

A5.1 Revue réglementaire

Annexe 1

Lois et règlements potentiellement applicables lors de l'épandage des produits déglaçant

FÉDÉRAL

Le fleuve St-Laurent étant un habitat de poisson, la Loi sur les pêches s'applique et notamment les articles 35(1) et 36(3).

Article 35 (1)

« Il est interdit d'exploiter un ouvrage ou une entreprise ou d'exercer une activité entraînant des dommages sérieux à tout poisson visé par une pêche commerciale, récréative ou autochtone, ou à tout poisson dont dépend une telle pêche. »

Article 36 (3)

« Sous réserve du paragraphe (4), il est interdit d'immerger ou de rejeter une substance nocive — ou d'en permettre l'immersion ou le rejet — dans des eaux où vivent des poissons, ou en quelque autre lieu si le risque existe que la substance ou toute autre substance nocive provenant de son immersion ou rejet pénètre dans ces eaux. »

Définition de substance nocive aux articles 34(1a) et 34(2) de la Loi sur les pêches :

Article 34(1a)

« Toute substance qui, si elle était ajoutée à l'eau, altérerait ou contribuerait à altérer la qualité de celle-ci au point de la rendre nocive, ou susceptible de le devenir, pour le poisson ou son habitat, ou encore de rendre nocive l'utilisation par l'homme du poisson qui y vit. »

Article 34(2)

Pour l'application de la définition de substance nocive au paragraphe (1), le gouverneur en conseil peut, par règlement : a) désigner certaines substances ou catégories de substances; b) fixer les quantités ou concentrations de certaines substances ou catégories de substances admissibles dans l'eau; c) désigner certains traitements ou transformations qui, apportés à l'eau, en font une substance nocive.

PROVINCIAL

Loi sur la qualité de l'environnement (LQE)

Article 20

« Nul ne doit émettre, déposer, dégager ou rejeter ni permettre l'émission, le dépôt, le dégagement ou le rejet dans l'environnement d'un contaminant au-delà de la quantité ou de la concentration prévue par règlement du gouvernement.

La même prohibition s'applique à l'émission, au dépôt, au dégagement ou au rejet de tout contaminant, dont la présence dans l'environnement est prohibée par règlement du gouvernement ou est susceptible de porter atteinte à la vie, à la santé, à la sécurité, au bien-être ou au confort de l'être humain, de causer du dommage ou de porter autrement préjudice à la qualité du sol, à la végétation, à la faune ou aux biens. »

Article 22

« Nul ne peut ériger ou modifier une construction, entreprendre l'exploitation d'une industrie quelconque, l'exercice d'une activité ou l'utilisation d'un procédé industriel ni augmenter la production d'un bien ou d'un service s'il est susceptible d'en résulter une émission, un dépôt, un dégagement ou un rejet de contaminants dans l'environnement ou une modification de la qualité de l'environnement, à moins d'obtenir préalablement du ministre un certificat d'autorisation. »

Définition de contaminant selon la LQE

« Une matière solide, liquide ou gazeuse, un micro-organisme, un son, une vibration, un rayonnement, une chaleur, une odeur, une radiation ou toute combinaison de l'un ou l'autre susceptible d'altérer de quelque manière la qualité de l'environnement. ».

A5.2 Note technique : Discussion of the Environmental Effects and Mitigation for the De-icing Application of Road Salt

Discussion of the Environmental Effects and Mitigation for the De-icing Application of Road Salt

BY: [REDACTED] Senior biologist [REDACTED]

DATE: January 30, 2018

In Canada there is a prohibition against depositing a deleterious substance into surface or groundwater, and this is regulated by Environment Canada (EC). From the Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME, 2011): "The Priority Substances List Assessment Report for Road Salts was published on December 1, 2001 (Environment Canada 2001). The report concluded that road salts that contain inorganic chloride salts with or without ferrocyanide salts (anticaking agent) have adverse impacts on the environment, and are therefore toxic under subsections 64(a) and (b) of the Canadian Environmental Protection Act, 1999 (CEPA 1999)". Environment Canada considered listing it as a prohibited substance.

The CCME Guidelines for Chloride are reproduced verbatim in the following table from the Chloride Guidelines for protection of aquatic life (CCME, 2011):

Table 1. Canadian Water Quality Guideline for the Chloride ion^a for the protection of aquatic life.

	Long-Term Exposure ^b (mg Cl/L)	Short-Term Exposure ^c (mg Cl/L)
Freshwater	120 ^d	640
Marine	NRG	NRG

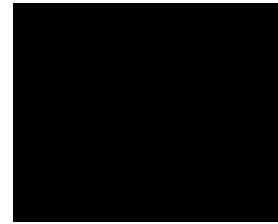
NRG = no recommended guideline.

^aChloride toxicity to freshwater organisms was evaluated using tests with both CaCl₂ and NaCl salts.

^bDerived with mostly no- and some low-effect data and are intended to protect against negative effects to aquatic ecosystem structure and function during indefinite exposures (e.g. abide by the guiding principle as per CCME 2007).

^cDerived with severe-effects data (such as lethality) and are not intended to protect all components of aquatic ecosystem structure and function but rather to protect most species against lethality during severe but transient events (e.g. inappropriate application or disposal of the substance of concern).

^dThe long-term CWQG may not be protective of certain species of endangered and special concern freshwater mussels (as designated by the Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada, or COSEWIC). This specifically applies to two species; the wavy-rayed lampmussel (*Lampsilis fasciata*) (COSEWIC 2010a) and the northern riffleshell mussel (*Epioblasma torulosa rangiana*) (COSEWIC 2010b) (Table 2). The wavy-rayed lampmussel is indigenous to the lower Great Lakes and associated tributaries, specifically western Lake Erie, the Detroit River, Lake St. Clair and several southwestern Ontario streams. The northern riffleshell mussel is indigenous to the Ausable, Grand, Sydenham and Thames Rivers in Ontario, as well as the Lake St. Clair delta. Discussion with provincial regulators should occur if there is a need to develop more protective site specific values.



Because road salt is widely available, inexpensive and effective as a road de-icer, it was decided that the safety benefits justified its usage. Rather than ban road salt (NaCl), a decision was made to develop guidelines for its use to minimize its environmental effects. In April 2004 of a Code of Practice for the Environmental Management of Road Salts was published. From CCME (2011): "This Code of Practice is aimed at helping municipalities and other road authorities better manage their use of road salts in a way that reduces the harm they cause to the environment while still maintaining road safety". Municipalities, institutions and business's than apply more than 500 tonnes of NaCl annually would be required to report usage annually and implement plans that minimized the usage while maintaining road safety as paramount.

As a result, most municipalities and all provinces in Canada have developed salt management plans and have been reporting salt usage annually since (around) 2006 (Spencer, New Brunswick Dept. of Transportation and Infrastructure <NBTDI> engineer, pers. comm.). These municipalities/Provinces would own the vast majority of bridges in Canada while some would be owned by the federal government or private enterprises. All bridge-owning entities require a salt management plan if they apply more than 500 tonnes of salt annually. The vast majority of bridges in Atlantic Canada (and probably all of Canada) apply NaCl directly on the bridge decking for de-icing purposes to maintain a safe driving surface during inclement weather.

Salt management plans utilize a wide variety of practices to reduce salt storage, some of the more common approaches are listed below:

- Pre-wet salt application – a brine is sprayed on the rock salt to make it freeze to the road/trail/sidewalk so the salt stays where it is needed and does not roll/bounce to the side of the road/trail/sidewalk.
- Anti-icing – brine is applied directly on the road/trail/sidewalk in advance of freezing precipitation to prohibit ice formation and avoid the quantities of salt required to break-up the ice once formed
- Other salts (like CaCl) are more effective in lower temperature regimes, and can reduce salt application rates in very cold conditions
- Some jurisdictions utilize starchy vegetable juices (beet juice for example) as a de-icer with good results, while the starch adds minimal CBoD to the waterway it does not add salt.
- Usage of road weather information systems to assist in decision making processes for timing and application rates of road salt.

Environmental guidelines for chloride (Cl⁻) in aquatic habitats vary widely, with multiple sources. In New Brunswick (NB) there are no specific guidelines for the use of road salt on bridges (Cunningham, NBTDI engineer, pers. comm.). However, in NB, 150 mg/L is considered a rule-of-thumb level at which the Province of NB considers aquatic impacts occur (Spencer, pers. comm.).

Rivers and streams that discharge to oceans are less sensitive than those that discharge to freshwater lakes or significant wetlands. Discharges to groundwater, while less common, present greater challenges, as drinking-water guidelines may apply (250 mg/L), and groundwater tends to be very slow moving with NaCl accumulating due to the lack of dilution. The nature of a bridge suggests that surface water, not groundwater, is the principle concern.



Aside from physiological impacts to fish, invertebrates and/or plants from chloride contamination due to road salt application to the natural environment, there is a physical threat from road salt that is applied near wetlands and lakes, which are more sensitive than rivers and streams (as long as they do not themselves discharge into wetlands/lakes). Salty water is more dense than fresh water and will tend to accumulate at the bottom of slow moving water that cannot flush it out. This makes these waterbodies so-called salt “vulnerable areas” (Environment Canada, 2012).

The physical process involves the pooling of dense salt water on the bottom of lentic waterbodies. As the denser water accumulates at the bottom of a lake (for example) it can inhibit the “turn over” of that lake which normally occurs twice annually. Without salt being added, lakes generally de-stratify as the surface water cools or warms, and approaches the 4°C temperature at which point fresh water on the bottom is at its most dense. When the density difference between the overlying water and the 4°C becomes minimal, wind driven mixing can bring the water column to a homogenous temperature. If the water at depth is dense due to a combination of temperature and salt content, physical mixing can be inhibited, and the sediments do not receive enough dissolved oxygen (DO). What little DO is provided through diffusion is quickly used up, and the sediment and bottom water layer becomes anaerobic. Anaerobic decomposition of settled organic material can result in the production and release of poisonous gases (H_2S or methane) that can kill the typical aerobic life forms in the waterbody. For this reason, more stringent guidelines for Chloride concentrations are justifiable for salt deposited near slow-moving waterbodies or lakes and ponds. These guidelines can be relaxed for roads and bridges where run-off enters flowing rivers.

References

Canadian Council of Ministers of the Environment. 2011. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: Chloride. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.

Environment Canada. 2012. Five-year review of progress : Code of practice for the environmental management of road salts. https://www.ec.gc.ca/sels-salts/default.asp?lang=En&n=45D464B1-1#sec_exec.

A6 Système de chauffage

A6.1 Projet pilote – Tapis chauffants





A6.2 Essai de performance tapis chauffants en atelier

2018-02-06

Rapport de visite

ARUP

600 Boulevard de Maisonneuve Ouest
Bureau 750
Montreal QC H3A 3J2
Canada
www.arup.com

t +1 514 448 6694

Titre du Projet	Maintenance Hivernale de la Piste Cyclable du Pont Jacques-Cartier	Numéro de projet
		259172

Préparé par	[REDACTED]	Fichier de référence
-------------	------------	----------------------

cc	Omar Moussa, Emmanuelle Hoga, Moctar Sidibé	Date
		2018-02-06

Sujet	Essai de performance des tapis chauffants
-------	---

Ce rapport de visite a été préparé suite aux essais de performance des tapis chauffants qui ont eu lieu au pavillon de l'Île Sainte-Hélène (P.I.S.H.) le 6 février 2018.

Ce qui suit fournit un résumé des observations relevées lors des essais :

- Date : 6 février 2018 (mardi)
- Time : 15h30 à 16h30
- Emplacement : Pavillon de l'Île Sainte-Hélène (P.I.S.H.)
- Température : -6°C, ciel couvert
- Personnel on site : Emmanuelle Hoga (PJCCI), Moctar Sidibé (PJCCI), Christian Thibault (PJCCI), Emanuel Chênevert (PJCCI), représentant du fournisseur, [REDACTED] (Arup), Omar Moussa (Arup).
- Observations :
1. Trois prototypes de tapis chauffants ont été installés et testés à l'intérieur du P.I.S.H. Ces derniers avaient une puissance de 50 W/pi², 70 W/pi² et 90 W/pi² respectivement (voir Figure 1).
 2. Un test mécanique où le camion de déneigement de la piste cyclable circule sur les tapis chauffants a été effectué. Une légère déformation au centre des tapis a été observée ainsi qu'un soulèvement des coins du tapis (voir Figure 2).
 3. Les tapis ont été mis en marche à 15h20. Le Tableau 1 ci-dessous présente la température des divers tapis au fil du temps suite à leur activation. La température du sol était de -8°C.

Rapport de visite

259172

2018-02-06

Tableau 1 Augmentation de la température lors de la période d'activation

	50W/pi ²	70W/pi ²	90W/pi ²
5 minutes	10°C	13°C	16°C
10 minutes	13°C	20°C	24°C
15 minutes	14°C	25°C	30°C
20 minutes	16°C	22°C	35°C
25 minutes	28°C	32°C	37°C

4. Les tapis ont été emboités l'un dans l'autre et attachés entre eux avec des vis. Il est questionable si les vis vont demeurer en place sous les vibrations du pont. Il faudra vérifier ceci lors des essais sur le pont.
5. Des essais de puissance (c.-à-d. fonte de neige) ont été effectués sous différentes quantités de neige. Comme prévu, le tapis à 90W/pi² chauffe plus vite et atteint un différentiel de température plus important que les autres tapis (autour de 45°C). Cette valeur est plus basse que celle fournie par le fournisseur. De plus, il est prévu que ce différentiel soit réduit lors des essais sur le pont en conditions réels et moins contrôlées.
6. Il a été observé que sous une mince poudrerie de neige, les tapis fondent la neige aisément, surtout celui à 90W/pi². Ceci simule la situation où les tapis sont activés avant une tempête de neige. Une performance adéquate a été observée, mais ceci demeure à être confirmer lors des épisodes de tempêtes intenses.
7. Sous une charge plus importante de neige, les tapis peinent à faire fondre la neige (Figures 5 à 8). Ceci simule la situation où les tapis sont activés après une tempête de neige où suite à une quantité de neige importante projetée de la voie 1 à la piste cyclable. Après 25 minutes de chauffe, un monticule de neige était toujours présent sur chacun des tapis. Néanmoins, le diamètre du monticule réduit avec le temps aux endroits où l'épaisseur de neige est moindre. Il est donc privilégié d'activer les tapis avant un épisode de neige ou de combiner les tapis chauffants à un déblayage mécanique.

Rapport de visite

259172

2018-02-06

8. Il a été observé que de l'eau se forme sur les tapis suite à la fonte de la neige. Cette eau s'évapore progressivement des tapis avec le temps. Le tapis de 90 W/pi^2 s'assèche considérablement plus rapidement que le tapis de 50 W/pi^2 (voir Figures 5 à 7). Il est donc suggéré que lors des essais, les tapis demeure activée suite à la fonte de la neige et suite aux tempêtes pour permettre aux tapis de s'assécher et prévenir la formation de glace.

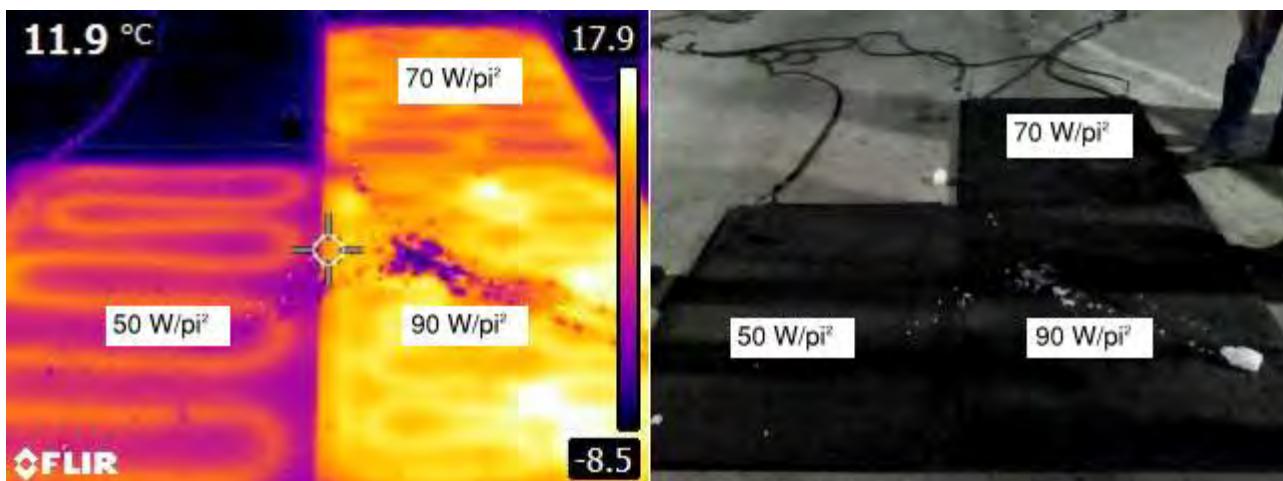


Figure 1 Configuration des tapis chauffants à l'essai (durant la période d'activation)



