



EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET DÉGLAÇAGE DES ENTRÉES ET SORTIES SANS UTILISATION DE SEL DU TUNNEL LOUIS-HIPPOLYTE-LA FONTAINE

Projet R792.1

Rapport final Phase 3 : Synthèse et préparation à la réalisation

Andreas K. Athienitis, ing., Ph. D., FCAE, FIBPSA, FASHRAE, Chercheur principal

**Katherine D'Avignon, PhD
Leon Wang, PhD
Ted Stathopoulos, PhD
Prag Pillay, PhD
Ciprian Alecsandru, PhD**

**Réalisé pour le compte du Ministère des Transports
Direction générale des grands projets routiers
Direction des projets des tunnels et des autoroutes de la métropole**

2019-03-1

AVERTISSEMENT

La présente étude a été réalisée à la demande de la Direction des projets des tunnels et des autoroutes de la métropole du Ministère des Transports du Québec et a été financée par le même ministère.

Les conclusions contenues dans ce rapport se fondent uniquement sur des considérations énergétiques et ne tiennent pas compte d'autres exigences ou contraintes liées à l'exploitation des tunnels autoroutiers qui pourraient imposer des choix technologiques différents de ceux proposés par les auteurs.

Le Ministère n'est pas tenu de retenir les recommandations contenues dans ce rapport.

REMERCIEMENTS ET NOTE SUR L'AUTEUR

Le Dr. Andreas K. Athienitis est le Directeur scientifique du Réseau canadien de recherche stratégique du CRSNG sur les bâtiments intelligents à consommation énergétique nette zéro et du Centre for Zero Energy Building Studies (CZEBS) de l'Université Concordia. Il est professeur en génie du bâtiment à l'Université Concordia et détient une chaire de recherche industrielle sénior du CRSNG et d'Hydro-Québec ainsi qu'une chaire de recherche de niveau 1 de l'Université Concordia. Il est un Fellow de l'Académie Canadienne du Génie, ASHRAE et IBPSA.

Le Dr. Katherine D'Avignon est professeure à l'École de technologie supérieure. Elle se spécialise dans l'étude de systèmes thermiques permettant d'améliorer l'autonomie et la résilience énergétique des bâtiments.

Le Dr. Ciprian Alecsandru est professeur agrégé en génie civil et fait partie du Transportation Engineering Lab de l'Université Concordia. Il se spécialise dans l'analyse et la simulation du trafic urbain et sur grandes routes. Son expertise inclut l'analyse de la sécurité routière, le contrôle de la circulation, et le déploiement de réseaux de transports intelligents en appliquant l'intelligence artificielle au domaine des transports.

Le Dr. Theodore Stathopoulos est professeur en génie civil à l'Université Concordia et se spécialise dans l'étude de l'aérodynamique des bâtiments et des structures et dans la dispersion des polluants. Ses travaux dans le domaine ont influencé le Code national du bâtiment du Canada ainsi que l'American National Wind Standard. Son expertise est reconnue par plusieurs associations de renom dont l'Académie Canadienne du Génie, l'American Association for Wind Engineering, l'American Society of Civil Engineers, et l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Le Dr. Pragasen Pillay est professeur en génie électrique à l'Université Concordia et fait partie du Power Engineering & Energy Research Group. Il se spécialise dans l'usage efficace de l'énergie électrique et des sources d'énergie renouvelable tel les panneaux solaires photovoltaïques et les éoliennes. Il utilise les dernières techniques d'intelligence artificielle pour assurer la surveillance, le contrôle et la protection des systèmes électriques intégrant les énergies renouvelables. Son expertise en électronique de puissance et dans les énergies renouvelables lui permet de proposer des solutions novatrices pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et des villes.

Le Dr. Liangzhu Wang est professeur associé en génie du bâtiment à l'Université Concordia et détient la Chaire de recherche de l'université en sécurité incendie, fumée, écoulement d'air et gestion de la chaleur. Il a reçu le prix Distinguished Associate Award du Laboratoire de recherche en bâtiment et protection incendie (BFRL) de l'Institut national des normes et de la technologie (NIST) américain, en 2008.

La rédaction de cet ouvrage a été rendue possible grâce aux efforts de nombreux chercheurs et étudiants-chercheurs soit, en ordre alphabétique :

Hatem Alrawashdeh, étudiant Ph.D.
Jun Chen, assistant de recherche
Vladimir Cornille, étudiant M.Sc.
Hamed Esmaeeli, étudiant Ph.D.
Maged Ibrahim, associé de recherche
Konstantinos Kapsis, chercheur postdoctoral
Bruno Marcotte, étudiant M.Sc.
Mohamed Omer, étudiant M.Sc.
Tamanwe Payarou, étudiant M.Sc.
Jiwu Rao, assistant de recherche
Ali Saberi Derakhtenjani, étudiant Ph.