Figure 2 Soulèvement du coin des tapis dû au passage du camion de déneigement

Rapport de visite

259172

2018-02-06



Figure 3 Test de fonte - une minute d'intervalle

Rapport de visite

259172

2018-02-06

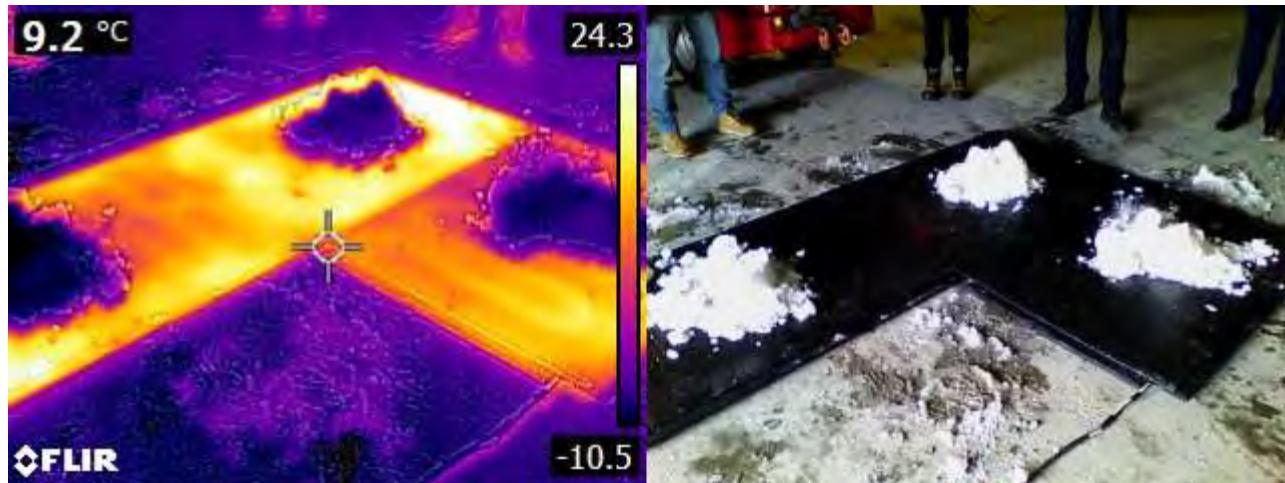


Figure 4 Test de fonte sous une quantité importante de neige

Rapport de visite

259172

2018-02-06

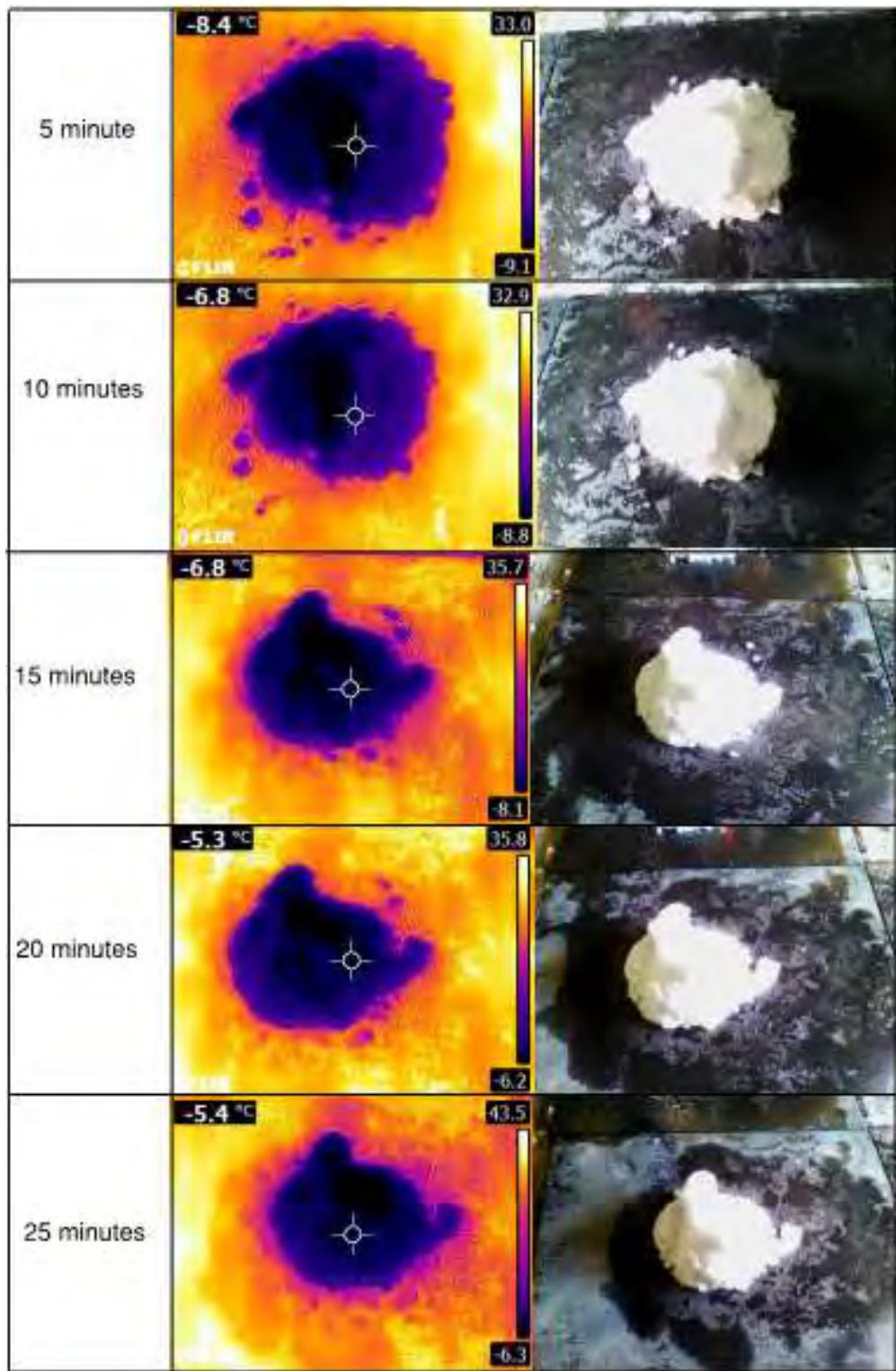


Figure 5 Fonte progressive tapis 90W/pi2 sous une quantité importante de neige

Rapport de visite

259172

2018-02-06

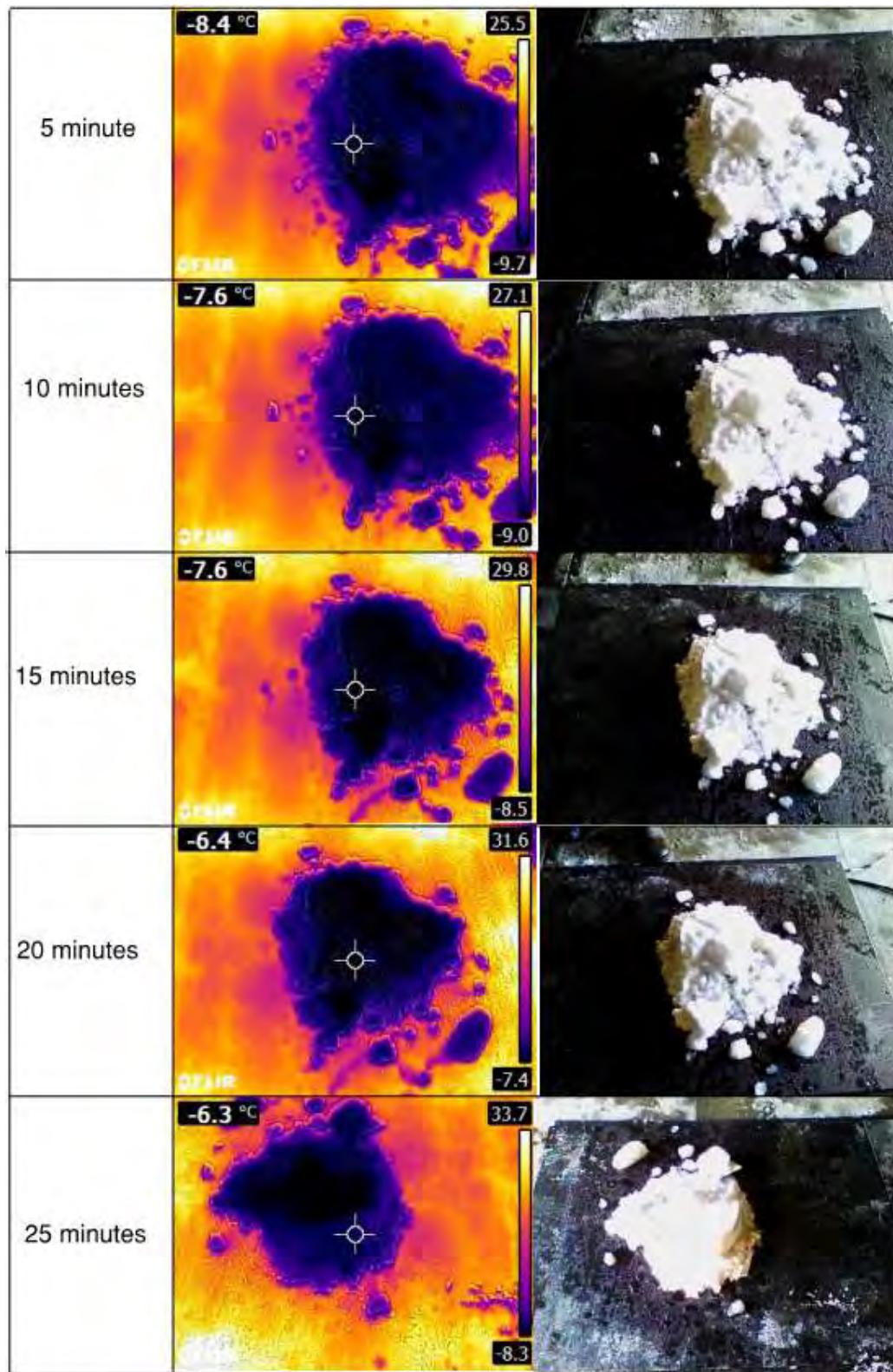


Figure 6 Fonte progressive tapis 70W/pi2 sous une quantité importante de neige

Rapport de visite

259172

2018-02-06

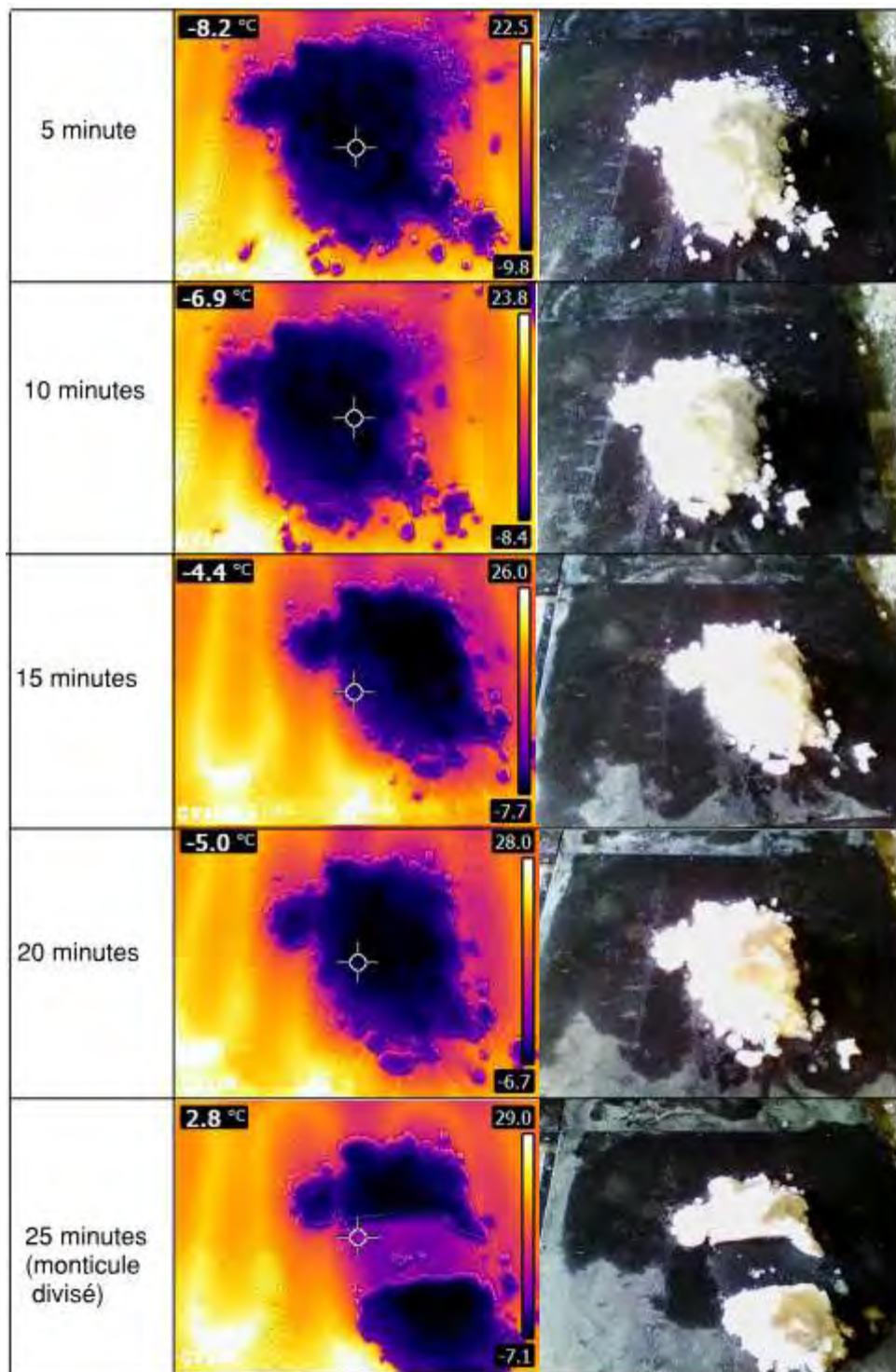


Figure 7 Fonte progressive tapis 50W/pi2 sous une quantité importante de neige

Rapport de visite

259172

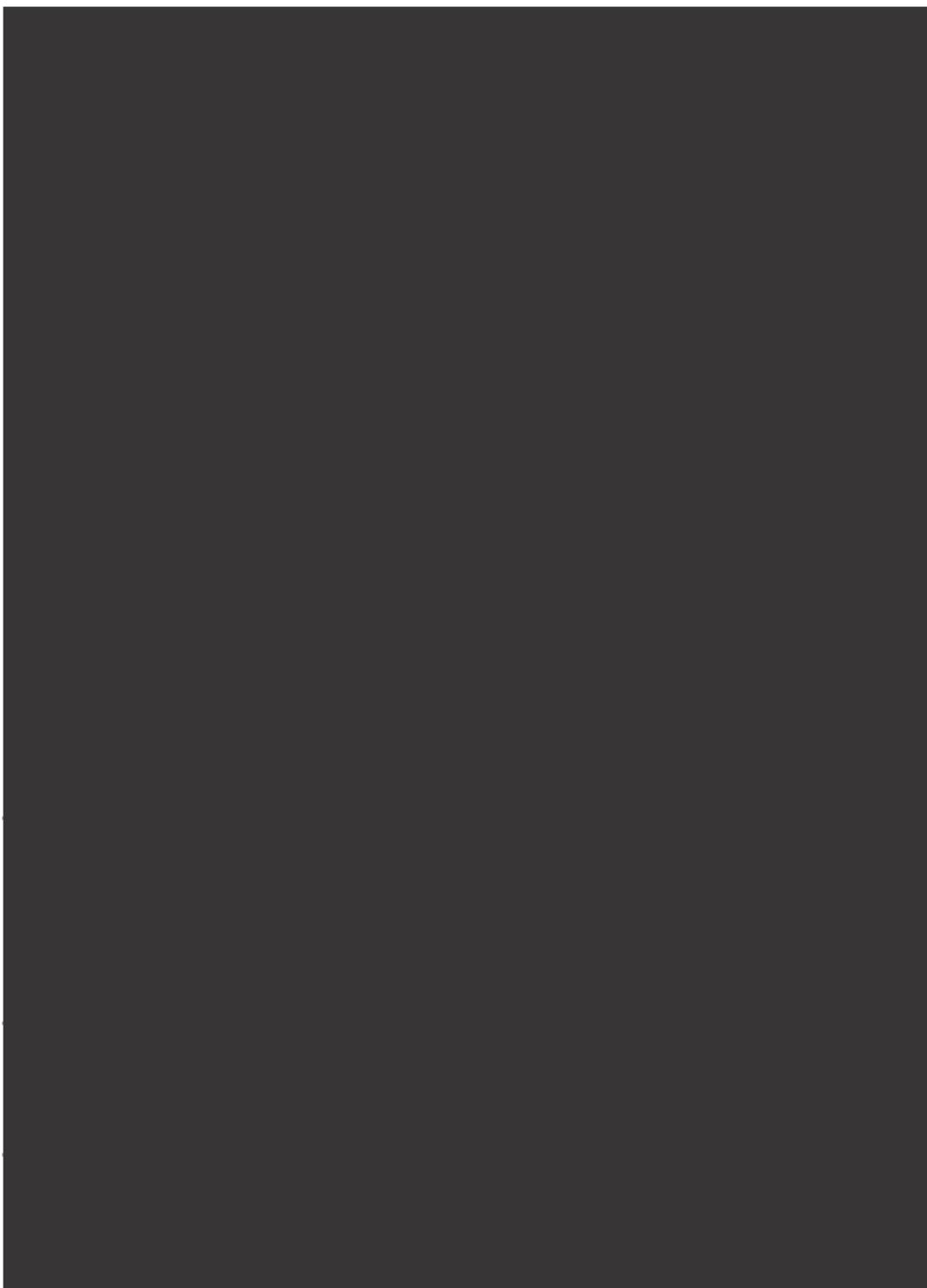
2018-02-06



Figure 8 Section d'un monticule de neige après 25 minutes de fonte

A6.3 Projet pilote – Membrane chauffante

8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |



A6.4 Fiches de contrôle – Systèmes de chauffage

Fiche de contrôle - Projet Pilote - Système de chauffage

Le présent formulaire est privé et destiné uniquement aux personnes ayant obtenu le lien par voie directe. En cas d'erreur lors de la saisie vous pourrez modifier la fiche avec le lien reçu par courriel. Il n'est pas nécessaire de remplir chaque section si les données n'ont pas changées ou si ce n'est pas applicable.

Section 1 - Informations préliminaires

Section 2 - Météorologie

Section 3 - Tapis Chauffants

Section 4 - Membrane Chauffante

Section 5 - Observations

1. Email address *

2. Quelle est la date de la visite?

Example: December 15, 2012

Informations Préliminaires

3. Personnes présentes

Check all that apply.

- Moctar S.
- Christian T.
- Emmanuelle H.
- Représentant du consultant
- Other: _____

4. Quel système de chauffage à été activé?

Check all that apply.

Activé

Tapis chauffants	<input type="checkbox"/>
Membrane chauffante	<input type="checkbox"/>

5. Qui à activé le système de chauffage?

Check all that apply.

- Christian (Opération & Entretien)
- Other: _____

6. Commentaires généraux

Météorologie

Se référer aux données des stations météorologiques: <http://portal.weatherbrain.com/login/>

7. Température extérieure

Température extérieure mesurée sur place, ou selon les données des stations météo.

8. Vent (hors rafales)

* Si les vents annoncés sont supérieurs à 63km/h, une tempête est alors annoncée par Environnement Canada
Mark only one oval.

- Nul
- Faible (10km/h ou +)
- Moyen (23km/h ou +)
- Fort (37km/h ou +)
- Tempête de vent (63km/h ou +)*

9. Précipitations actuelles

Plusieurs sélections possibles.
Check all that apply.

- Aucune
- Neige légere
- Neige forte
- Pluie
- Pluie verglaçante
- Brume / Brouillard
- Poudrerie
- Other: _____

10. Quelle quantité de neige est prévue lors de la tempête

Si applicable
Mark only one oval.

- ≈1 cm
- 1 à 5cm
- 5 à 10cm
- 10-15cm
- 15cm+

11. Qualité de la neige présente sur la piste

Plusieurs sélections possibles.

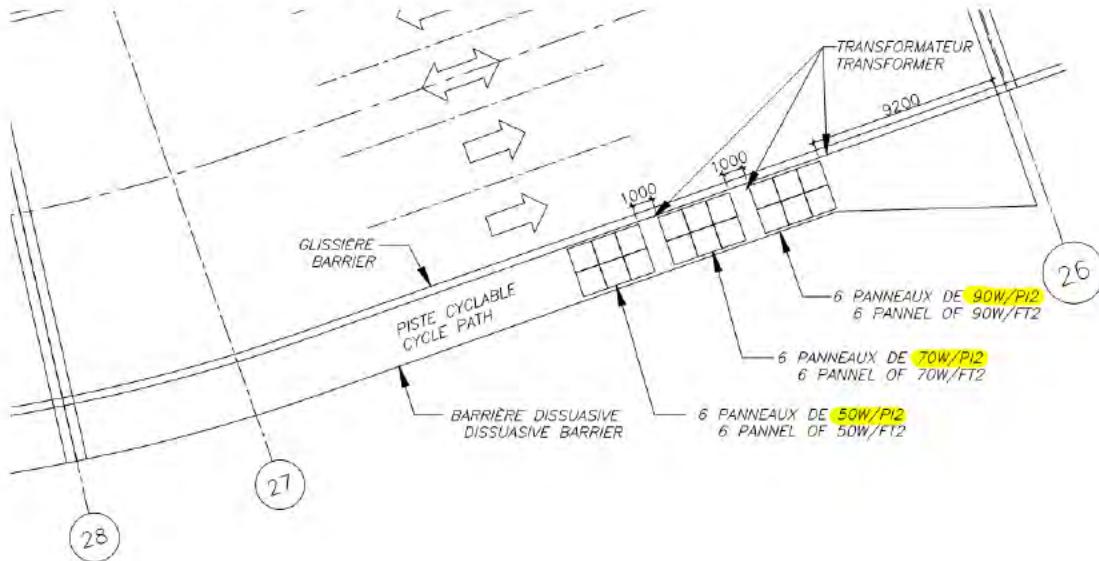
Check all that apply.

- Neige sale (projection depuis la route)
- Neige légère (poudreuse)
- Neige soufflée (bancs de neige)
- Neige lourde (humide)
- Neige "gadoue" (sloche)
- Neige gelée sur le dessus (verglas)
- Verglas sur la piste
- Other: _____

12. Commentaires sur la neige

Tapis Chauffants

Les résultats de performance des **tapis chauffants** sont traités dans cette section. Les résultats de la **membrane chauffante** sont traités dans la section suivante. Si les tapis chauffants n'ont pas été activés, veuillez passer à la prochaine section directement.

Configuration des tapis chauffants**13. Les tapis chauffants ont été activés dans quel scénario?**

Mark only one oval.

- Avant une tempête de neige
- Pendant une tempête de neige
- Suite à une tempête de neige

14. Heure (et date) de l'activation des tapis chauffants

Heure (format 24h)

Example: December 15, 2012 11:03 AM

15. Heure de fin des opérations

Heure à laquelle le système de tapis chauffant est désactivé (format 24h)

Example: 8:30 AM

16. Température de surface de la piste cyclable

Veuillez indiquer la température de surface de la piste cyclable et non celle des tapis chauffants.
 Déblayer la neige si nécessaire afin d'avoir une lecture au niveau du béton. La température peut être obtenue à l'aide d'un thermomètre infrarouge.

17. Température de surface de la section 1

(90W/pi2)

Veuillez dégager une section des tapis chauffants et mesurer la température de surface. La température peut être obtenue à l'aide d'un thermomètre infrarouge.

18. Température de surface de la section 2

(70W/pi2)

Veuillez dégager une section des tapis chauffants et mesurer la température de surface. La température peut être obtenue à l'aide d'un thermomètre infrarouge.

19. Température de surface de la section 3

(50W/pi2)

Veuillez dégager une section des tapis chauffants et mesurer la température de surface. La température peut être obtenue à l'aide d'un thermomètre infrarouge.

20. Épaisseur de neige (avant l'activation)

Épaisseur de neige mesurée sur les tapis avant l'activation de ceux-ci. (Épaisseur moyenne)
 Mark only one oval per row.

	Surface sèche	Surface humide	0cm+	2.5cm+	5cm+	10cm+	15cm+	20cm+	30cm+	Couche de glace (moins de 2mm)	Couche de glace (2 à 10mm)	Couche de glace (plus de 10mm)
Section 1 (90W/pi2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									
Section 2 (70W/pi2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									
Section 3 (50W/pi2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									

21. Épaisseur de neige (après 30 minutes)

Épaisseur de neige mesurée sur les tapis après 30 minutes d'activation. (Épaisseur moyenne)

Mark only one oval per row.

Surface sèche	Surface humide	0cm+	2.5cm+	5cm+	10cm+	15cm+	20cm+	30cm+	Couche de glace (moins de 2mm)	Couche de glace (2 à 10mm)	Couche de glace (plus de 10mm)
Section 1 (90W/pi2)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
Section 2 (70W/pi2)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
Section 3 (50W/pi2)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							

22. Épaisseur de neige (après 1 heure)

Épaisseur de neige mesurée sur les tapis après 1 heure d'activation. (Épaisseur moyenne)

Mark only one oval per row.

Surface sèche	Surface humide	0cm+	2.5cm+	5cm+	10cm+	15cm+	20cm+	30cm+	Couche de glace (moins de 2mm)	Couche de glace (2 à 10mm)	Couche de glace (plus de 10mm)
Section 1 (90W/pi2)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
Section 2 (70W/pi2)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
Section 3 (50W/pi2)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							

23. Épaisseur de neige (après 2 heures)

Épaisseur de neige mesurée sur les tapis après 2 heures d'activation (si applicable). (Épaisseur moyenne)

Mark only one oval per row.

Surface sèche	Surface humide	0cm+	2.5cm+	5cm+	10cm+	15cm+	20cm+	30cm+	Couche de glace (moins de 2mm)	Couche de glace (2 à 10mm)	Couche de glace (plus de 10mm)
Section 1 (90W/pi2)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
Section 2 (70W/pi2)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
Section 3 (50W/pi2)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							

24. Épaisseur de neige (après 8 heures)

Épaisseur de neige mesurée sur les tapis après 8 heures d'activation (si applicable). (Épaisseur moyenne)
Mark only one oval per row.

	Surface sèche	Surface humide	0cm+	2.5cm+	5cm+	10cm+	15cm+	20cm+	30cm+	Couche de glace (moins de 2mm)	Couche de glace (2 à 10mm)	Couche de glace (plus de 10mm)
Section 1 (90W/pi2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									
Section 2 (70W/pi2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									
Section 3 (50W/pi2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									

25. Épaisseur de neige (après 24 heures)

Épaisseur de neige mesurée sur les tapis après 24 heures d'activation (si applicable). (Épaisseur moyenne)
Mark only one oval per row.

	Surface sèche	Surface humide	0cm+	2.5cm+	5cm+	10cm+	15cm+	20cm+	30cm+	Couche de glace (moins de 2mm)	Couche de glace (2 à 10mm)	Couche de glace (plus de 10mm)
Section 1 (90W/pi2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									
Section 2 (70W/pi2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									
Section 3 (50W/pi2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									

26. Rapidité d'assèchement

Si les tapis ont été activés avant ou au court d'une tempête de neige, veuillez indiquer le temps pour que la surface des tapis ne s'assèche complètement suite à la fin de la tempête (si applicable).
Mark only one oval per row.

	Moins que 10 minutes	10 à 20 minutes	20 à 30 minutes	30 à 40 minutes	40 à 50 minutes	50 à 60 minutes	1h à 1h30	1h30 à 2h	2h+
Section 1 (90W/pi2)	<input type="radio"/>								
Section 2 (70W/pi2)	<input type="radio"/>								
Section 3 (50W/pi2)	<input type="radio"/>								

27. Condition de surface suite à la désactivation

Veuillez indiquer la condition de surface des diverses sections suite à la désactivation du système.
Mark only one oval per row.

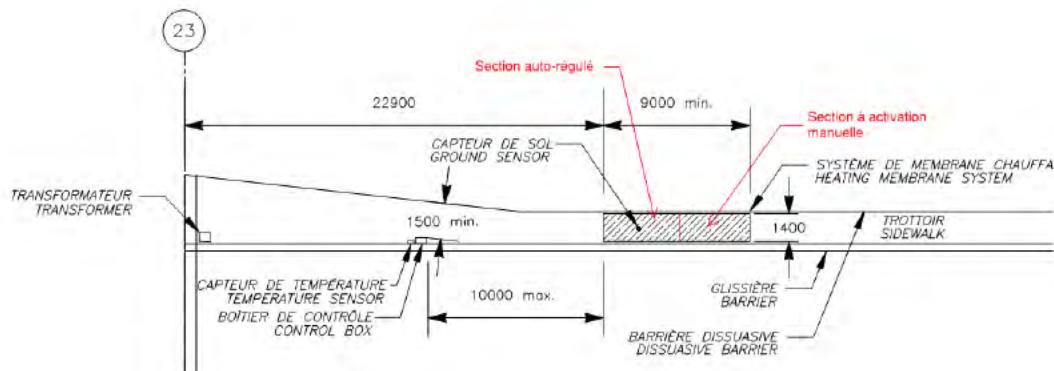
	Sèche	Mouillé	Partiellement sèche et mouillée	Partiellement enneigée (25% de la surface)	Partiellement enneigée (50% de la surface)	Partiellement enneigée (75% de la surface)	Enneigée (moins de 2 cm)	Enneigée (plus de 2 cm)
Section 1 (90W/pi2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Section 2 (70W/pi2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Section 3 (50W/pi2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

28. Autres commentaires

Est-ce que de la glace se forme près des tapis chauffants suite à la fonte de la neige. Est-ce que les tapis se sont déplacés depuis le dernier essai? Est-ce que les vis qui joignent les tapis sont toujours bien en place? Est-ce que l'eau de fonte ruiselle vers les drains? Est-ce que les drains fonctionnent correctement près des tapis?

Membrane Chauffante

Les résultats de la **membrane chauffante** sont traités dans cette section. Les résultats de performance des **tapis chauffants** sont traités dans la section précédente.

Configuration de la membrane chauffante**29. La membrane chauffante a été activé dans quel scénario?**

Mark only one oval.

- Avant une tempête de neige
- Pendant une tempête de neige
- Suite à une tempête de neige

30. Heure (et date) de l'activation de la membrane chauffante à activation manuelle

Heure (format 24h)

Example: December 15, 2012 11:03 AM

31. Heure de fin des opérations

Heure à laquelle le système de membrane chauffante à activation manuelle est désactivé (format 24h)

Example: 8:30 AM

32. Température de surface de la piste cyclable

Veuillez indiquer la température de surface de la piste cyclable et non celle de la membrane chauffante. Déblayer la neige si nécessaire afin d'avoir une lecture au niveau du béton. La température peut être obtenue à l'aide d'un thermomètre infrarouge.

33. Température de surface de la section à activation manuelle (après 30 minutes d'activation minimum)

Veuillez dégager une section de la membrane chauffante et mesurer la température de surface. La température peut être obtenue à l'aide d'un thermomètre infrarouge.

34. Température de surface de la section à activation manuelle (après 1 heures d'activation minimum)

Veuillez dégager une section de la membrane chauffante et mesurer la température de surface. La température peut être obtenue à l'aide d'un thermomètre infrarouge.

35. Température de surface de la section autorégulée

Veuillez dégager une section de la membrane chauffante et mesurer la température de surface. La température peut être obtenue à l'aide d'un thermomètre infrarouge.

36. Épaisseur de neige (avant l'activation)

Épaisseur de neige mesurée sur la membrane chauffante avant l'activation de celle-ci. (Épaisseur moyenne)

Mark only one oval per row.

	Surface sèche	Surface humide	0cm+	2.5cm+	5cm+	10cm+	15cm+	20cm+	30cm+	Couche de glace (moins de 2mm)	Couche de glace (2 à 10mm)	Couche de glace (plus de 10mm)
Section à activation manuelle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									
Section autorégulée	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									

37. Épaisseur de neige (après 30 minutes)

Épaisseur de neige mesurée sur la membrane chauffante après 30 minutes d'activation. (Épaisseur moyenne)

Mark only one oval per row.

	Surface sèche	Surface humide	0cm+	2.5cm+	5cm+	10cm+	15cm+	20cm+	30cm+	Couche de glace (moins de 2mm)	Couche de glace (2 à 10mm)	Couche de glace (plus de 10mm)
Section à activation manuelle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									
Section autorégulée	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									

38. Épaisseur de neige (après 1 heure)

Épaisseur de neige mesurée sur la membrane chauffante après 1 heure d'activation. (Épaisseur moyenne)
Mark only one oval per row.

	Surface sèche	Surface humide	0cm+	2.5cm+	5cm+	10cm+	15cm+	20cm+	30cm+	Couche de glace (moins de 2mm)	Couche de glace (2 à 10mm)	Couche de glace (plus de 10mm)
Section à activation manuelle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									
Section autorégulée	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									

39. Épaisseur de neige (après 2 heures)

Épaisseur de neige mesurée sur la membrane chauffante après 2 heures d'activation (si applicable). (Épaisseur moyenne)
Mark only one oval per row.

	Surface sèche	Surface humide	0cm+	2.5cm+	5cm+	10cm+	15cm+	20cm+	30cm+	Couche de glace (moins de 2mm)	Couche de glace (2 à 10mm)	Couche de glace (plus de 10mm)
Section à activation manuelle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									
Section autorégulée	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									

40. Épaisseur de neige (après 8 heures)

Épaisseur de neige mesurée sur la membrane chauffante après 8 heures d'activation (si applicable). (Épaisseur moyenne)
Mark only one oval per row.

	Surface sèche	Surface humide	0cm+	2.5cm+	5cm+	10cm+	15cm+	20cm+	30cm+	Couche de glace (moins de 2mm)	Couche de glace (2 à 10mm)	Couche de glace (plus de 10mm)
Section à activation manuelle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									
Section autorégulée	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									

41. Épaisseur de neige (après 24 heures)

Épaisseur de neige mesurée sur la membrane chauffante après 24 heures minutes d'activation (si applicable). (Épaisseur moyenne)
Mark only one oval per row.

	Surface sèche	Surface humide	0cm+	2.5cm+	5cm+	10cm+	15cm+	20cm+	30cm+	Couche de glace (moins de 2mm)	Couche de glace (2 à 10mm)	Couche de glace (plus de 10mm)
Section à activation manuelle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									
Section autorégulée	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>									

42. Rapidité d'assèchement

Si la membrane a été activé avant ou au court d'une tempête de neige, veuillez indiquer le temps pour que la surface de la membrane ne s'assèche complètement suite à la fin de la tempête.
Mark only one oval per row.

	Moins que 10 minutes	10 à 20 minutes	20 à 30 minutes	30 à 40 minutes	40 à 50 minutes	50 à 60 minutes	1h à 1h30	1h30 à 2h	2h+
Section à activation manuelle	<input type="radio"/>								
Section autorégulée	<input type="radio"/>								

43. Condition de surface suite à la désactivation

Veuillez indiquer la condition de surface des diverses sections suite à la désactivation de la section à activation manuelle.

Mark only one oval per row.

	Sèche	Mouillé	Partiellement sèche et mouillé	Partiellement enneigé (25% de la surface)	Partiellement enneigé (50% de la surface)	Partiellement enneigé (75% de la surface)	Enneigé (moins de 2 cm)	Enneigé (plus de 2 cm)
Section à activation manuelle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Section autorégulée	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

44. Autres commentaires

Est-ce que de la glace se forme près de la membrane suite à la fonte de la neige. Est-ce que l'eau de fonte ruiselle vers les drains? Est-ce que les drains fonctionnent correctement près de la membrane?

Observations**45. Autres commentaires**

Commentaires ou observations générales (par exemple, sur la chute de glace ou neige depuis la superstructure (localisation, taille); ou sur les projections de sels et de neige venant de la route...) Est-ce que l'eau de fonte ruiselle vers les drains? Est-ce que les drains fonctionnent correctement près des tapis/membrane?

46. Futures opérations

Check all that apply.

- Il est nécessaire de déblayer manuellement les tapis chauffants
- Il est nécessaire de déblayer manuellement la membrane chauffante
- Other: _____

47. Niveau de sécurité (pour cyclistes) suite à la désactivation des systèmes chauffants

Avis général en fonction de la qualité de surface (1 = mauvais, 5 = excellent). S'il vous plaît, justifiez le raisonnement dans la case commentaires ci-dessous.
Mark only one oval per row.

	1	2	3	4	5
Tapis Chauffants - Section 1 (90W/pi2)	<input type="radio"/>				
Tapis Chauffants - Section 2 (70W/pi2)	<input type="radio"/>				
Tapis Chauffants - Section 3 (50W/pi2)	<input type="radio"/>				
Membrane chauffante - section à activation manuelle	<input type="radio"/>				
Membrane chauffante - section auto-régulé	<input type="radio"/>				

48. Commentaires sur la sécurité

49. Commentaires sur l'efficacité

50. Photo (désactivée)

Dans la mesure du possible, prendre une photo avant et après le déneigement; à un endroit clé, au choix. La transmettre au consultant par courriel.

A copy of your responses will be emailed to the address you provided

FICHE DE CONTRÔLE

Contrat : 259172

Fiche N° : 111

Titre : Maintenance Hivernale de la Piste Cyclable du Pont Jacques Cartier (PJCCI)

Nom :	<u>[REDACTED]</u>	Date :	<u>2018 / 03 / 15</u>
Température :	<u>-1°C</u>	Facteur vent :	<u>-8°C</u>
Pression atmosphérique :	<u>100.00 kPa</u>	Humidité :	<u>87%</u>
Conditions météorologiques :	<u>Pouderie/neige légère</u> 1er suivi : Omar M. (Arup)		
Personnes présentes lors des essais :	<u>Personnes présentes lors des essais : Emanuel C (PJCCI)</u> 2ème suivi : Juan E. (Arup), Christian T. (PJCCI),		

Etat des lieux

Inspection des tapis chauffants

Activé en continu avant les précipitations

Environ 1 cm de neige accumulée avant l'activation ;

Conditions météorologiques similaires à celles prévues ;

Début des opérations à 13:00 et fin à 16:00

Suivi vers 18:00

Très peu de neige pour seulement mouiller la surface - aucune accumulation

Neige légère, cumul de neige plus important sur la piste a la section 7 par rapport aux autres sections (effet « aile d'avion » ?)

Température de surface de la piste cyclable : -6 à -2°C

Test - Produit N° 1

Nom du produit N° 1 : n. d.

Test - Produit N° 2

Nom du produit N° 2 : n. d.

Conclusion

Les vibrations du pont ne sembleraient pas constituer un enjeu pour le tapis. Les surfaces des tapis étaient sèches, tandis que celles de la dalle étaient mouillées. Les espaces entre les fils chauffants des tapis étaient aussi mouillées (plus évident pour le tapis à 50W/pi2) ;

Surfaces sèches et sécuritaires. La surface était 100% sèche avec le tapis à 90W/pi2 et à peu près 85% pour celui à 50W/pi2 ;

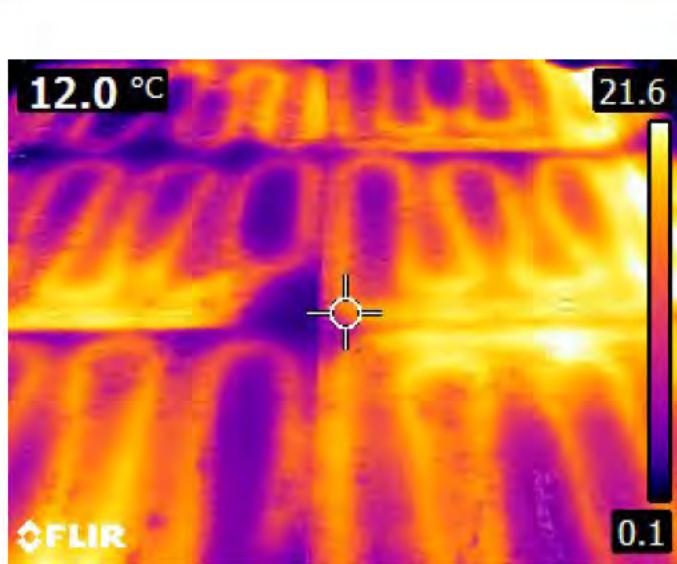
La rapidité d'assèchement était moins de 10 minutes ;

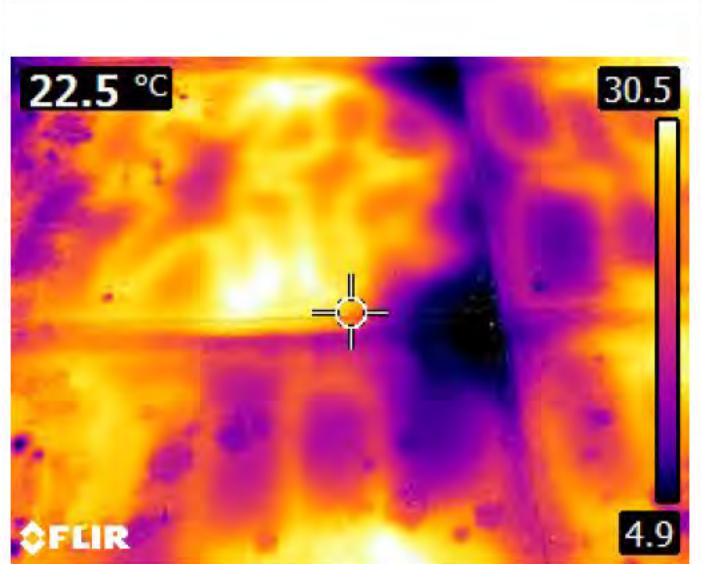
Complétée par :

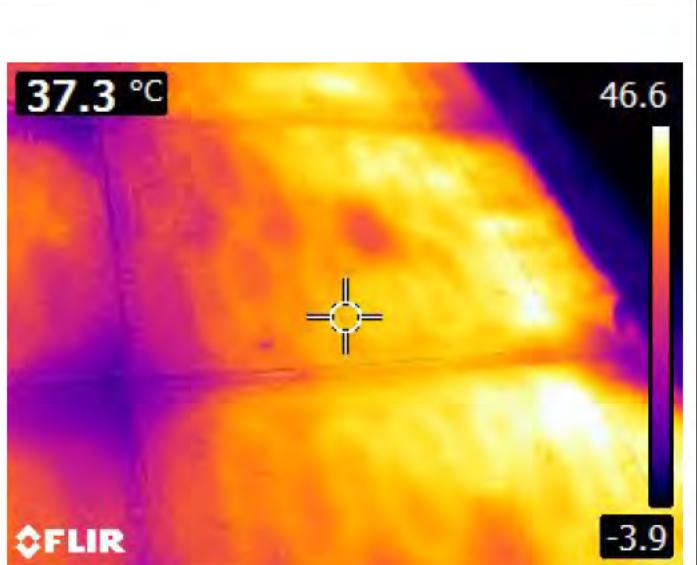
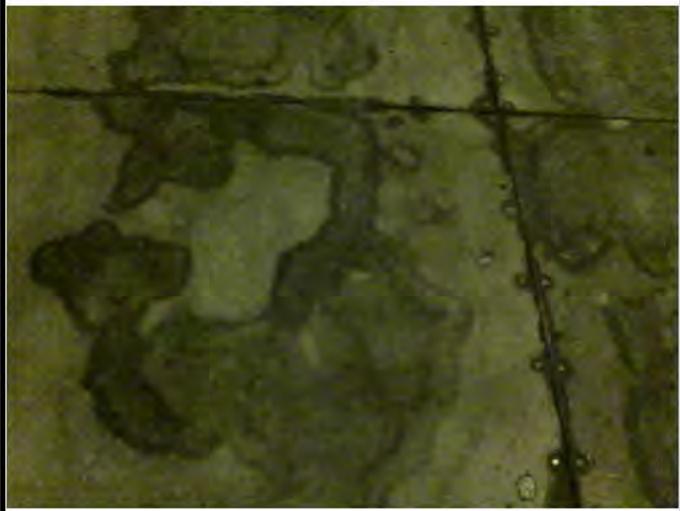
[REDACTED]

2018-03-15

Date

Tapis à 50W/pi2	
	 <p>12.0 °C 21.6 0.1 FLIR</p>
Description : Tapis à 50W/pi2	Description : Vue infra-rouge (50W/pi2)
	
Description : Tapis à 50W/pi2	Description :
Description :	Description :

Tapis à 70W/pi2	
	
Description : Tapis à 70W/pi2	Description : Vue infra-rouge (70W/pi2)
	
Description : Tapis à 70W/pi2	Description :
Description :	Description :

Tapis à 90W/pi2	
	
Description : Tapis à 90W/pi2	Description : Vue infra-rouge (90W/pi2)
	
Description : Tapis à 90W/pi2	Description :
Description :	Description :

FICHE DE CONTRÔLE

Contrat : 259172

Fiche N° : 112

Titre : Maintenance Hivernale de la Piste Cyclable du Pont Jacques Cartier (PJCCI)

Nom :	[REDACTED]	Date :	2018 / 03 / 15
Température :	-1°C	Facteur vent :	-6°C
Pression atmosphérique :	99.73 kPa	Humidité :	91%
Conditions météorologiques :	Aucunes précipitations	Date de la fiche antérieure : 2018 / 03 / 09	
Personnes présentes lors des essais : [REDACTED]			

Etat des lieux

Inspection des tapis chauffants
Activé en continu avant les précipitations
Environ 1 - 5 cm de neige accumulée avant l'activation ;
Neige légèrement sale, dû à la projection de la route ;
Conditions météorologiques similaires à celles prévues ;
Début des opérations vers 12:00
Suivi vers 08:00
Température de surface de la piste cyclable : -5°C
Température de surface de la section 1 (90W/pi2) : 47°C
Température de surface de la section 2 (70W/pi2) : 65°C

Test - Produit N° 1

Nom du produit N° 1 : n. d.

Test - Produit N° 2

Nom du produit N° 2 : n. d.

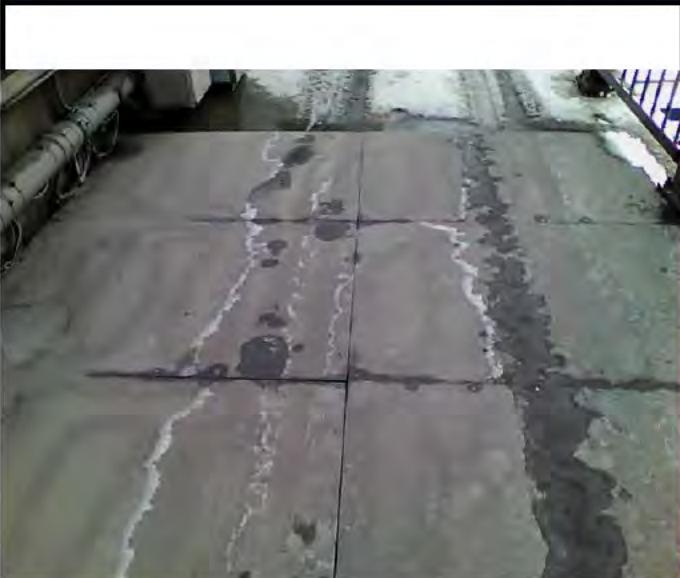
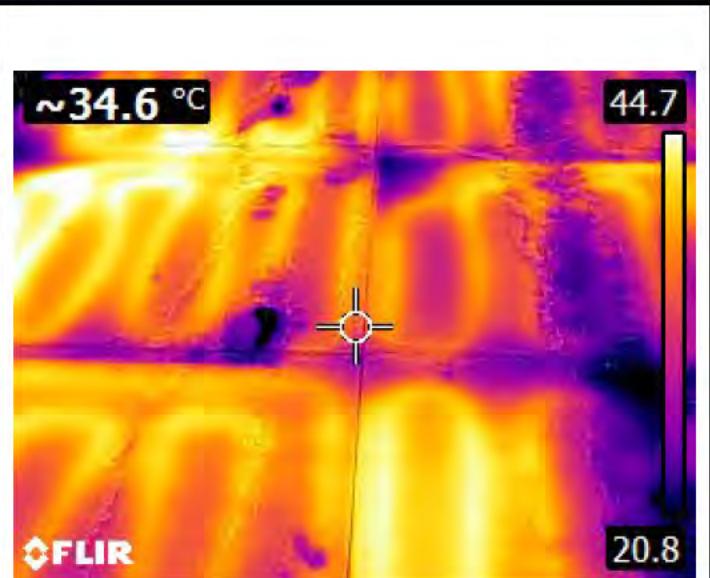
Conclusion

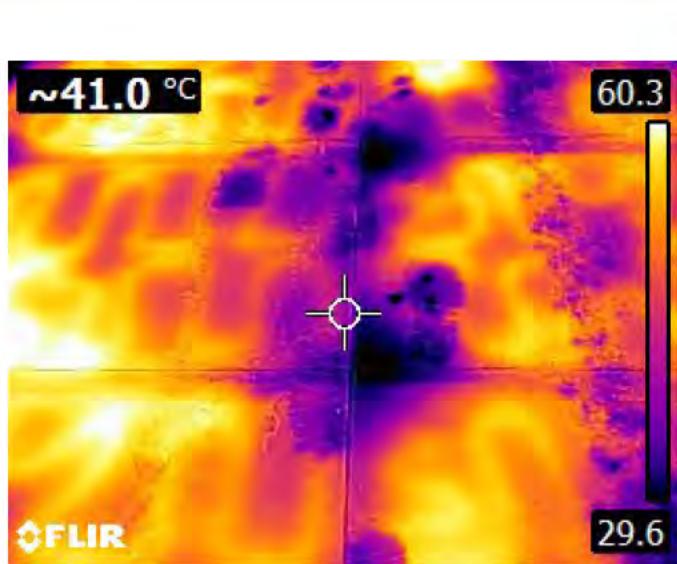
La surface adjacente au tapis était recouverte d'une mince couche de neige (2cm). Les tapis étaient, quant à eux, sèches et sans neige ;
Surfaces sèches et adhérentes ;
La rapidité d'assèchement était moins de 10 minutes ;
Aucun déblayage est nécessaire

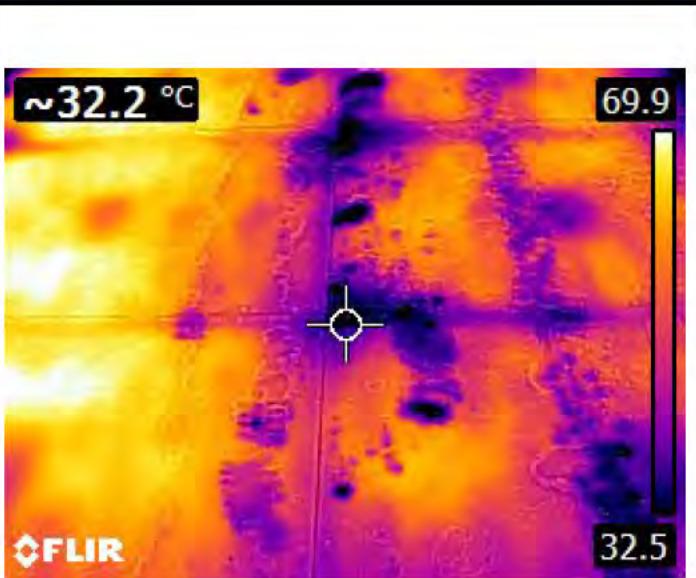
Complétée par :

2018-03-15

Date

Tapis à 50W/pi2	
	
Description : Tapis à 50W/pi2	Description : Vue infra-rouge (50W/pi2)
	
Description : Tapis à 50W/pi2	Description :
Description :	Description :

Tapis à 70W/pi2	
	
Description : Tapis à 70W/pi2	Description : Vue infra-rouge (70W/pi2)
	
Description : Tapis à 70W/pi2	Description :
Description :	Description :

Tapis à 90W/pi2	
	
Description : Tapis à 90W/pi2	Description : Vue infra-rouge (90W/pi2)
	
Description : Tapis à 90W/pi2	Description :
Description :	Description :

FICHE DE CONTRÔLE

Contrat : 259172

Fiche N° : 113

Titre : Maintenance Hivernale de la Piste Cyclable du Pont Jacques Cartier (PJCCI)

Nom :	<u>[REDACTED]</u>	Date :	<u>2018 / 03 / 19</u>
Température :	<u>1°C</u>	Facteur vent :	<u>17 km/h</u>
Pression atmosphérique :	<u>98.99 kPa</u>	Humidité :	<u>82%</u>
Conditions météorologiques :		<u>Neige forte et pluie verglaçant Suivi : Omar M. (Arup)</u>	
		<u>Date de la fiche antérieure : 2018 / 03 / 14</u>	
		<u>Activation du système de chauffage : Pierre S.</u>	
		<u>Personnes présentes lors des essais :</u>	

Etat des lieux

Inspection des tapis chauffants

Seulement celui à 70W/pi2 était activé en mode réactif. Ceux à 50W/pi2 et 90W/pi2 ont été déjà allumés avant les précipitations.

Environ 5 - 10 cm de neige accumulée avant l'activation ;

Neige forte et pluie verglaçante prévues ;

Neige légère et « gadoue » (sloche) pendant l'inspection ;

La qualité de la neige était variable au cours de la tempête ;

Début des opérations vers 14:00

Température de surface de la piste cyclable : -7 à -3°C

Température de surface de la section 1 (90W/pi2) : 10 à 25°C

Test - Produit N° 1

Nom du produit N° 1 : n. d.

Test - Produit N° 2

Nom du produit N° 2 : n. d.

Conclusion

Seulement le 70W/pi2 a été testé en mode réactif. D'ailleurs, le 50W/pi2 donne une meilleure qualité de surface (mode proactive) ;

Toutes les surfaces étaient humides ;

Futures opérations plus pertinentes pour la section à 70W/pi2 (mode réactif) ;

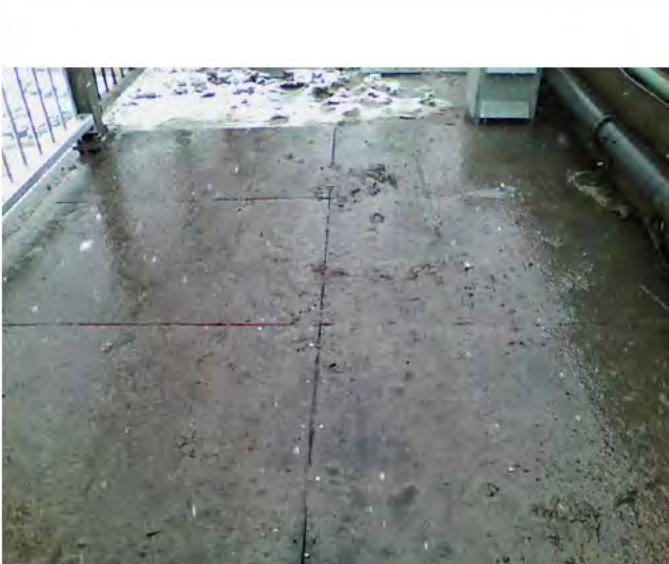
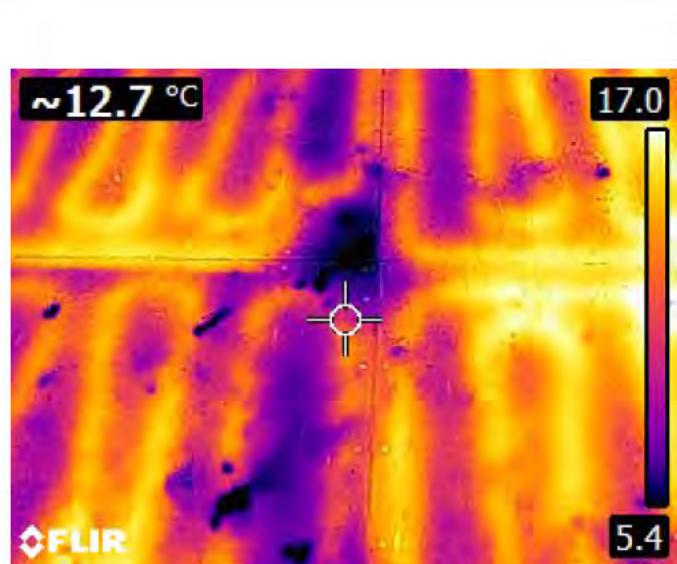
Celui à 70W/pi2 ne semble pas être aussi performant ;

Le mode réactif semble être plus efficace (consommation pourrait arriver au même)

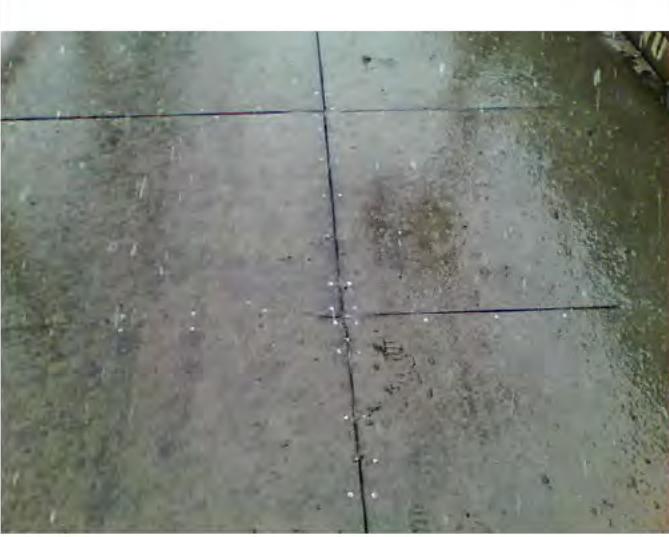
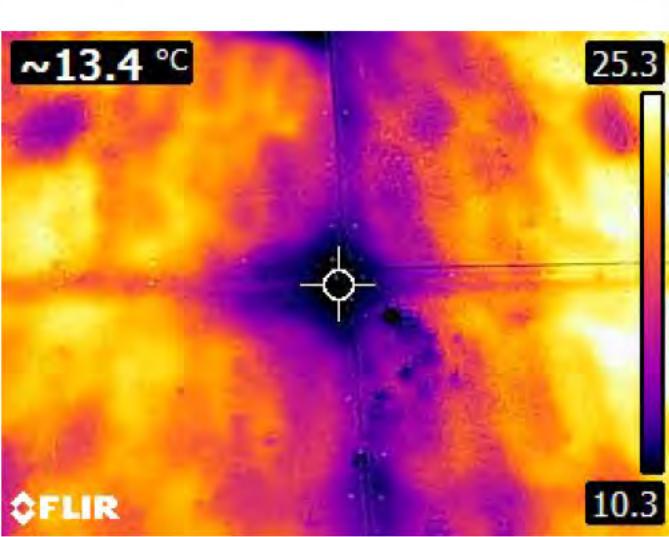
Complétée par :

2018-03-19

Date

Tapis à 50W/pi2	
	
Description : Tapis à 50W/pi2	Description : Vue infra-rouge (50W/pi2)
	
Description : Tapis à 50W/pi2	Description :
Description :	Description :

Tapis à 70W/pi2	
Description : Tapis à 70W/pi2	Description : Vue infra-rouge (70W/pi2)
Description : Tapis à 70W/pi2	Description :
Description :	Description :

Tapis à 90W/pi2	
	
Description : Tapis à 90W/pi2	Description : Vue infra-rouge (90W/pi2)
	
Description : Tapis à 90W/pi2	Description :
Description :	Description :

FICHE DE CONTRÔLE

Contrat : 259172

Fiche N° : 114

Titre : Maintenance Hivernale de la Piste Cyclable du Pont Jacques Cartier (PJCCI)

Nom :	[REDACTED]	Date :	2018 / 03 / 19
Température :	2°C	Facteur vent :	Vent : 32 km/h
Pression atmosphérique :	98.96 kPa	Humidité :	54%
Conditions météorologiques :	Aucunes précipitations lors de	Date de la fiche antérieure : 2018 / 03 / 15	
Personnes présentes lors des essais : [REDACTED]			

État des lieux

Inspection des tapis chauffants

Il semblerait que la piste cyclable ait été déneigée par l'équipe entretenant le remplacement des garde-corps. Une couche d'environ 1 - 2 cm était présente au centre de la piste. Près des barrières, une quantité plus importante de neige était présente et était découpée de façon évidente (ex. avec une pelle) ;

Neige légère et neige sale (projection provenant de la route) ;

Début des opérations vers 14:00

Température de surface de la piste cyclable : -6°C

Température de surface de la section 1 (90W/pi2) : 42 à 54°C

Température de surface de la section 2 (70W/pi2) : 37 à 45°C

Température de surface de la section 3 (50W/pi2) : 15 à 36°C

Test - Produit N° 1

Nom du produit N° 1 : n. d.

Test - Produit N° 2

Nom du produit N° 2 : n. d.

Conclusion

Accumulation de saleté sur les tapis, dû à la projection de neige provenant de la route. De plus, l'eau de fonte s'accumule contre les tapis et ne parvient pas à s'échapper vers les drains. Cette eau, qui ne gèle pas à cause de la température de surface assez élevée, reste donc stagnante contre les tapis ;

Surfaces sèches et adhérentes ;

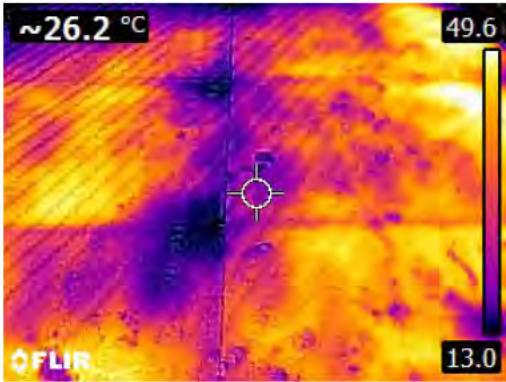
Environnement jugé sécuritaire pour les cyclistes

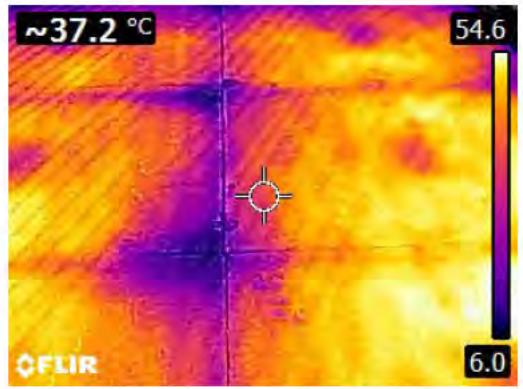
Complétée par :

2018-03-19

Date

Tapis à 50W/pi2	
Description : Tapis à 50W/pi2	Description : Vue infra-rouge (50W/pi2)
Description : Accumulation de saleté	Description : Accumulation d'eau
Description :	Description :

Tapis à 70W/pi2	
	
Description : Tapis à 70W/pi2	Description : Vue infra-rouge (70W/pi2)
Description :	Description :
Description :	Description :

Tapis à 90W/pi2	
	
Description : Tapis à 90W/pi2	Description : Vue infra-rouge (90W/pi2)
Description :	Description :
Description :	Description :
Description :	Description :

FICHE DE CONTRÔLE

Contrat : 259172

Fiche N° : 115

Titre : Maintenance Hivernale de la Piste Cyclable du Pont Jacques Cartier (PJCCI)

Nom :	XXXXXXXXXX	Date :	<u>2018 / 05 / 02</u>
Température :	<u>3.3°C (surface)</u>	Facteur vent :	<u>_____</u>
Pression atmosphérique :	<u>99.48 kPa</u>	Vent :	<u>32 km/h</u>
Humidité :	<u>76%</u>	Rafales :	<u>_____</u>
Conditions météorologiques :	<u>Pluie légère</u>		
Personnes présentes lors des essais :	XXXXXXXXXX		

Etat des lieux

Inspection des membranes chauffantes

Les essais ont été effectués avec de la neige dure (monticule de 5 cm de haut), récupérée hors du pont puisque les prévisions météorologiques n'annonçaient aucunes précipitations pour les jours à venir ;

Pluie légère lors de la visite et de la collecte de données ;

Début des opérations vers 15:05 ;

Fin des opérations vers 16:30 ;

Température de surface de la piste cyclable : 6.5°C

Température maximale (activation manuelle) : 19.3°C

Température maximale (autorégulation) : 17.6°C

Test - Produit N° 1

Nom du produit N° 1 : Activation manuelle

Évolution de la température (pour plus de détails, voir l'autre fiche de contrôle) :

Température initiale : 6.5°C

Température 15 minutes après : 13.8°C

Température 30 minutes après : 17.2°C

Température 45 minutes après : 18.8°C

Température 55 minutes après : 19.3°C

Test - Produit N° 2

Nom du produit N° 2 : Autorégulation

Évolution de la température (pour plus de détails, voir l'autre fiche de contrôle) :

Température initiale : 6.5°C

Température 15 minutes après : 11.7°C

Température 30 minutes après : 16.0°C

Température 45 minutes après : 16.9°C

Température 55 minutes après : 17.6°C

Conclusion

Les monticules de neige n'ont pas fondu. Des tests similaires ont été réalisés, en parallèle, sur le trottoir et cette neige-là aussi a commencé à fondre donc on pourrait conclure que les membranes n'étaient pas vraiment efficaces.

Comme avant, nous avons noté que l'eau en dessous était mêlée à la neige, agissant ainsi comme un isolant

thermique qui ralentissait le processus de fonte ;

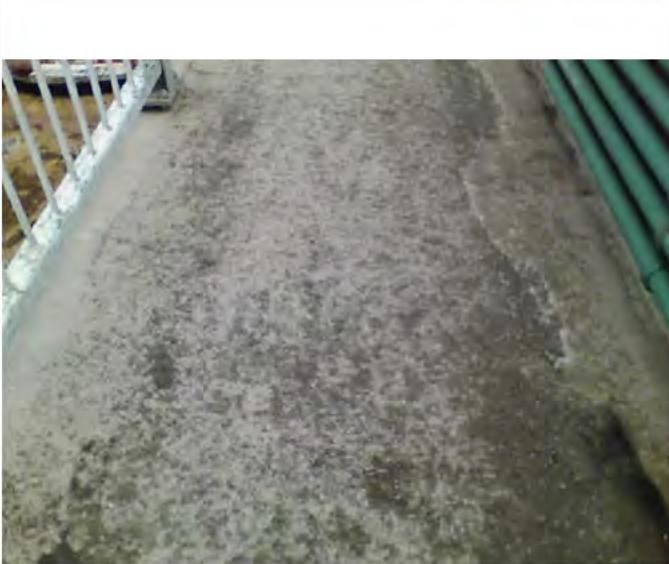
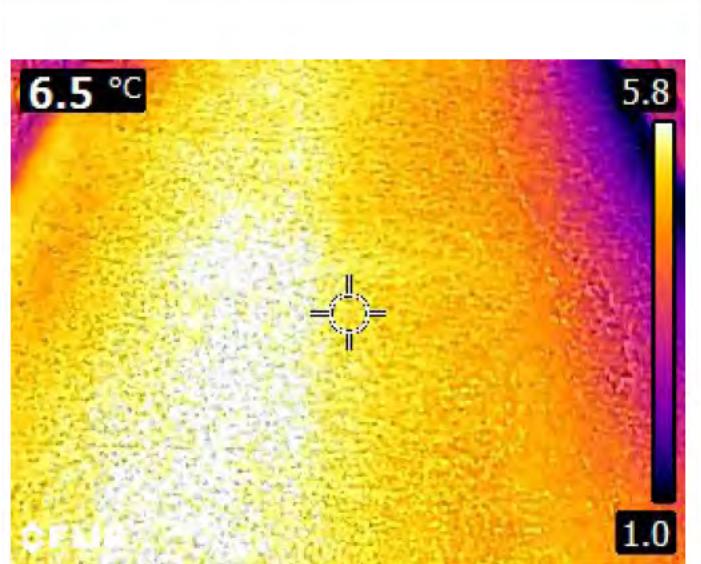
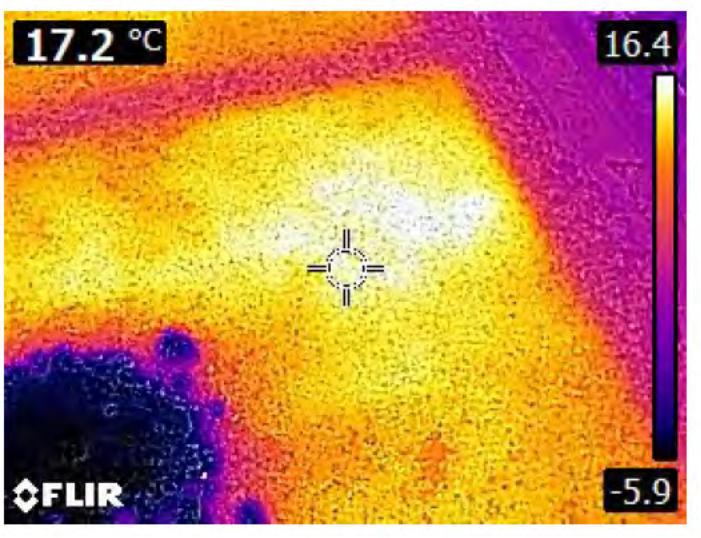
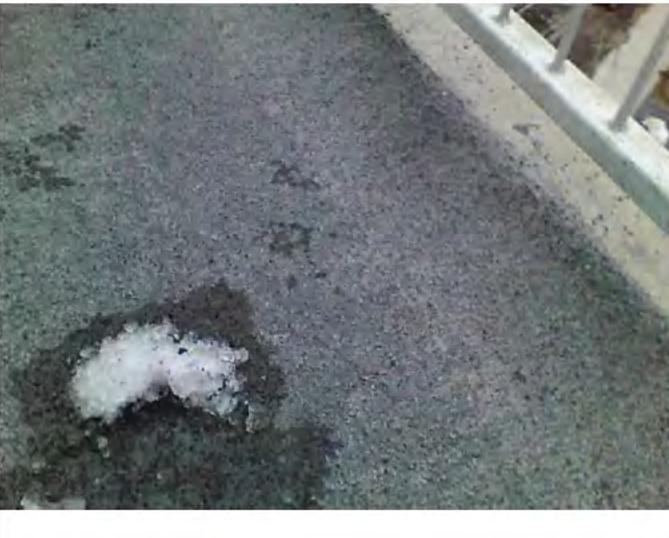
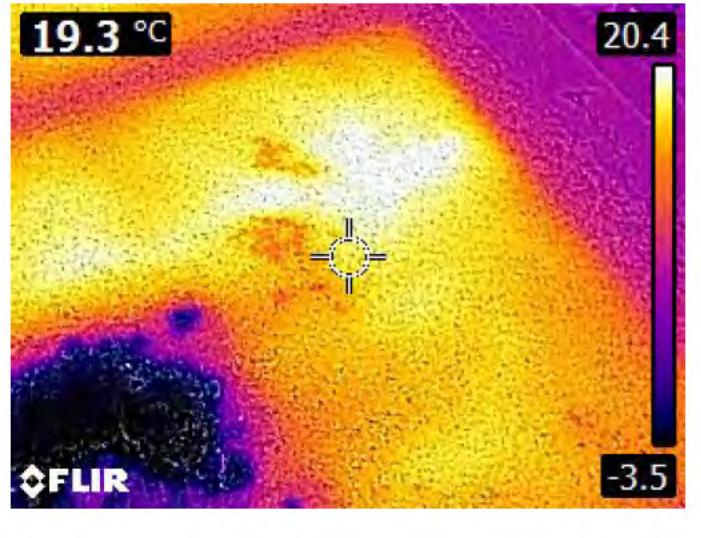
Surfaces toujours enneigée suite aux essais ;

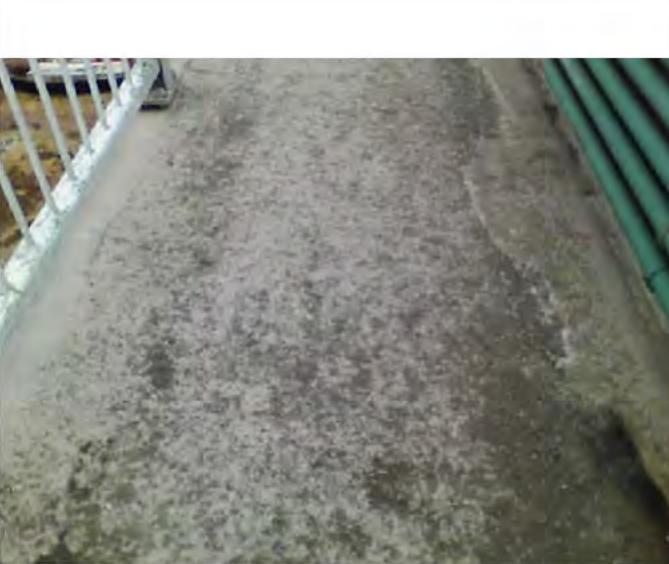
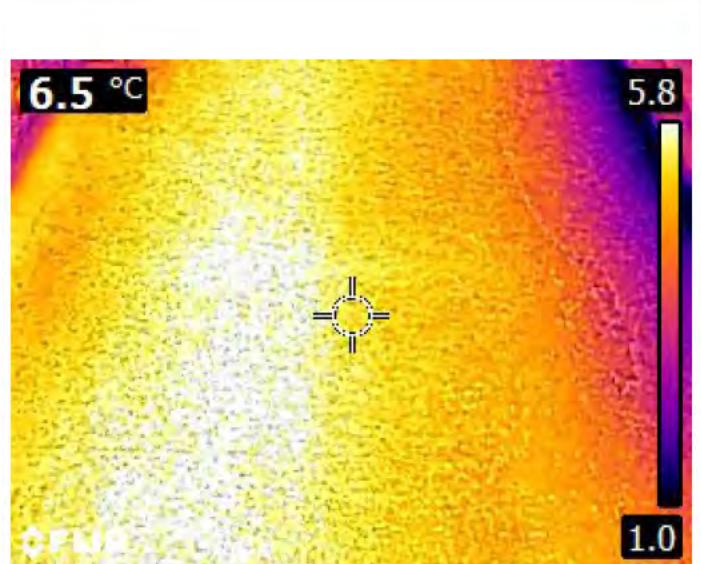
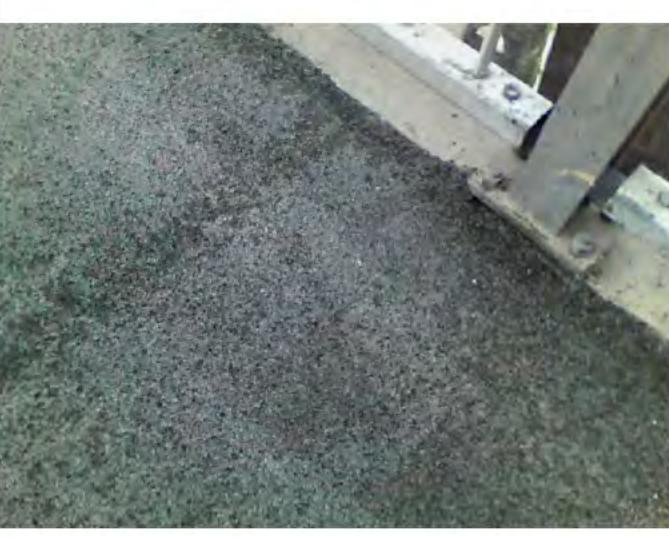
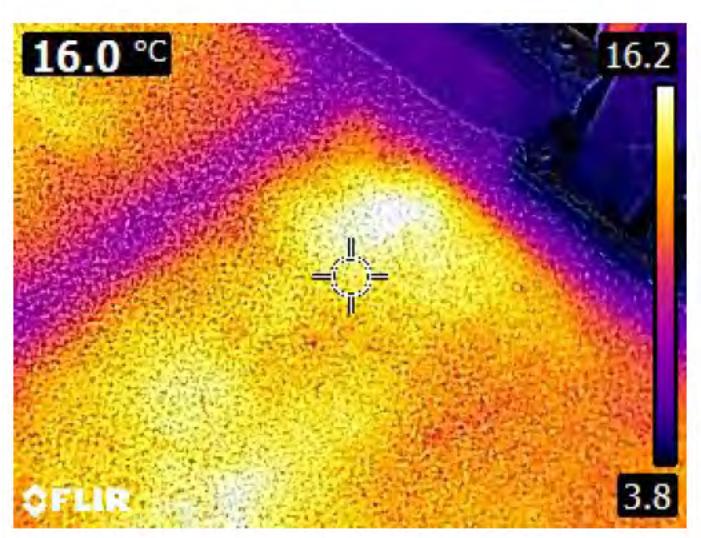
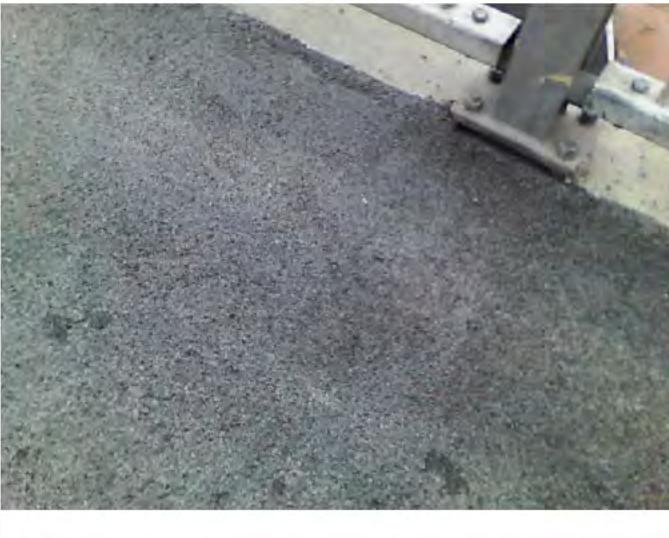
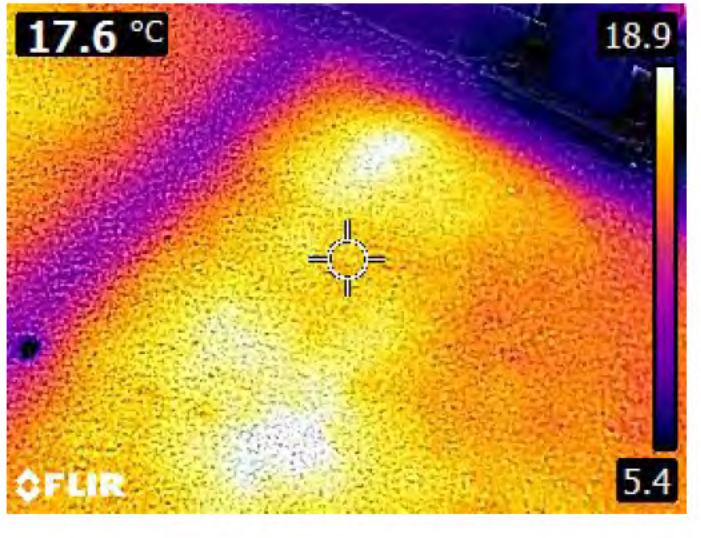
Environnement jugé non sécuritaire pour les cyclistes

Complétée par :

2018-05-19

Date

Membrane à activation manuelle	
	 <p>6.5 °C</p> <p>5.8</p> <p>1.0</p> <p>FLIR</p>
Description : Vue normale (initialement)	Description : Vue infra-rouge (initialement)
	 <p>17.2 °C</p> <p>16.4</p> <p>-5.9</p> <p>FLIR</p>
Description : Vue normale (30 minutes après)	Description : Vue infra-rouge (30 minutes après)
	 <p>19.3 °C</p> <p>20.4</p> <p>-3.5</p> <p>FLIR</p>
Description : Vue normale (55 minutes après)	Description : Vue infra-rouge (55 minutes après)

Membrane autorégulée	
	
Description : Vue normale (initialement)	Description : Vue infra-rouge (initialement)
	
Description : Vue normale (30 minutes après)	Description : Vue infra-rouge (30 minutes après)
	
Description : Vue normale (55 minutes après)	Description : Vue infra-rouge (55 minutes après)

Autres observations	
	
Description : Eau mêlée à la neige, agissant ainsi comme un isolant thermique qui ralentit le processus de fonte	Description :
Description :	Description :
Description :	Description :

A11 Analyse préliminaire de risques

A11.1 Tableau integral

Analyse préliminaire des risques

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Événement		Cotation (voir légende)				Plan de gestion des risques					
Catégorie	#	Événement	Risque Enjeu Opportunité	Cause(s) de l'événement	Conséquence(s)	G, Gravité	P, Probabilité d'occurrence	C, Criticité = GxP	Type	Actions	Responsabilité d'action
Structure et durabilité	4	Capacité structurale insuffisante pour l'augmentation des charges (équipements de déneigement, membrane d'étanchéité, etc.)	Risque	Conception actuelle de la structure ne considère pas les charges additionnelles ; Vieillissement et détérioration de la structure	Rupture des éléments structuraux	5	3	15	Évitement	Effectuer une analyse de la capacité portante Effectuer des travaux de renforcement pour les éléments jugés déficients	PJCCI (I) PJCCI (C)
Sécurité	5	Ouverture de la piste lors des conditions climatiques sévères	Risque	Gestion inadéquate de la piste multifonctionnelle	Accidents Plaintes	3	5	15	Atténuation	Mettre en place un mécanisme clair pour la prise de décision (logigramme) Compréhension des conditions météo et paramètres déclenchant l'ouverture / fermeture de la piste Assurer une bonne communication des conditions de la piste avec les usagers. Mettre au clair la responsabilité de chaque partie / équipe Considérer une fermeture proactive et à titre préventif (1) Réduction de la quantité de chlorures épandus ; (2) Effectuer des inspections et/ou installer un système de suivi (instrumentation) pour évaluer la corrosion et la pénétration des chlorures ; (3) Installation d'une membrane d'étanchéité ;	PJCCI (E/O)
Structure et durabilité	2	Corrosion des barres d'armature et des câbles de précontrainte	Risque	Application directe de produits de déglaçage lors de déneigement de la piste	Réduction potentielle de la capacité structurale Nécessité d'augmenter la fréquence d'inspection Fermeture de la piste pour réparation	3	4	12	Atténuation	(1) Réduction de la quantité de chlorures épandus ; (2) Effectuer des inspections et/ou installer un système de suivi (instrumentation) pour évaluer la corrosion et la pénétration des chlorures ; (3) Installation d'une membrane d'étanchéité ;	PJCCI (I)
Structure et durabilité	3	Déferratel de température sur le tablier dû à l'installation d'un système de chauffage	Risque	Isolation non-présente / insuffisante entre le système de chauffage et le tablier	Augmentation des contraintes internes ; Fissuration de la dalle (dépassant le seuil acceptable)	3	4	12	Atténuation / Évitement	Risque éliminé par le déneigement conventionnel uniquement ; considérer les effets thermiques lors de la conception d'un système chauffant ; limiter le différentiel de température lors des opérations.	PJCCI (I) PJCCI (O/E)
Sécurité	8	Ouverture bidirectionnelle de la piste malgré une largeur insuffisante (à cause des opérations ou de la géométrie)	Risque	Ouvrir le trafic pour tous les usagers	Accidents Plaintes	3	4	12	Évitement	Court terme : adopter un système de circulation pendulaire (unidirectionnelle) ; moyen terme : entamer des études supplémentaires pour l'élargissement potentiel de la piste ;	PJCCI (E/O)
Sécurité	9	Ouverture unidirectionnelle de la piste	Risque	Largeur en deçà des normes de nouvelle construction Largeur dégagée réduite en hiver	Augmentation de la vitesse des usagers en sens unique Incohérence avec l'ouverture en été Mauvaise presse Gestion difficile	3	4	12	Évitement	Court terme : adopter un système de circulation pendulaire (unidirectionnelle) ; moyen terme : entamer des études supplémentaires pour l'élargissement potentiel de la piste ;	PJCCI (E/O)
Sécurité	12	Cyclistes ne respectant pas les consignes de sécurité et/ou de la signalisation	Risque	Comportement inadéquat de certains cyclistes Signalisation et consignes peu claires et / ou peu visibles sur la piste	Accidents Plaintes	3	4	12	Transfert	Étudier et mettre en place un système de réduction de la vitesse en concertation avec Vélo Québec et toutes les parties prenantes. Par exemple : installation d'un radar de vitesse ; suivi du comportement des cyclistes.	PJCCI cyclistes
Sécurité	14	Vitesse excessive des usagers sur la piste	Risque	Perte d'adhérence en hiver Pente abrupte de la piste Comportement inadéquat de certains cyclistes	Accidents Plaintes	4	3	12	Atténuation / Transfert	Augmenter la précision de prévision (communication avec Environnement Canada) ; être plus réactif (afin de pouvoir fermer la piste rapidement au besoin) ; augmenter la communication avec les usagers	PJCCI cyclistes
Entretien hivernal	41	Sous-estimation d'une tempête	Risque	Tempête de neige ou de verglas non prévue ou plus forte que prévue	Baisse de la sécurité des usagers (conditions de la piste)	3	4	12	Atténuation	Assurer que tous les aspects pertinents qui ont mené à la décision de ne pas ouvrir la piste ont été adressés ; communiquer les raisons et enjeux derrière cette décision.	PJCCI
Enjeux socio-politiques et niveau de service	20	Décision de fermeture complète de la piste multifonctionnelle en hiver	Enjeu	Variables (manque de fonds / politiques / techniques)	Mécontentement des comités de cyclistes Mauvaise presse Pression socio-politique	4	3	12	Évitement / Acceptation	Effectuer une étude pour les différentes options à long terme (par ex. Élargissement, couverture, etc.) en considérant la croissance potentielle des usagers ; inclure la gestion à long terme de la piste multifonctionnelle dans le plan de gestion d'actif pour le pont Jacques-Cartier	PJCCI
Enjeux socio-politiques et niveau de service	21	Divergence entre les décisions sur l'ouverture de la piste et la planification à long terme pour le pont Jacques-Cartier	Enjeu	Manque d'étude et de planification à long terme Manque d'un plan de gestion d'actif	Investissements non nécessaires Travaux mal ciblés Mauvaise presse Perte de crédibilité	3	4	12	Atténuation	Mettre en place un plan de gestion adéquate Mettre en place un protocole de communication adéquate	PJCCI (P)
Enjeux socio-politiques et niveau de service	30	Fermeture imprévue de la piste au cours de la journée	Enjeu	Événements météo imprévus Communication inadéquate avec les usagers Force majeure (accident / incendie ...etc.)	Plaintes / mécontentement du public Mauvaise presse	3	4	12	Atténuation / Acceptation	Mettre en place des mesures de sensibilisation (par ex. panneaux de signalisation)	PJCCI (P)
Sécurité	10	Cyclistes à contre sens (en cas de la variante unidirectionnelle)	Risque	Comportement inadéquat de certains cyclistes Implantation d'un système unidirectionnel	Accidents	2	5	10	Atténuation / Transfert	Mettre en place des mesures pour amélioration de la gestion de circulation à l'intersection (réduction de vitesse des voitures, sécuriser le passage des cyclistes et piétons, signalisation ...etc.)	PJCCI Cyclistes
Sécurité	13	Intersection du PISH peu sécuritaire	Risque	Manque de visibilité en hiver Vitesse élevée à l'intersection / adhérence en hiver	Accidents (voitures + cyclistes) Plaintes	5	2	10	Atténuation	Effectuer une revue de l'étude sur les chicanes afin de considérer l'entretien hivernal du pont Jacques-Cartier	PJCCI
Sécurité	18	Présence de chicanes	Risque	Réduisiton de la vitesse Pente abrupte de la piste Largeur en deçà des normes de nouvelle construction	Accidents ; difficulté de passage pour certains usagers (vélo tandem, poussettes et remorques) ; Plaintes	2	5	10	Atténuation	Mettre en place un mécanisme clair pour la prise de décision (logigramme)	PJCCI (C)
Entretien hivernal	32	Travaux de déneigement prolongés	Enjeu	Équipement tombe en panne Conditions météo difficiles Équipe moins efficace	Plaintes / mecontentement du public Mauvaise presse	2	5	10	Acceptation	compréhension des conditions météo et paramètres déclenchant l'ouverture / fermeture de la piste évisager un plan d'amélioration continue	PJCCI (O / E)

Analyse préliminaire des risques

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Événement		Risque Enjeu Opportunité	Cause(s) de l'événement	Conséquence(s)	Cotation (voir légende)			Plan de gestion des risques		Responsabilité d'action	
Catégorie	#	Événement			G, Gravité	P, Probabilité d'occurrence	C, Criticité = GxP	Type	Actions		
Entretien hivernal	44	Utilisation des systèmes / équipements jamais testés ou utilisés à grande échelle	Enjeu	Manque d'expertise technique	Difficulté de gestion Interruptions de service Mauvaise presse	3	3	9	Atténuation	Engager des experts au besoin Formation de personnel	PJCCI
Enjeux socio-politiques et niveau de service	26	Difficulté de satisfaire les attentes des cyclistes	Enjeu	Plage d'ouverture limitée Qualité de surface médiocre (mauvaise exécution des opérations) Communication inadéquate	Plaintes Mauvaise presse	3	3	9	Acceptation	Envisager un plan d'amélioration continue	PJCCI
Structure et durabilité	1	Application directe de produits de déglaçage lors de déneigement de la piste	Risque	Déneigement mécanique par méthodes conventionnelles	Réduction potentielle de la durabilité de la dalle	2	4	8	Atténuation	(1) Effectuer des inspections et/ou installer un système de suivi (instrumentation) pour évaluer la corrosion et la pénétration des chlorures ; (2) Installation d'une membrane d'étanchéité ; (3) Réduction de la quantité de chlorures épandus (équilibre performance-durabilité)	PJCCI (I)
Entretien hivernal	33	Obturation de drains sur la piste	Enjeu	Neige stockée et tassée en bordure Est de la piste ; Système de chauffage (regel de l'écoulement aux drains)	Formation de flaques de neige fondu ou de verglas ; perte de contrôle de l'état de la piste sur une plus longue durée (fermeture)	2	4	8	Atténuation	Équipe de travail qui effectuera le dégagement des drains à la main ; inspection régulière de l'état des drains ; équipe dédiée aux opérations d'entretien hivernal	PJCCI (O / E)
Entretien hivernal	34	Panne ou bris mécanique sur les systèmes de déneigement	Enjeu	Vandalisme ; Manque de redondance des systèmes ; Usure ; Manque d'entretien	Fermeture de la piste multifonctionnelle en fonction des conditions de la piste et jusqu'à réparation du système	2	4	8	Acceptation	Réaliser une maintenance régulière des équipements ; exiger au sous-traitant de garantir la disponibilité des équipements en tout temps	PJCCI (O / E)
Entretien hivernal	38	Coordination inadéquate avec les villes de Longueuil et Montréal en fin de piste multifonctionnelle	Enjeu	Manque de coordination / communication	Mauvaise presse ; sécurité des usagers réduite ou de manière plus rare, accès difficile au pont	2	4	8	Atténuation	Mettre en place un plan de gestion adéquate en consultation avec les Villes Mettre en place un protocole de communication adéquate	PJCCI et les Villes
Enjeux socio-politiques et niveau de service	19	Communication inadéquate aux usagers de l'état de la piste	Enjeu	Manque d'un protocole de communication ; Application inadéquate du protocole de communication	Plaintes et mécontentement Mauvaise presse	2	4	8	Atténuation	Mettre en place un protocole de communication adéquat pour tous les usagers et à l'intérieur	PJCCI (Comm)
Enjeux socio-politiques et niveau de service	24	Accident mineur durant les opérations ou les travaux d'entretien	Risque	Manque de mesures de protection Comportement inadéquat de certains cyclistes Gestion inadéquate de la piste	Mauvaise presse Perte de crédibilité	2	4	8	Atténuation	Adresser tous les aspects dans la section "sécurité des usagers"	PJCCI
Sécurité	11	Chute de glace hors de la piste multifonctionnelle (par ex. lors des opérations de déneigement)	Risque	Géométrie de la barrière utilisée (ouverture en bas) Mauvaise gestion des opérations de déneigement Formation de la glace	Blessures des usagers de la route Dommages matériels	3	2	6	Atténuation	Installer une lisse de protection aux zones identifiées critiques	PJCCI (C)
Entretien hivernal	35	Manque de produits de déglaçage	Enjeu	Non-disponibilité (fournisseur), manque d'anticipation de l'approvisionnement	Fermeture de la piste multifonctionnelle en fonction des conditions de la piste	2	3	6	Atténuation	Assurer l'approvisionnement anticipé, maintenir un stock suffisant avec une marge de quantité en réserve	PJCCI (O / E)
Entretien hivernal	37	Vandalisme sur la structure ou sur tout autre élément (système chauffant, station météo, panneaux, portail...)	Risque	Manque de sécurité ; objets visibles	Panne sur les systèmes de déneigement ; Remplacement d'éléments et coûts associés ; baisse de la sécurité des usagers	2	3	6	Acceptation / Atténuation	Augmenter la surveillance et le monitorage des aires de stockage des équipements	SQ
Entretien hivernal	39	Expertise à développer pour effectuer les travaux de déneigement et/ou les travaux connexes	Enjeu	Manque de ressources ou matériels	Entretien inadéquat de la piste et baisse de sécurité des usagers ; ou fermeture de la piste de manière plus récurrente	2	3	6	Atténuation	Mettre en place une équipe dédiée aux opérations d'entretien hivernal de la piste S'assurer la disponibilité et la redondance des membres de l'équipe	PJCCI (O / E)
Enjeux socio-politiques et niveau de service	27	Augmentation de l'achalandage : capacité actuelle de la piste multifonctionnelle trop faible	Enjeu	Engouement du public par l'ouverture hivernale de la piste Augmentation de l'achalandage en hiver sur le réseau des cyclistes de la région métropolitaine montréalaise	Accidents Gestion difficile de la piste	3	2	6	Atténuation	Envisager des investissements additionnels dans les mesures de sécurité Revue de plan de gestion de la piste Assurer une bonne planification future en considérant une augmentation potentielle de nombre d'usagers	PJCCI
Enjeux socio-politiques et niveau de service	31	Ouverture de nuit de la piste multifonctionnelle	Risque	Augmenter la plage d'ouverture Fournir un service continu sur la piste	Accidents - Condition plus difficile la nuit (froid ...etc.) Gestion difficile de la piste pendant la nuit	2	3	6	Évitement	Fermeture de nuit sauf dans les cas très particuliers (par ex. durant la nuit blanche à Montréal ou conditions exceptionnelles / estivales) Mettre en place un mécanisme clair pour la prise de décision (logigramme)	PJCCI (O / E)
Sécurité	6	Ouverture de la piste lors des conditions climatiques sévères	Risque	Mauvaise gestion de la piste multifonctionnelle	Accident sur la piste, blessures graves Fermeture de la piste pendant une certaine période	5	1	5	Évitement	compréhension des conditions météo et paramètres déclenchant l'ouverture / fermeture de la piste ; assurer une bonne communication des conditions de la piste avec les usagers Augmenter la précision de prévision (communication avec Environnement Canada) ; être plus réactif (attendre le dernier moment pour fermer la piste) ; augmenter la communication avec les usagers ; épandage préventif	PJCCI (E/O) PJCCI (Comm)
Entretien hivernal	40	Surestimation d'une tempête	Enjeu	Exagération météorologique de la force de la tempête (précision faible des systèmes de prévision) ; voire exagération médiatique	Mauvaise presse ; baisse du niveau de service (dérangement des usagers)	1	5	5	Acceptation / Atténuation	Environsnement Canada) ; être plus réactif (attendre le dernier moment pour fermer la piste) ; augmenter la communication avec les usagers ; épandage préventif	PJCCI
Enjeux socio-politiques et niveau de service	25	Accident durant les opérations ou les travaux d'entretien (présence de cycliste sur la piste)	Risque	Manque de mesures de protection Comportement inadéquat de certains cyclistes Gestion inadéquate de la piste	Mauvaise presse Fermeture de la piste et mécontentement du public / usagers Perte de crédibilité	5	1	5	Atténuation	Adresser les aspects importants dans la section "sécurité des usagers"	PJCCI
Autres	46	Pollution par rejet dans l'environnement (neige / produit)	Risque	Opération de déneigement ; fortes quantités de neige ; manque de drainage aux sections 3 et 7	Risque sur l'environnement	1	5	5	Atténuation	Installation de lisse de retenue ; Installation d'une membrane combinée à la lisse pour éviter le drainage des produits directement dans le fleuve (coté Montréal)	PJCCI

Analyse préliminaire des risques

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

I = Ingénierie

C = Construction

O/E = Opération Entretien
Comm = Communication

Événement			Cotation (voir légende)				Plan de gestion des risques				
Catégorie	#	Événement	Risque Enjeu Opportunité	Cause(s) de l'événement	Conséquence(s)	G, Gravité	P, Probabilité d'occurrence	C, Criticité = GxP	Type	Actions	Responsabilité d'action
Sécurité	7	Chute de glace sur la piste multifonctionnelle (par ex. de la superstructure)	Risque	Formation de verglas Vents forts	Cyclistes frappés par la chute de glace Distraction des cyclistes Accidents	4	1	4	Atténuation	Fermeture de la piste multifonctionnelle en cas de formation de gros morceaux de glace Inspection de la piste lors des événements identifiés critiques	PJCCI (E/O)
Sécurité	15	Projections depuis les voies de circulation	Risque	Déneigeuse de la voie de circulation roule vite Manque des éléments de protection	Accidents Incomfort	1	4	4	Atténuation / Évitement	Installation d'un écran de protection	PJCCI
Sécurité	16	Éblouissement	Risque	Phares des voitures sur la voie de circulation	Accidents Incomfort	1	4	4	Atténuation / Évitement	Installation d'un écran anti-éblouissement / protection	PJCCI
Entretien hivernal	36	Endommagement des éléments lors des opérations de déneigement (comme les conduits installés sur la barrière, les garde-corps ou tout autre élément)	Risque	Risque inhérent au déneigement ; Présence d'obstacles ; Perte de contrôle de l'engin (vitesse, conditions difficiles)	Dommages aux barrières, conduites, ou à l'engin ; risque de coupure de connexion des systèmes STI (super signalisation, feux des voies), impact sur la circulation du pont	2	2	4	Atténuation	S'assurer que les opérateurs des équipements sont formés pour effectuer les opérations de déneigement de façon sécuritaire, incluant les protocoles de communication d'urgence	PJCCI (O / E)
Entretien hivernal	42	Impact sur le trafic routier lors des opérations de déneigement de la piste	Enjeu	Soufflage de la neige de la piste sur les voies de trafic	Entrave à la circulation routière	1	4	4	Atténuation	Mettre en place un plan de gestion adéquate Mettre en place un protocole de communication adéquate Limiter les plages disponibles pour le soufflage de la piste pour minimiser l'impact sur la circulation	PJCCI (O / E)
Enjeux socio-politiques et niveau de service	22	Faible achalandage hivernal lors de l'ouverture de la piste	Enjeu	Conditions météo difficiles Cyclistes découragés en hiver Estimation d'achalandage moins précise Mauvaise gestion hivernale de la piste (par ex. mauvaise exécution des opérations / mauvaise communication)	Investissements jugés non nécessaires par certains Mauvaise presse	2	2	4	Atténuation / Acceptation	Investissements prudents pour la première année de l'ouverture (année de calibration) Comptage de nombre des cyclistes pour la première année afin d'évaluer la rentabilité des investissements futurs	PJCCI
Enjeux socio-politiques et niveau de service	28	Nécessite de hausser le niveau de service	Enjeu	Croissance potentielle de l'achalandage Instatisfaction des cyclistes	Pression sociopolitique Investissements additionnels	1	4	4	Acceptation	Envisager un plan d'amélioration continue	PJCCI
Sécurité	17	Mauvaise visibilité sur la piste	Risque	Manque de lumière Mauvais contraste de luminosité	Accidents Incomfort	1	3	3	Atténuation / Évitement	Améliorer la luminosité aux zones identifiées critiques Corriger la lumière sur la piste (contraste entre les différentes zones)	PJCCI
Entretien hivernal	43	Augmentation de la variabilité du climat et décalage des saisons	Opportunité	Changement climatique	Les opérations de déneigement hivernales permettront d'être plus réactif en fonction des conditions météorologiques changeantes	4	0	0	Acceptation	Considérer le changement climatique dans les planifications à long terme Réaliser des études pour évaluer l'impact des changements climatiques sur la durabilité/pérennité de l'ouvrage	PJCCI
Enjeux socio-politiques et niveau de service	23	Faible achalandage hivernal lors de l'ouverture de la piste	Opportunité	Conditions météo difficiles Cyclistes découragés en hiver Estimation d'achalandage moins précise	Fermeture future de la piste / niveau de service réduit Maintenir une stratégie d'exploitation limitée (ouverture restreinte)	2	0	0	Transfert	Investissements prudents pour la première année de l'ouverture (année de calibration) Comptage de nombre des cyclistes pour la première année afin d'évaluer la rentabilité des investissements futurs	Cyclistes
Enjeux socio-politiques et niveau de service	29	Compétition (ou émulation) avec la piste du nouveau pont Champlain; estacade	Opportunité	Expertise acquise par PJCCI	Implication dans la gestion des nouveaux actifs	4	0	0	Acceptation	Mettre en valeur l'expertise acquise lors du projet pilote et par la suite lors de l'ouverture de la piste (mise en pratique)	PJCCI

A12 Analyse Multicritère

A12.1 Analyse multicritère (tableau complet avec critères retenus)

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Le : 09 octobre 2018

Par :

		<u>Pondération des critères</u>						
		Certains critères ont été retirés de la présente analyse en raison de leur impact faible ou négligeable (pondération 0)						
		1 : important, mais non indispensable	2 : très important	3 : essentiel et incontournable				
Dimension	ID	Critère d'évaluation	Critère retiré (supprimé ou combiné)	Définition du critère d'évaluation	Total	25	Nouvelle pondération	Pondération: explication

Économique

Économique	1	Dépenses Opérationnelles (OPEX)		Critère quantitatif Comprend généralement les coûts d'entretien, opérations et maintenance : la consommation énergétique, la main d'œuvre et la logistique, l'opération de navettes Vélobus, si applicable. Ne comprend pas l'achat initial des engins de déneigement. Ces coûts sont actualisés en valeur de cette année, 2018, et sont annualisés sur 50 ans	3	Les coûts associés aux différentes options sont importants, ainsi leur considération est essentielle dans la présente analyse. De plus, les coûts initiaux (CAPEX) sont annualisés sur 50 ans afin d'être comparables aux coûts opérationnels (OPEX). Ceci permet de simplifier la comparaison des coûts sur la durée de vie voulue
Économique	6	Dépenses d'investissement (CAPEX)		Critère quantitatif Comprend généralement les coûts d'entretien, opérations et maintenance : la consommation énergétique, la main d'œuvre et la logistique, l'opération de navettes Vélobus, si applicable. Ne comprend pas l'achat initial des engins de déneigement. Ces coûts sont actualisés en valeur de cette année, 2018, et sont annualisées sur 50 ans	3	Les coûts associés aux différentes options sont importants, ainsi leur considération est essentielle dans la présente analyse. De plus, les coûts initiaux (CAPEX) sont annualisés sur 50 ans afin d'être comparables aux coûts opérationnels (OPEX). Ceci permet de simplifier la comparaison des coûts sur la durée de vie voulue

Environnementale

Environnementale	10	Impact sur l'atmosphère (Emissions CO2)		Critère quantitatif Un calcul simplifié des émissions de CO2 (uniquement) a été réalisé et prend en compte l'impact de chaque option sur l'atmosphère : énergie fossile et électrique, réduction des déplacements automobiles, énergie grise (fabrication de matériaux de construction), navette. L'impact de la mobilité douce (incitation à l'utilisation du vélo, etc.) est donc considéré dans ce calcul	1	Suite à l'analyse des émissions de Gaz à Effet de Serre, l'impact sur l'atmosphère des options considérées est relativement faible même pris à l'échelle du pont uniquement (comparé aux émissions de l'ensemble du trafic routier sur le pont par exemple)
Environnementale	12	Rejet de produits de déglaçage dans l'environnement		L'impact du rejet de produits de déglaçage dans l'environnement est évalué ici. L'impact du rejet de neige pure dans l'environnement n'est pas considéré ici, car nul.	1	L'impact du rejet de produits de déglaçage dans l'environnement est très faible, voire négligeable, comme démontré dans l'étude préparatoire dans le cadre du même projet

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Le : 09 octobre 2018
Par :

Certains critères ont été retirés de la présente analyse en raison de leur impact faible ou négligeable (pondération 0)

- 1 : important, mais non indispensable
2 : très important
3 : essentiel et incontournable

Dimension	ID	Critère d'évaluation	Critère retiré (supprimé ou combiné)	Définition du critère d'évaluation	Total	25	Nouvelle pondération	Pondération: explication
Sociale								
Sociale	13	Impact sociopolitique : avis du public		Il s'agit ici d'évaluer l'impact de chaque option sur le public, de manière très générale, en combinant l'ensemble des aspects du projet et ses conséquences sur l'opinion générale du public : notamment les aspects économique, environnemental, social, touristique, sécurité qu'ils soient réels ou perçus. Ce critère a été évalué selon la perspective de l'équipe du projet – un sondage public est recommandé pour une évaluation plus approfondie	2			Les impacts sociopolitiques liés aux décisions d'ouverture ou de fermeture de la piste peuvent être importants et remettre en cause l'ensemble du projet. Toutefois ils sont difficiles, voire impossibles à évaluer et prévoir et peuvent être atténués par certaines mesures (communication). Une pondération moyenne de 2 a ainsi été choisie
Sociale	16	Difficulté liée à la communication et à la sensibilisation		Communication nécessaire aux usagers ; que ce soit en temps réel (ouverture de la piste en temps réel, communication des alertes météorologiques et prévisions de fermeture de la piste), ou de façon permanente (signalisation, panneaux informatifs, radars pédagogiques), ou dans une moindre mesure pour la sensibilisation (campagne médiatique, panneaux de sensibilisation sur place). La sensibilisation des usagers apparaît comme un minimum dans chacune des options d'opération y compris en cas de fermeture hivernale de la piste	1			Les difficultés liées à la communication ont des conséquences sociopolitiques importantes, toutefois elles peuvent être atténuées par un certain nombre de mesures
Sociale	18	Niveau de service : ouverture hivernale		Critère quantitatif La décision d'ouverture hivernale de la piste aura un impact important sur le niveau de service fourni et sur la satisfaction des cyclistes. Selon la solution retenue, différentes durées d'ouverture de la piste en hiver pourraient être atteintes sur une semaine de 7 jours. Ceci dépend de la performance de l'option en question par rapport à l'efficacité et la rapidité des opérations	3			Le niveau de service est un enjeu majeur dans cette étude, il porte ainsi une très forte pondération. Le niveau de service comprend l'impact de la décision de l'ouverture de la piste, la durée d'ouverture potentielle, impact des conditions climatiques sévères, etc.

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Le : 09 octobre 2018
Par : [REDACTED]

Pondération des critères

Certains critères ont été retirés de la présente analyse en raison de leur impact faible ou négligeable (pondération 0)

- 1 : important, mais non indispensable
- 2 : très important
- 3 : essentiel et incontournable

Dimension	ID	Critère d'évaluation	Critère retiré (supprimé ou combiné)	Définition du critère d'évaluation	Total	25	Nouvelle pondération	Pondération: explication
Sociale	22	Niveau de service : ouverture bidirectionnelle		À cause de limitations géométriques, la piste pourrait ne pas être ouverte de manière bidirectionnelle pour l'option en question	1			Une ouverture unidirectionnelle affecterait le niveau de service, mais de manière secondaire, surtout si les ouvertures sont organisées selon les périodes de pointes fortement directionnelles
Sociale	24	Niveau de confort et de sécurité		Niveau de confort et de sécurité fournis par les conditions de surface, la largeur de la piste dégagée ou résiduelle, le comportement des usagers et leur vitesse. Ce critère est évalué du point de vue de l'usager et de sa sécurité, indépendamment de la responsabilité de PJCCI (notamment en cas de piste fermée, la sécurité de l'individu n'est pas acceptable, d'où la fermeture de la piste par PJCCI)	3			La sécurité est un critère essentiel dans le choix d'une option. Il faut noter que la sécurité est généralement associée à un niveau d'acceptabilité du risque. Un point de sécurité inacceptable va nécessiter des mesures de mitigation du risque, voire la fermeture de la piste. Le seuil de tolérance des risques est à identifier par PJCCI et selon l'analyse des risques
Technique								
Technique	29	Difficulté d'implémentation		Études et travaux additionnels requis afin de compléter l'implémentation de l'option retenue ; complexité des études, étendue des travaux nécessaires (multidisciplinaire) ; étendue de la réfection	2			La difficulté d'implémentation d'une option pourrait remettre en cause la réalisation de l'ensemble du projet. Cependant, toute difficulté est associée à un coût d'implémentation, abordé dans la section économique
Technique	32	Difficulté opérationnelle et entretien		Efficacité et complexité des opérations : fréquence, expertise nécessaire, uniformité du résultat, communication interne requise et conséquences sur d'autres éléments secondaires (drains, joints...)	2			Les difficultés opérationnelles peuvent affecter l'efficacité globale de l'option choisie, cependant elles ne remettent pas en cause sa faisabilité et elles peuvent être mitigées

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Le : 09 octobre 2018
Par : [REDACTED]

Pondération des critères

Certains critères ont été retirés de la présente analyse en raison de leur impact faible ou négligeable (pondération 0)

- 1 : important, mais non indispensable
- 2 : très important
- 3 : essentiel et incontournable

Dimension	ID	Critère d'évaluation	Critère retiré (supprimé ou combiné)	Définition du critère d'évaluation	Total	25	Nouvelle pondération	Pondération: explication
Technique	38	Durabilité		Impact de la solution retenue sur la durabilité de la piste et plus généralement sur sa longévité.	2			Bien que la durabilité est primordiale dans les structures d'envergure, nous avons vu ici qu'elle est peu affectée par la plupart des options étudiées. Une pondération moyenne est ainsi donnée puisqu'elle est identifiée comme un risque à faible probabilité. De plus, des mesures sont faciles à implémenter afin de mitiger ce risque.
Technique	42	Résilience		Il s'agit ici d'évaluer la résilience de chaque option. Ceci inclus la redondance du système en cas de bris ou tout autre événement affectant le niveau de sécurité, et l'adaptativité de l'option aux changements futurs (décisions politiques, changements au niveau de la mobilité...) La redondance est considérée comme un critère plus important que l'adaptativité ici	1			La résilience est un critère important. Cependant, les conséquences d'un manque de redondance du système seront raisonnablement tolérable pour les usagers. Du point de vue de l'adaptabilité du système, les conséquences sont principalement liées au coûts; d'où une pondération faible de ce critère.

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Le : 09 octobre
2018
Par : [REDACTED]

Critères de base	Notation des options (*) ; voir notes ci-dessous (**) pour les hypothèses associées à chaque option					Explication
	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable	
Économique						
Dépenses Opérationnelles (OPEX)	3.3	3.9	1.8	1.0	3.1	<p>5 0 = Coûts égaux à [REDACTED] 4 0 = Coûts égaux à [REDACTED] 3 0 = Coûts égaux à [REDACTED] 2 0 = Coûts égaux à [REDACTED] 1 0 = Coûts égaux à [REDACTED]</p> <p>Pour les coûts intermédiaires, la note est interpolée entre ces valeurs</p>
Dépenses d'investissement (CAPEX)	5.0	4.9	3.3	3.3	2.1	<p>5 0 = Coûts égaux à [REDACTED] 4 0 = Coûts égaux à [REDACTED] 3 0 = Coûts égaux à [REDACTED] 2 0 = Coûts égaux à [REDACTED] 1 0 = Coûts égaux à [REDACTED]</p> <p>Pour les coûts intermédiaires, la note est interpolée entre ces valeurs</p>
Environnementale						
Impact sur l'atmosphère (Emissions CO2)	1.0	3.2	2.6	2.3	3.3	<p>5 0 = Émissions égales à -37'500 kg éq CO2 / an (crédit) 4 0 = Émissions égales à -12'500 kg éq CO2 / an (crédit) 3 0 = Émissions égales à +12'500 kg éq CO2 / an 2 0 = Émissions égales à +37'500 kg éq CO2 / an 1 0 = Émissions égales à +62'500 kg éq CO2 / an</p> <p>Pour les émissions intermédiaires, la note est interpolée entre ces valeurs</p>
Rejet de produits de déglaçage dans l'environnement	4	3	3	4	3	<p>5 = Aucun rejet de produits 4 = Faibles rejets, voire négligeables 3 = Rejets notables 2 = Rejets importants 1 = Pollution évidente</p> <p>Notre étude a évalué l'impact des rejets de produits comme faible pour l'environnement même lors d'un épandage direct sur la piste cyclable. Les options avec déneigement (Déneigement conventionnel, système combiné, et installation de toiture) impliquent des rejets notables tandis que les autres options montrent des rejets faibles (Statu Quo et chauffage) principalement dûs aux projections depuis la route</p>

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Le : 09 octobre
Par : [REDACTED]

Critères de base	Notation des options (*) ; voir notes ci-dessous (**) pour les hypothèses associées à chaque option					Explication
	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable	
Sociale						
Impact sociopolitique : avis du public	● 2 0	● 4 0	● 3 0	● 2 0	● 3 0	<p>5 = Avis très positif du public 4 = Avis positif du public 3 = Avis mitigé du public 2 = Avis négatif du public 1 = Avis très négatif du public</p> <p>Le Statu Quo pourrait recevoir un avis négatif du public notamment à cause des pressions politiques et sociales croissantes vers la mobilité durable Le système combiné pourrait recevoir un avis mitigé au vu des coûts du système, notamment énergétiques, d'un côté, et de l'autre le côté fonctionnel (redondant) Le système de chauffage pourrait recevoir un avis négatif à cause de sa consommation énergétique élevée. Les coûts associés du système et les risques de fermeture fréquents (imprévus) pour entretien pourraient également être sujet de critiques Le déneigement conventionnel est une méthode éprouvée à Montréal et devrait globalement recevoir un avis positif du public L'option avec toiture pourrait recevoir des avis mitigés à cause des coûts d'un côté, et de l'aspect "simple" et efficace (moins de logistique de fermeture par exemple) ; cependant techniquement c'est en réalité très complexe de l'autre. Cependant, l'effet tunnel créé par la toiture pourrait mürir à l'expérience des usagers et la toiture pourrait enlever de la qualité architecturale du pont</p>
Difficulté liée à la communication et à la sensibilisation	● 4 0	● 1 0	● 2 0	● 3 0	● 3 0	<p>5 = Aucun besoin 4 = Besoin de communication faible (sensibilisation uniquement) 3 = Besoin de communication seulement dans des cas exceptionnels 2 = Besoin de communication occasionnel 1 = Besoin de communication quotidien</p> <p>Avec le Statu Quo, un effort de communication faible sera nécessaire pour sensibiliser les usagers et leur faire comprendre les raisons de la fermeture. En cas de déneigement conventionnel, une communication presque quotidienne sera indispensable pour la coordination entre les opérations et les usagers Avec le chauffage combiné au déneigement, la communication sera indispensable mais occasionnelle en cas de déneigement (moins fréquent) Avec le système chauffant, la communication (sensibilisation) sera rarement nécessaire ; en cas de bns ou lors de conditions météorologiques exceptionnelles En cas d'installation d'une toiture, la communication (sensibilisation) sera nécessaire rarement, par exemple en cas de déneigement dû à des conditions météorologiques exceptionnelles</p>
Niveau de service : ouverture hivernale	● 1 0	● 4 0	● 4 4	● 4 8	● 4 8	<p>5 = Piste ouverte en continu (100%) 4 = Piste ouverte sauf conditions exceptionnelles (bris, tempête...) 3 = Piste ouverte sauf à certaines heures précises pour les opérations 2 = Piste fermée régulièrement pour les opérations 1 = Piste fermée en hiver (0%)</p> <p>Les notes ont ici été attribuées proportionnellement au nombre d'heures théoriques d'ouverture de la piste durant l'hiver et selon les hypothèses de chaque option (exemple, Option avec déneigement conventionnel, scénario "flexible", fournit une ouverture sur 75% du temps éligible, d'où la note de 4 0). Il est supposé que les options avec chauffage ou toiture offrent un maximum d'ouverture soit 95% du temps, car 5% sont nécessaires pour l'entretien, les tempêtes extrêmes ou en cas de bns</p>

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Le : 09 octobre
2018
Par : [REDACTED]

Critères de base	Notation des options (*) ; voir notes ci-dessous (**) pour les hypothèses associées à chaque option					Explication
	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable	
Niveau de service : ouverture bidirectionnelle	● 1 0	● 4 0	● 5 0	● 5 0	● 5 0	<p>5 = Ouverture bidirectionnelle 4 = Ouverture bidirectionnelle possible 3 = Ouverture strictement unidirectionnelle () 1 = Piste fermée</p> <p>Les options avec chauffage (y compris combiné) ou avec toiture pourraient offrir un niveau de sécurité proche des conditions estivales et donc une ouverture bidirectionnelle</p> <p>Les options avec déneigement impliquent une réduction de la largeur libre par moment, dépendamment des conditions météorologiques et de l'état de la piste ; une ouverture bidirectionnelle est cependant possible</p> <p>Il faut noter que le niveau de service est réduit en cas d'ouverture unidirectionnelle de la piste, mais relativement peu par rapport à une fermeture totale (Statu Quo), d'où l'absence de note "2"</p>
Niveau de confort et de sécurité	● 1 0	● 3 0	● 4 0	● 4 0	● 4 0	<p>5 = Largeur, conditions de surface et confort quasi-parfaits 4 = Largeur et conditions de surface acceptables, ou niveau de confort réduit 3 = Largeur minimale et conditions de surface acceptables 2 = Largeur et conditions de surface minimales 1 = Largeur et conditions de surface non acceptables</p> <p>Statu Quo : Largeur et conditions de surface non acceptables, ce qui rend la piste non praticable ; d'où la fermeture</p> <p>Déneigement : Largeur dégagée minimale mais conditions de surfaces acceptables</p> <p>Piste chauffée (avec ou sans déneigement) : Largeur acceptable et conditions de surface acceptables (pas parfaites)</p> <p>Toiture : Largeur acceptable et conditions de surface acceptables voire quasi-parfaites, mais confort réduit (effet tunnel)</p>
Technique						
Difficulté d'implémentation	● 5 0	● 4 0	● 2 0	● 2 0	● 2 0	<p>5 = Implémentation facile (aucune étude nécessaire) 4 = Implémentation simple 3 = Implémentation nécessitant des études et des travaux notables 2 = Implémentation difficile et études pointues 1 = Implémentation très difficile (travaux conséquents et études approfondies)</p> <p>Statu Quo : aucune difficulté d'implémentation, option déjà testée</p> <p>Déneigement : implémentation simple, partiellement testée (hors logistique complexe, voir critère suivant)</p> <p>Piste chauffée avec ou sans déneigement : implémentation difficile (construction en phase, connectivité électrique complexe) et études pointues (effets thermiques), bien que testée partiellement</p> <p>Toiture : implémentation difficile (construction en phase) et études pointues (vent, renforcement de la structure)</p>
Difficulté opérationnelle et entretien	● 5 0	● 3 0	● 3 0	● 3 0	● 4 0	<p>5 = Aucune opération nécessaire 4 = Opérations simples et peu fréquentes 3 = Opérations simples et fréquentes / ou complexes et peu fréquentes 2 = Opérations complexes et fréquentes 1 = Opérations très complexes et fréquentes</p> <p>Statu Quo : aucune opération nécessaire</p> <p>Déneigement et piste avec chauffage combiné au déneigement : opérations complexes bien que testées en partie, notamment à cause de la communication interne, de l'espace restreint et de l'entrave aux usagers</p> <p>Piste chauffée sans déneigement : opérations assez complexes, mais potentiellement moins d'activité au jour le jour (automatisation). Un entretien minimal et des réparations répétées pourraient toutefois tenir ce bilan</p> <p>Toiture : opérations d'entretien ou déneigement peu fréquentes, et relativement simples</p>

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Le : 09 octobre
2018
Par : [REDACTED]

Notation des options (*) ; voir notes ci-dessous (**) pour les hypothèses associées à chaque option

Critères de base	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable	Echelle de notation	Explication
Durabilité	4,0	2,0	2,0	2,0	3,0	5 = Amélioration de la durabilité 4 = Impact négligeable sur la durabilité 3 = Impact faible sur la durabilité 2 = Impact moyen sur la durabilité 1 = Impact important sur la durabilité	Statu Quo : projections de sels depuis la route négligeables Déneigement et piste avec chauffage (combiné ou non) : projections depuis la route et épandage de produit, voire effets thermiques en cas de chauffage. Tout ceci implique un impact moyen sur la durabilité (suite aux analyses préliminaires faites dans le présent projet, des études supplémentaires seront nécessaires en cas de chauffage) Toiture : projections depuis la route augmentées de déneigement peu fréquent, donc impact faible
Résilience	1,0	4,0	4,0	2,0	3,0	5 Option redondante et adaptative 4 Option redondante et peu adaptative 3 Option redondante mais non adaptative 2 Option non redondante mais un peu adaptative 1 Option ni redondante, ni adaptative	La résilience est de manière générale la capacité d'un système à s'adapter après la survenue d'un incident Nous distinguons ici trois volets principaux au sein de la résilience : - La redondance en cas de bris ou tout autre événement affectant le niveau de sécurité - L'adaptativité de l'option aux changements futurs (décisions politiques, changements au niveau de la mobilité) - La réactivité des opérations aux conditions météorologiques. Ce dernier volet est validé par toutes les options sauf Statu Quo, il n'est donc pas étudié ici Statu Quo : option non résiliente et non adaptative : aucune adaptativité aux conditions changeantes, notamment en cas de neige hors période hivernale ou future augmentation de l'achalandage sur la piste Déneigement : option adaptable en fonction des conditions changeantes (météo, achalandage...) et partiellement redondante (possibilité d'avoir de la capacité supplémentaire au niveau des engins de déneigement) Système combiné : option redondante et relativement adaptable en fonction de conditions changeantes Piste chauffée seule : option non redondante en cas de bris ou de tempête majeure Option relativement facile à adapter en fonction des conditions changeantes Toiture : option redondante mais pas adaptative en cas de changements futurs (et affecte les conditions estivales)

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

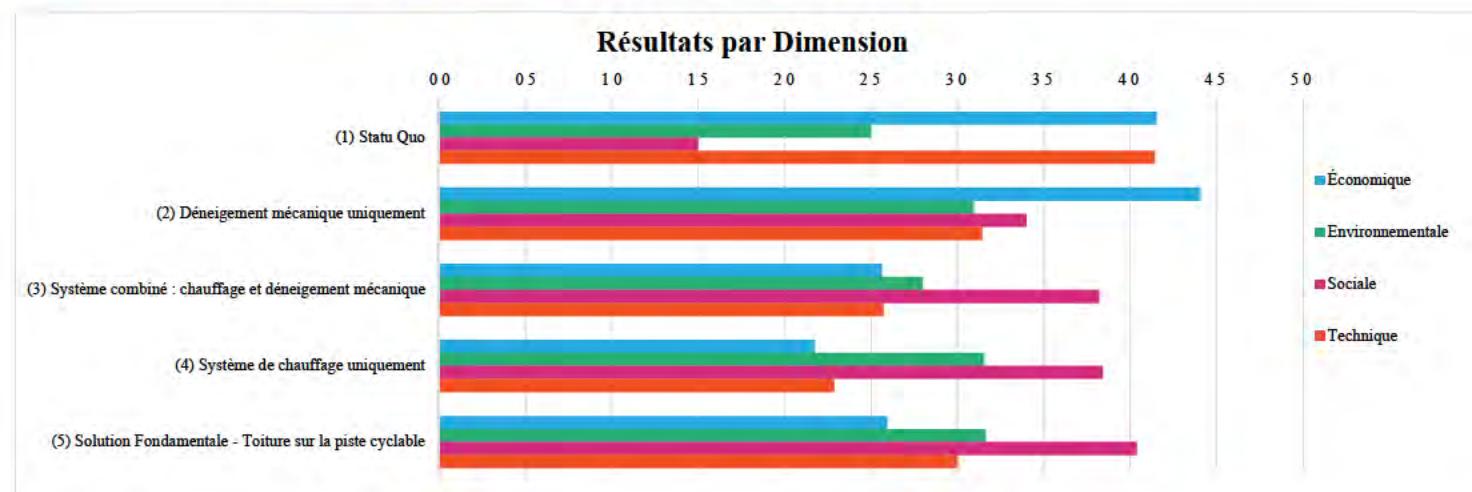
Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Le : 09 octobre
2018
Par : [REDACTED]

Critères de base	Notation des options (*) ; voir notes ci-dessous (**) pour les hypothèses associées à chaque option					Echelle de notation	Explication
	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable		

Résultats non pondérés (notes sur 5)

Résultats par Dimension	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable
Economique	4.2	4.4	2.6	2.2	2.6
Environnementale	2.5	3.1	2.8	3.2	3.2
Sociale	1.5	3.4	3.8	3.8	4.0
Technique	4.1	3.1	2.6	2.3	3.0



Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

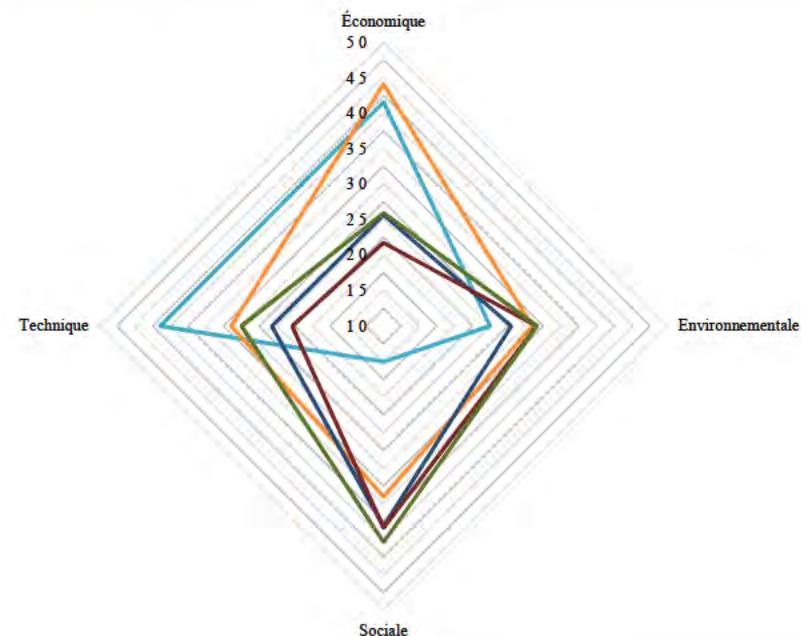
Le : 09 octobre
2018
Par : [REDACTED]

Critères de base	Notation des options (*); voir notes ci-dessous (**) pour les hypothèses associées à chaque option					Echelle de notation	Explication
	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable		

Résultats non pondérés (notes sur 5)

Résultats par dimension, non pondérés

- (1) Statu Quo
- (2) Déneigement mécanique uniquement
- (3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique
- (4) Système de chauffage uniquement
- (5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable



Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Le :
Par :

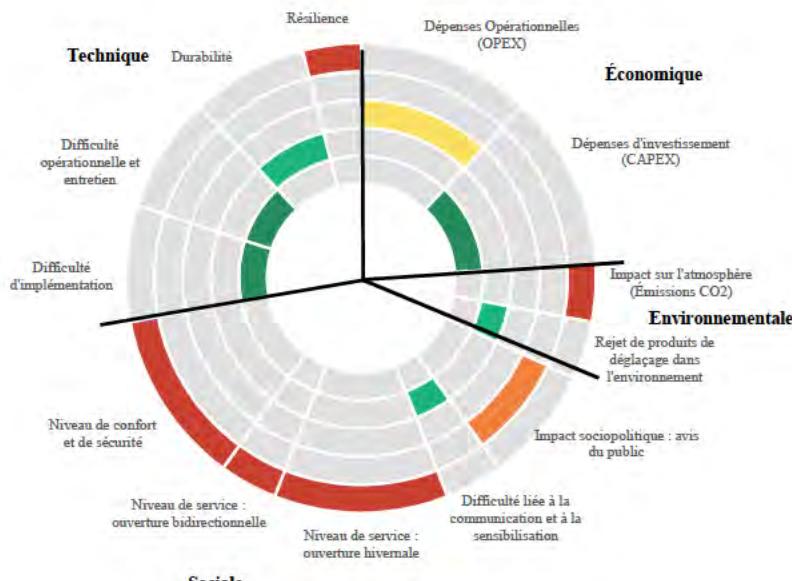
09 octobre
2018
[REDACTED]

Critères de base	Notation des options (*) ; voir notes ci-dessous (**) pour les hypothèses associées à chaque option					Echelle de notation	Explication
	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable		

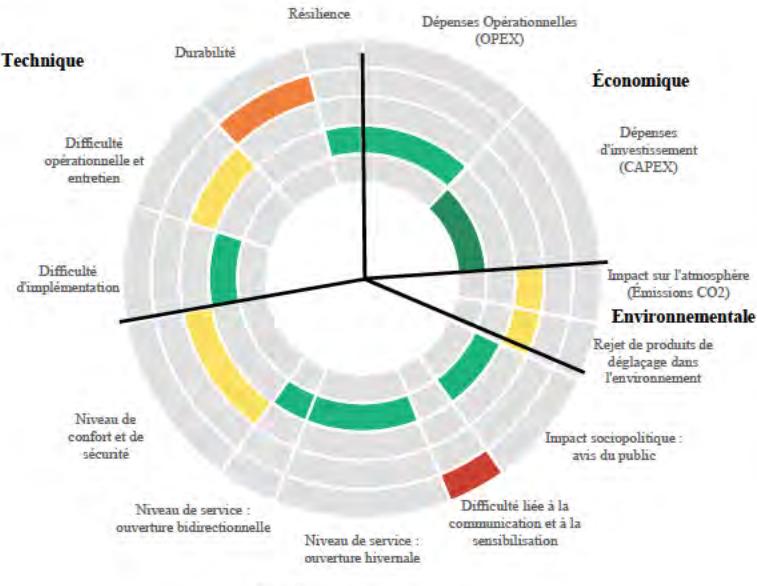
Comparaison des critères par option (diagramme en anneau)



Option 1 - Statu Quo



Option 2 - Déneigement conventionnel

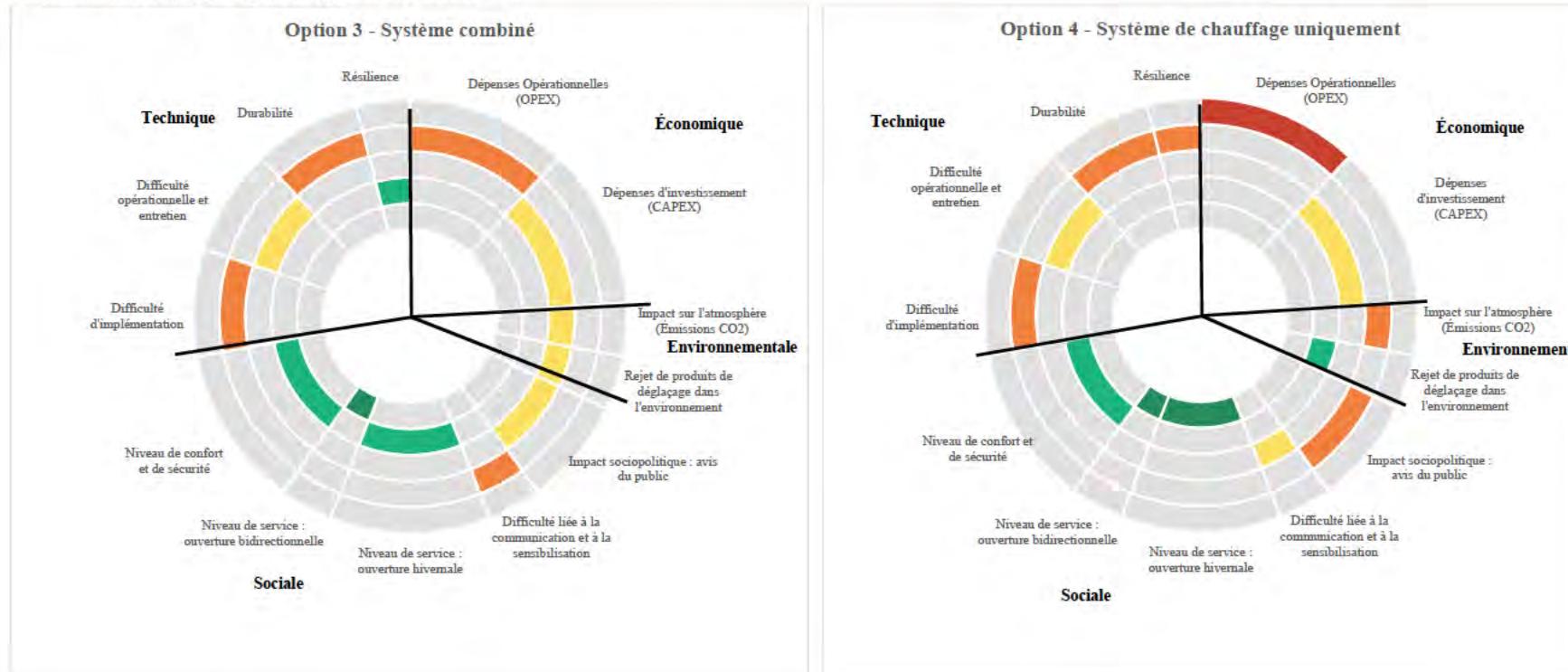


Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Le : 09 octobre
Par : [REDACTED]

Critères de base	Notation des options (*) ; voir notes ci-dessous (**) pour les hypothèses associées à chaque option					Echelle de notation	Explication
	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable		

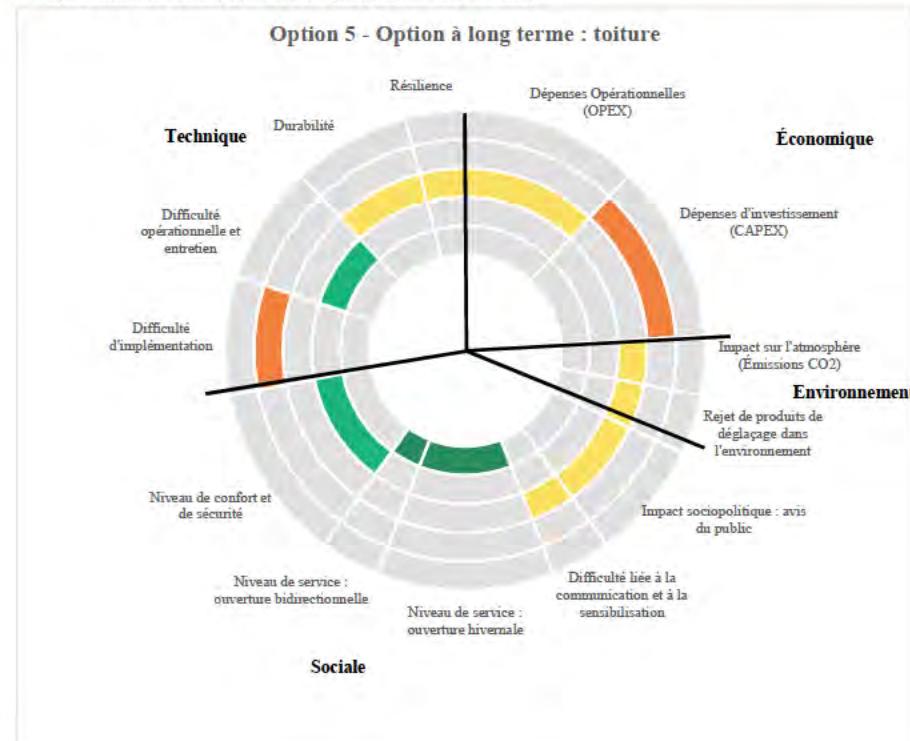
Comparaison des critères par option (diagramme en anneau)

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Le : 09 octobre
2018
Par : [REDACTED]

Critères de base	Notation des options (*) ; voir notes ci-dessous (**) pour les hypothèses associées à chaque option					Echelle de notation	Explication
	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable		

Comparaison des critères par option (diagramme en anneau)

A12.2 Critères d'analyse retenus et non retenus

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Pondération des critères

Certains critères ont été retirés de la présente analyse en raison de leur impact faible ou négligeable (pondération 0)

1 : important, mais non indispensable

2 : très important

3 : essentiel et incontournable

Total 25

Dimension	ID	Critère d'évaluation	Critère retiré (supprimé ou combiné)	Définition du critère d'évaluation	Nouvelle pondération	Pondération: explication
Économique						
Économique	1	Dépenses Opérationnelles (OPEX)		Critère quantitatif Comprend généralement les coûts d'entretien, opérations et maintenance : la consommation énergétique, la main d'œuvre et la logistique, l'opération de navettes Vélobus, si applicable. Ne comprend pas l'achat initial des engins de déneigement. Ces coûts sont actualisés en valeur de cette année, 2018, et sont annualisées sur 50 ans	3	Les coûts associés aux différentes options sont importants, ainsi leur considération est essentielle dans la présente analyse. De plus, les coûts initiaux (CAPEX) sont annualisés sur 50 ans afin d'être comparables aux coûts opérationnels (OPEX). Ceci permet de simplifier la comparaison des coûts sur la durée de vie voulue
Économique	2	Dépenses Opérationnelles (OPEX) : Main d'œuvre	COMBINÉ	<i>Critère combiné avec le précédent. Il comprend le besoin en personnel pour la gestion des opérations et l'entretien.</i>		
Économique	3	Dépenses Opérationnelles (OPEX) : Exploitation / entretien / maintenance	COMBINÉ	<i>Unité combine avec le précédent. Il comprend les opérations, l'entretien et la maintenance.</i>		
Économique	4	Dépenses Opérationnelles (OPEX) : autres options / navette, etc.	COMBINÉ	<i>Critère combiné avec le précédent. Il comprend les coûts reliés à la mise en oeuvre d'options alternatives.</i>		
Économique	5	Dépenses Opérationnelles (OPEX) : logistique	COMBINÉ	<i>Critère combiné avec le précédent. Il souligne les coûts liés à la gestion et la logistique pour l'implémentation de solutions plus complexes au niveau de l'entretien, par exemple.</i>		
Économique	6	Dépenses d'investissement (CAPEX)		Critère quantitatif Comprend généralement les coûts d'entretien, opérations et maintenance : la consommation énergétique, la main d'œuvre et la logistique, l'opération de navettes Vélobus, si applicable. Ne comprend pas l'achat initial des engins de déneigement. Ces coûts sont actualisés en valeur de cette année, 2018, et sont annualisées sur 50 ans	3	Les coûts associés aux différentes options sont importants, ainsi leur considération est essentielle dans la présente analyse. De plus, les coûts initiaux (CAPEX) sont annualisés sur 50 ans afin d'être comparables aux coûts opérationnels (OPEX). Ceci permet de simplifier la comparaison des coûts sur la durée de vie voulue
Économique	7	Dépenses d'investissement (CAPEX) : étude préliminaire	COMBINÉ	<i>Critère combiné avec le précédent. Il comprend toutes les études nécessaires à l'adoption d'un système, projet pilote, etc.</i>		
Économique	8	Dépenses d'investissement (CAPEX) : réfection de la structure	COMBINÉ	<i>Critère combiné avec le précédent. Il comprend les coûts liés au renforcement de la structure.</i>		
Économique	9	Dépenses d'investissement (CAPEX) : achat de matériel, fabrication et installation	COMBINÉ	<i>Critère combiné avec le précédent. Il comprend l'ensemble des travaux nécessaires à l'implémentation d'une option et tous les achats connexes comme les engins d'entretien.</i>		

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Pondération des critères

Certains critères ont été retirés de la présente analyse en raison de leur impact faible ou négligeable (pondération 0)

1 : important, mais non indispensable

2 : très important

3 : essentiel et incontournable

Total 25

Dimension	ID	Critère d'évaluation	Critère retiré (supprimé ou combiné)	Définition du critère d'évaluation	Nouvelle pondération	Pondération: explication
Environnementale						
Environnementale	10	Impact sur l'atmosphère (Émissions CO2)		Critère quantitatif Un calcul simplifié des émissions de CO2 (uniquement) a été réalisé et prend en compte l'impact de chaque option sur l'atmosphère : énergie fossile et électrique, réduction des déplacements automobiles, énergie grise (fabrication de matériaux de construction), navette. L'impact de la mobilité douce (incitation à l'utilisation du vélo, etc.) est donc considéré dans ce calcul	1	Suite à l'analyse des émissions de Gaz à Effet de Serre, l'impact sur l'atmosphère des options considérées est relativement faible même pris à l'échelle du pont uniquement (comparé aux émissions de l'ensemble du trafic routier sur le pont par exemple)
Environnementale	11	Ouverture des modes de transport durables	COMBINE	L'ouverture de la piste en hiver pourrait favoriser l'utilisation de modes de transport respectueux de l'environnement (cyclistes, piétons) et réduire les rejets de gaz à effet de serre (diminution induite par augmentation de l'offre en transports).	0	
Environnementale	12	Rejet de produits de déglaçage dans l'environnement		L'impact du rejet de produits de déglaçage dans l'environnement est évalué ici. L'impact du rejet de neige pure dans l'environnement n'est pas considéré ici, car nul	1	L'impact du rejet de produits de déglaçage dans l'environnement est très faible, voire négligeable, comme démontré dans l'étude préparatoire dans le cadre du même projet
Sociale						
Social	13	Impact sociopolitique : avis du public		Il s'agit ici d'évaluer l'impact de chaque option sur le public, de manière très générale, en combinant l'ensemble des aspects du projet et ses conséquences sur l'opinion générale du public : notamment les aspects économique, environnemental, social, touristique, sécurité qu'ils soient réels ou perçus. Ce critère a été évalué selon la perspective de l'équipe du projet – un sondage public est recommandé pour une évaluation plus approfondie	2	Les impacts sociopolitiques liés aux décisions d'ouverture ou de fermeture de la piste peuvent être importants et remettre en cause l'ensemble du projet. Toutefois ils sont difficiles, voire impossibles à évaluer et prévoir et peuvent être atténués par certaines mesures (communication). Une pondération moyenne de 2 a ainsi été choisie
Social	14	Impact sociopolitique : amélioration estivale induite	SI/PPRIMÉ	Certaines solutions, surtout les solutions fondamentales, apportent des améliorations lors de la gestion estivale de la piste que ce soit au niveau de sécurité, confort et expérience d'usage, ...etc.)		
Social	15	Impact sociopolitique : attentes des cyclistes	COMBINE			

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Pondération des critères

Certains critères ont été retirés de la présente analyse en raison de leur impact faible ou négligeable (pondération 0)

1 : important, mais non indispensable

2 : très important

3 : essentiel et incontournable

Total 25

Dimension	ID	Critère d'évaluation	Critère retiré (supprimé ou combiné)	Définition du critère d'évaluation	Nouvelle pondération	Pondération: explication
Sociale	16	Difficulté liée à la communication et à la sensibilisation		Communication nécessaire aux usagers ; que ce soit en temps réel (ouverture de la piste en temps réel, communication des alertes météorologiques et prévisions de fermeture de la piste), ou de façon permanente (signalisation, panneaux informatifs, radars pédagogiques), ou dans une moindre mesure pour la sensibilisation (campagne médiatique, panneaux de sensibilisation sur place) La sensibilisation des usagers apparaît comme un minimum dans chacune des options d'opération y compris en cas de fermeture hivernale de la piste	1	Les difficultés liées à la communication ont des conséquences sociopolitiques importantes, toutefois elles peuvent être atténuées par un certain nombre de mesures
Sociale	17	Difficulté liée à la communication et la logistique (signalisation permanente et sensibilisation)	COMBINE	Critère combiné avec le précédent. Signalisation permanente et sensibilisation des risques liés à l'hiver.		
Sociale	18	Niveau de service : ouverture hivernale		Critère quantitatif La décision d'ouverture hivernale de la piste aura un impact important sur le niveau de service fourni et sur la satisfaction des cyclistes. Selon la solution retenue, différentes durées d'ouverture de la piste en hiver pourraient être atteintes sur une semaine de 7 jours. Ceci dépend de la performance de l'option en question par rapport à l'efficacité et la rapidité des opérations	3	Le niveau de service est un enjeu majeur dans cette étude, il porte ainsi une très forte pondération. Le niveau de service comprend l'impact de la décision de l'ouverture de la piste, la durée d'ouverture potentielle, impact des conditions climatiques sévères, etc
Sociale	19	Niveau de service : durée d'ouverture hebdomadaire	COMBINE	Selon la solution retenue, différentes durées d'ouverture de la piste en hiver pourraient être atteintes sur une semaine de 7 jours. Ceci dépend de la fréquence de maintenance et entretien, de l'efficacité du déneigement lors de tempêtes, mais aussi de la décision d'ouvrir en fin de semaine ou la nuit.		
Sociale	20	Niveau de service : durée de fermeture suite à une tempête	COMBINE	Durée de fermeture lors de conditions climatiques sévères - Il est prévu qu'une fermeture de la piste sera suscitée sous conditions climatiques sévères. Cependant, certaines solutions ont de capacité de s'adapter aux conditions climatiques que d'autres. Par ex. En cas d'une tempête de neige et l'accumulation de 40 cm de neige sur le pont, une fermeture prolongée est prévue pour toutes les solutions (degrés variables) pour rétablir les conditions de circulation jugées acceptables sauf les solutions 5a et 5c. Elles permettront une ouverture beaucoup plus rapide puisque les accumulations prévues devront être amplement réduites, voire nulle.		
Sociale	21	Niveau de service : fermeture pour entretien	COMBINE	Par ex. plus de temps est requis pour le déneigement mécanique par rapport au système de chauffage.		

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Pondération des critères

Certains critères ont été retirés de la présente analyse en raison de leur impact faible ou négligeable (pondération 0)

1 : important, mais non indispensable

2 : très important

3 : essentiel et incontournable

Total 25

Dimension	ID	Critère d'évaluation	Critère retiré (supprimé ou combiné)	Définition du critère d'évaluation	Nouvelle pondération	Pondération: explication
Sociale	22	Niveau de service : ouverture bidirectionnelle		À cause de limitations géométriques, la piste pourrait ne pas être ouverte de manière bidirectionnelle pour l'option en question	1	Une ouverture unidirectionnelle affecterait le niveau de service, mais de manière secondaire, surtout si les ouvertures sont organisées selon les périodes de pointes fortement directionnelles
Sociale	23	Niveau de service à long terme en cas de fort achalandage	SUPPRIMÉ	Niveau de service à long terme en cas d'augmentation significative de l'achalandage hivernal - Capacité de la solution retenue à accommoder un achalandage accru dans l'avenir. Cela est basé sur la durée de fermeture, l'espace disponible, le niveau de confort et de sécurité fourni ...etc.		
Sociale	24	Niveau de confort et de sécurité		Niveau de confort et de sécurité fournis par les conditions de surface, la largeur de la piste dégagée ou résiduelle, le comportement des usagers et leur vitesse. Ce critère est évalué du point de vue de l'usager et de sa sécurité, indépendamment de la responsabilité de PJCCI (notamment en cas de piste fermée), la sécurité de l'individu n'est pas acceptable, d'où la fermeture de la piste par PJCCI)	3	La sécurité est un critère essentiel dans le choix d'une option. Il faut noter que la sécurité est généralement associée à un niveau d'acceptabilité du risque. Un point de sécurité inacceptable va nécessiter des mesures de mitigation du risque, voire la fermeture de la piste. Le seuil de tolérance des risques est à identifier par PJCCI et selon l'analyse des risques
Sociale	25	Sécurité des usagers : conditions de la piste	COMBINÉ			
Sociale	26	Sécurité des usagers : largeur de piste ; comportement et vitesse	COMBINÉ	Largeur utile de piste en temps normal et durant les opérations.		
Sociale	27	Sécurité des usagers : chute de glace hors pont	SUPPRIMÉ	Supprimé, car secondaire.		
Sociale	28	Sécurité des usagers : chute de glace depuis la superstructure	SUPPRIMÉ	Supprimé, car secondaire.		

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Pondération des critères

Certains critères ont été retirés de la présente analyse en raison de leur impact faible ou négligeable (pondération 0)

1 : important, mais non indispensable

2 : très important

3 : essentiel et incontournable

Total 25

Dimension	ID	Critère d'évaluation	Critère retiré (supprimé ou combiné)	Définition du critère d'évaluation	Nouvelle pondération	Pondération: explication
Technique						
Technique	29	Difficulté d'implémentation		Études et travaux additionnel requis afin de compléter l'implémentation de l'option retenue ; complexité des études, étendue des travaux nécessaires (multidisciplinaire) ; étendue de la réfection	2	La difficulté d'implémentation d'une option pourrait remettre en cause la réalisation de l'ensemble du projet. Cependant, toute difficulté est associée à un coût d'implémentation, abordé dans la section économique
Technique	30	Difficulté d'implémentation: COMBINE renforcement nécessaire		<i>Cet élément évalue d'une façon qualitative la complexité et l'étendue des travaux de renforcement / réfection nécessaires pour assurer la capacité de la structure existante.</i>		
Technique	31	Difficulté d'implémentation: COMBINE études préliminaires		<i>Des études additionnelles détaillées seront aussi requises afin de compléter l'implémentation de la solution retenue (par ex. revue de l'étude en soufflerie pour la solution à long terme, vérification de la capacité portante de la structure, conception détaillée pour le système de chauffage, études reliées aux risques d'accumulation de la neige en cas des solutions fondamentales Sa et Sc ...etc.)</i>		
Technique	32	Difficulté opérationnelle et entretien		Efficacité et complexité des opérations : fréquence, expertise nécessaire, uniformité du résultat, communication interne requise et conséquences sur d'autres éléments secondaires (drains, joints ...)	2	Les difficultés opérationnelles peuvent affecter l'efficacité globale de l'option choisie, cependant elles ne remettent pas en cause sa faisabilité et elles peuvent être mitigées
Technique	33	Difficulté opérationnelle : fréquence des opérations	COMBINE	<i>Fréquence des opérations qui engendre des entraves (service discontinu)</i>		
Technique	34	Difficulté opérationnelle : expertise	COMBINE	<i>Expertise / compétences particulières nécessaires -toute expertise et/ou compétence particulière nécessaire afin d'effectuer les opérations (par ex. gestion d'un système de chauffage requiert une expertise dans ce type de systèmes, leur fonctionnement et leur action).</i>		
Technique	35	Difficulté opérationnelle : performance uniforme	COMBINE	<i>Uniformité de la performance (dans le temps) - Ce critère adresse la facilité d'avoir une constance de niveau des opérations dans le temps. Par ex. Si il est facile d'atteindre toujours la même qualité de surface à chaque fois on déneige mécaniquement et en cas de toutes sortes de précipitations.</i>		
Technique	36	Difficulté opérationnelle : divers	SUPPRIMÉ	<i>Impacts sur d'autres éléments du pont (par ex. gel et blocage des drains, problématiques au niveau des joints d'expansion ...etc.)</i>		
Technique	37	Difficulté opérationnelle : communication interne	SUPPRIMÉ	<i>Le besoin d'un niveau élevé de communication interne chez PJCCI (et ses sous-traitants) afin d'effectuer les opérations d'une façon efficace et organisée.</i>		

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Pondération des critères

Certains critères ont été retirés de la présente analyse en raison de leur impact faible ou négligeable (pondération 0)

1 : important, mais non indispensable

2 : très important

3 : essentiel et incontournable

Total 25

Dimension	ID	Critère d'évaluation	Critère retiré (supprimé ou combiné)	Définition du critère d'évaluation	Nouvelle pondération	Pondération: explication
Technique	38	Durabilité		Impact de la solution retenue sur la durabilité de la piste et plus généralement sur sa longévité.	2	Bien que la durabilité est primordiale dans les structures d'envergure, nous avons vu ici qu'elle est peu affectée par la plupart des options étudiées. Une pondération moyenne est ainsi donnée puisqu'elle est identifiée comme un risque à faible probabilité. De plus, des mesures sont faciles à implémenter afin de mitiger ce risque.
Technique	39	<i>Impact sur la durabilité : application de chlorures</i>	COMBINÉ	<i>Impact de l'application direct ou indirect de chlorure sur la durabilité</i>		
Technique	40	<i>Impact sur la durabilité : impact thermique</i>	COMBINÉ	<i>Impact du différentiel thermique surtout en cas d'utilisation d'un système de chauffage</i>		
Technique	41	<i>Impact sur la durabilité : impact positif de la réhabilitation</i>	COMBINÉ	<i>Impact positif de la réhabilitation - Une opportunité de considérer la durabilité des éléments structuraux et non structuraux (développe) lors de l'implémentation de solution.</i>		
Technique	42	Résilience		Il s'agit ici d'évaluer la résilience de chaque option. Ceci inclus la redondance du système en cas de bris ou tout autre événement affectant le niveau de sécurité, et l'adaptativité de l'option aux changements futurs (décisions politiques, changements au niveau de la mobilité...) La redondance est considérée comme un critère plus important que l'adaptativité ici	1	La résilience est un critère important. Cependant, les conséquences d'un manque de redondance du système seront raisonnablement tolérable pour les usagers. Du point de vue de l'adaptabilité du système, les conséquences sont principalement liées au coûts; d'où une pondération faible de ce critère
Technique	43	Résilience : adaptativité	COMBINÉ	<i>L'adaptativité de l'option aux changements futurs (décisions politiques, changements au niveau de la mobilité...)</i>		
Technique	44	Résilience : redondance	COMBINÉ	<i>La redondance en cas de bris ou tout autre événement affectant le niveau de sécurité</i>		
Technique	45	Résilience : réactivité	SUPPRIMÉ	<i>La réactivité des opérations aux conditions météorologiques. Ce dernier volet est validé par toutes les options sauf Statu Quo, il n'est donc pas étudié ici.</i>		

A12.3 Causes principales d'émission de gaz à effet de serre (GES)

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Causes principales d'émissions CO2 / pollution

Catégorie	(1) Statu Quo	Calculs							Total kgCO2 / hiver	référence	
		(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable	Type d'émissions	Unité	Commentaire	Taux CO2		
Pollution de transport	trafic routier supp					indirecte	volume de trafic	200 passages cyclistes par jour convertis en trafic routier ; supposons 100 voitures (aller simple) qui font un trajet Longueuil - Montreal (10.5 km, 5 jours semaine, 5 mois du 1er novembre au 31 mars).	135 g de CO2/km	38 588	https://www.consglobe.com/les-14-modes-de-transport-les-moins-polluants-cg ; https://moodle.polymtl.ca/pluginfile.php/223649/mod_resource/content/4/civ6707_energie_propulsion_h17.pdf (vérif: 2.4 kgCO2/L avec 9.1L/100km = 260gCO2/km)
Pollution de transport	navette					directe	gasoil	Navettes toute la journée, toutes les 20minutes 1AR, de 7h à 19h, soit 36AR; (10.5 km, 5 jours semaine, 5 mois du 1er novembre au 31 mars). Admettons qu'une navette consomme 5x plus qu'une voiture (idle time etc...).	0.65 kg de CO2/km	51 597	
Pollution de transport	navette à 75%					directe	gasoil	fois 0.75	0.65 kg de CO2/km	38 698	
Pollution de transport						indirecte	volume de trafic	supposons une réduction du trafic équivalente à 200 passages supplémentaires (les options (2) à (5a) prévoient 200 passages, donc ici les options (5b) et (5c) supposeraient 400 passages)		- 38 588	
Déneigement conventionnel		(grise) engins de déneigement	(grise) engins de déneigement		(grise) engins de déneigement	grise	qté de matériaux	supposons 2 engins de 5 tonnes ; durée de vie 12 ans	300kg éq. C/tonne * 3.67	918	http://www.construction-carbone.fr/lacier-de-construction-combien-de-co2/ http://www.construction-carbone.fr/bilan-carboner-applique-au-batiment-v1-ademe-analyse-du-document/ ; http://www.construction-carbone.fr/combien-de-co2-dans-les-materiaux-de-construction/
Déneigement conventionnel		produits (sels etc)	produits (sels etc)		produits (sels etc)	grise	qté de matériaux	négligé (sel naturel ou déchets ?)		0	pas de données
Déneigement conventionnel		émissions des engins	émissions des engins		émissions des engins	directe	gasoil	2 engins font 1 aller retour (2*3km) chaque heure, durant les 500h de déneigement de l'hiver	300 g de CO2/km	6 606	pas de données
Déneigement conventionnel		1	1		0.5	Facteur				facteur	

Analyse multicritère des options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Causes principales d'émissions CO2 / pollution

Catégorie	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable	Calculs					Total kgCO2 / hiver	référence
						Type d'émissions	Unité	Commentaire	Taux CO2			
Chauffage			(grise) membrane chauffante	(grise) membrane chauffante		grise	qté de matériaux	supposons une plaque d'acier de 10mm sur la longueur du pont comme équivalent construction (2.5m *3km) ; à changer tous les 25 ans (soit 6 tonnes d'acier)	300kg éq. C/tonne * 3.67	258		
Chauffage			énergie électrique	énergie électrique		directe	kWh	4.5 millions de kWh par hiver selon rapport Prépa ; 70 x moins que gasoil ; donc 300/70 = 4.2gCO2/km ; avec 20kWh (1 heure ou 100km) ; soit 420gCO2 aux 100km; ou 21gCO2 par kWh ; selon Hydro QC c'est 6g CO2 /kWh	6g CO2 /kWh	27 000	https://www.rensmart.com/Calculators/KWH-to-CO2	
Chauffage			(grise) installation poste	(grise) installation poste		grise	qté de matériaux	supposons un projet d'environ 100 tonnes d'acier, sur 50 ans	300kg éq. C/tonne * 3.67	2202		
Chauffage			0.5	1	Facteur				facteur			
Long terme		membrane classique	membrane classique	membrane classique	membrane classique	grise	qté de matériaux	supposons une plaque d'acier de 10mm sur la longueur du pont comme équivalent construction (2.5m *3km) ; à changer tous les 25 ans (soit 6 tonnes d'acier)	300kg éq. C/tonne * 3.67	258		
Long terme					(grise) toiture	grise	qté de matériaux	supposons une plaque d'acier de 10mm, x3 pour profilés (structure légère)	300kg éq. C/tonne * 3.67	386		
Bilan Carbon (kg éq CO2 / an)												
Pollution de transport	90 185	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable						
Déneigement conventionnel	0											
Chauffage			7523.5	7523.5	0	3761.75						
Long terme			257.634	257.634	257.634	644.085						
Total	90 185	○	7 781	○	22 511	○	29 717	○	4 406	kg éq CO2 / hiver		

A12.4 Comparaison des coûts

Estimation des coûts pour toutes les options d'opération hivernale

Arup 259172
PJCCI CT62576
Le : 05 octobre 2018
Par :

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Coûts par élément

Durée de vie prévue :

50 ans

Catégorie	ID #	Élément	Estimé	Durée (années)	Taux d'actual.	Total 50 ans	Total par an	CAPEX / OPEX
Opérations	1	Navette (\$3'015/jour sur 4 mois, 5 jours sur 7) *1/1.50 (Hors taxes et cont.)		1	1.95			OPEX
Opérations	2	Navette 75% (*1/1.5 hors taxes et [REDACTED])		1	1.95			OPEX
Travaux de sécurité / confort	11	Écran anti-éblouissement au niveau de la section courbe de la section 8 (déjà installé)		25	1.43			CAPEX
Travaux de sécurité / confort	12	Ajout de rail galvanisé acier 150 mm x 3-4 mm d'épaisseur pour empêcher la glace de tomber sur les voies en dessous du pont.		50	1.00			CAPEX
Travaux de sécurité / confort	13	Ajout de luminaires		50	1.00			CAPEX
Travaux de sécurité / confort	14	Signalisations pour sensibiliser les utilisateurs		25	1.43			CAPEX
Travaux de sécurité / confort	15	Panneaux à messages variables		12.5	1.69			CAPEX
Travaux de sécurité / confort	16	Radars pédagogiques		12.5	1.69			CAPEX
Travaux de durabilité	21	Membrane Matacyl® WS - fourniture et installation		25	1.43			CAPEX

Estimation des coûts pour toutes les options d'opération hivernale

Arup 259172
PJCCI CT62576
Le : 05 octobre 2018
Par :

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

Coûts par élément

Durée de vie prévue :

50 ans

Catégorie	ID #	Élément	Estimé	Durée (années)	Taux d'actual.	Total 50 ans	Total par an	CAPEX / OPEX
Déneigement	101	Opérations de déneigement conventionnel - Équipement		1	1.95			OPEX
Déneigement	102	Opérations de déneigement conventionnel - Main d'œuvre		1	1.95			OPEX
Déneigement	103	Opérations de déneigement conventionnel - Matériaux		1	1.95			OPEX
Déneigement	104	Opérations de déneigement conventionnel - Équipement 50%		1	1.95			OPEX
Déneigement	105	Opérations de déneigement conventionnel - Main d'œuvre 50%		1	1.95			OPEX
Déneigement	106	Opérations de déneigement conventionnel - Matériaux 50%		1	1.95			OPEX
Système de chauffage	201	Système chauffant - fourniture et installation, sauf membrane chauffante, sauf membrane		50	1.00			CAPEX
Système de chauffage	202	Système chauffant - membrane chauffante uniquement		25	1.43			CAPEX
Système de chauffage	203	Opération de la membrane Matacryl (consommation etc.) - 1100 heures		1	1.95			OPEX
Système de chauffage	204	Opération de la membrane Matacryl (consommation etc.) - 550 heures		1	1.95			OPEX
Long terme	301	Renforcement de la superstructure (pour la toiture), équivalent au prix de la toiture		50	1.00			CAPEX
Long terme	302	Renforcement de la superstructure (élargissement)		50	1.00			CAPEX
Long terme	303	Renforcement de la superstructure (déplacement)		50	1.00			CAPEX
Long terme	304	Toiture (hors taxes et cont.)		50	1.00			CAPEX
Long terme	307	Déplacement (hors taxes et cont.)		50	1.00			CAPEX

Estimation des coûts pour toutes les options d'opération hivernale

Arup 259172
 PJCCI CT62576
 Le :
 Par :

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis
 pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes
 conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

05 octobre 2018

Coûts CAPEX pour chaque option

Élément	(1) Statu Quo - CAPEX	(2) Déneigement mécanique uniquement - CAPEX	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique - CAPEX	(4) Système de chauffage uniquement - CAPEX	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable - CAPEX
Navette (\$3'015/jour sur 4 mois, 5 jours sur 7) *1/1.50 (Hors taxes et cont.)					
Navette 75% (*1/1.5 hors taxes et [REDACTED])					
Écran anti-éblouissement au niveau de la section courbe de la section 8 (déjà installé)					
Ajout de rail galvanisé acier 150 mm x 3-4 mm d'épaisseur pour empêcher la glace de tomber sur les voies en dessous du pont.					
Ajout de luminaires Signalisations pour sensibiliser les utilisateurs					
Panneaux à messages variables					
Radars pédagogiques Membrane Matacryl® WS - fourniture et installation					

Arup 259172
PJCCI CT62576
Le :
Par :

Estimation des coûts pour toutes les options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

05 octobre 2018

Élément	Coûts CAPEX pour chaque option				
	(1) Statu Quo - CAPEX	(2) Déneigement mécanique uniquement - CAPEX	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique - CAPEX	(4) Système de chauffage uniquement - CAPEX	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable - CAPEX
Opérations de déneigement conventionnel - Équipement					
Opérations de déneigement conventionnel - Main d'œuvre					
Opérations de déneigement conventionnel - Matériaux					
Opérations de déneigement conventionnel - Équipement 50%					
Opérations de déneigement conventionnel - Main d'œuvre 50%					
Opérations de déneigement conventionnel - Matériaux 50%					
Système chauffant - fourniture et installation, sauf membrane chauffante, sauf membrane					
Système chauffant - membrane chauffante uniquement					
Opération de la membrane Matacryl (consommation etc.) - 1100 heures					
Opération de la membrane Matacryl (consommation etc.) - 550 heures					
Renforcement de la superstructure (pour la toiture), équivalent au prix de la toiture					
Renforcement de la superstructure (élargissement)					
Renforcement de la superstructure (déplacement)					
Toiture (hors taxes et cont.)					
Déplacement (hors taxes et cont.)					
Total	\$0	\$142,781	\$484,457	\$484,457	\$764,245

Coûts CAPEX pour chaque option

Estimation des coûts pour toutes les options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

05 octobre 2018

Coûts OPEX pour chaque option

Élément	(1) Statu Quo - OPEX	(2) Déneigement mécanique uniquement - OPEX	(3) Système combiné : chauffage et déneigement	(4) Système de chauffage uniquement - mécanique - OPEX	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable - OPEX
Navette (\$3'015/jour sur 4 mois, 5 jours sur 7) *1/1.50 (Hors taxes et cont.)					
Navette 75% (*1/1.5 hors taxes et [REDACTED])					
Écran anti-éblouissement au niveau de la section courbe de la section 8 (déjà installé)					
Ajout de rail galvanisé acier 150 mm x 3-4 mm d'épaisseur pour empêcher la glace de tomber sur les voies en dessous du pont.					
Ajout de luminaires Signalisations pour sensibiliser les utilisateurs					
Panneaux à messages variables					
Radars pédagogiques Membrane Matacryl® WS - fourniture et installation					

Estimation des coûts pour toutes les options d'opération hivernale

Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis pour le projet pilote de l'entretien hivernal de la piste multifonctionnelle par méthodes conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage

05 octobre 2018

Coûts OPEX pour chaque option

Élément	(1) Statu Quo - OPEX	(2) Déneigement mécanique uniquement - OPEX	(3) Système combiné : chauffage et déneigement	(4) Système de chauffage uniquement - mécanique - OPEX	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable - OPEX
Opérations de déneigement conventionnel - Équipement					
Opérations de déneigement conventionnel - Main d'œuvre					
Opérations de déneigement conventionnel - Matériaux					
Opérations de déneigement conventionnel - Équipement 50%					
Opérations de déneigement conventionnel - Main d'œuvre 50%					
Opérations de déneigement conventionnel - Matériaux 50%					
Système chauffant - fourniture et installation, sauf membrane chauffante, sauf membrane					
Système chauffant - membrane chauffante uniquement					
Opération de la membrane Matacryl (consommation etc.) - 1100 heures					
Opération de la membrane Matacryl (consommation etc.) - 550 heures					
Renforcement de la superstructure (pour la toiture), équivalent au prix de la toiture					
Renforcement de la superstructure (élargissement)					
Renforcement de la superstructure (déplacement)					
Toiture (hors taxes et cont.)					
Déplacement (hors taxes et cont.)					
Total	\$493,778	\$349,168	\$738,374	\$1,123,060	\$544,128

Coûts OPEX pour chaque option

ARUP Estimation des coûts pour toutes les options d'opération hivernale

Arup 259172 Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis |
 PJCCI CT62576 conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage
 Le : 05 octobre 2018
 Par : [REDACTED]

Résumé des coûts et hypothèses

	Coûts CAPEX pour chaque option			Capital Expenditures	
	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable
Amélioration de la sécurité					
Déneigement et opérations					
Système de chauffage					
Long terme et durabilité					
Total		\$0	\$142,781	\$484,457	\$484,457
					\$764,245

	Coûts OPEX pour chaque option			Operation Expenditures	
	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable
Amélioration de la sécurité					
Déneigement et opérations					
Système de chauffage					
Long terme et durabilité					
Total		\$493,778	\$349,168	\$738,374	\$1,123,060
					\$544,128

Valeur Actuelle Nette, par année, VAN = CAPEX + OPEX					
Valeur Actuelle Nette, par année					
	\$493,778	\$491,949	\$1,222,831	\$1,607,518	\$1,308,372
VAN sur 50 ans	\$24,688,886	\$24,597,456	\$61,141,549	\$80,375,879	\$65,418,623

ARUP Estimation des coûts pour toutes les options d'opération hivernale

Arup 259172 Pont Jacques-Cartier, Sections 1 à 9, services du consultant, étude préparatoire, dessins et devis |
PJCCI CT62576 conventionnelles et analyse de faisabilité d'un système de chauffage
Le : 05 octobre 2018
Par : [REDACTED]

Résumé des coûts et hypothèses

Investissements au début seulement

	(1) Statu Quo	(2) Déneigement mécanique uniquement	(3) Système combiné : chauffage et déneigement mécanique	(4) Système de chauffage uniquement	(5) Solution Fondamentale - Toiture sur la piste cyclable
Investissement initiaux*	\$0	\$2,690,878	\$14,901,741	\$14,901,741	\$37,961,300
Couts annuels*	\$253,260	\$179,089	\$378,714	\$576,021	\$279,085
(*) en valeur de 2018 (non actualisée)					

Notes de calculs

Taux d'actualisation en fonction de la durée de vie de l'élément

Durée (années)	Taux (%)
1	1.95
12.5	1.69
25	1.43
50	1.00

Hypothèses

Le CAPEX et l'OPEX sont calculés ensemble afin d'obtenir la Valeur Actuelle Nette.

Pour le CAPEX, l'hypothèse a été faite que certains investissements auront lieu à l'an 1, 12, 25 et 37.

Les couts opérationnels eux sont constants et annuels. Ainsi, ils ont été actualisés en valeur 2018 avec un taux de 2.5% a et ils ont été annualisés (divisés par 50 ans) pour fins de comparaison.

Les taxes (15%) et une [REDACTED] sont ajoutées au montant total.

Les options 2, 3 et 4 ont été évaluées plus en détail dans le rapport préparatoire

A l'inverse l'option à long terme utilise des valeurs approximatives basées sur des projets comparables [REDACTED]/m² pour la

L'option à long terme est montrée ici pour fins de comparaison avec les autres options évaluées dans ce projet pilote.

Statu quo (navette) inclus :

Navette uniquement 4 mois - 5 jours /7

Aucun investissement initial sur la piste

Déneigement mécanique inclus :

opération de navette est considérée, mais à 75% des couts de l'option Statu Quo

Système de chauffage inclus :

Travaux de renforcement de la structure existante

Ligne HQ

Couts contractuels avec HQ

Appropriation et achats des terrains pour la construction des sous-stations électriques

L'option avec Toiture inclus :

Travaux de renforcement de la structure existante (100% prix de la toiture)

Entretien de la toiture

50% du déneigement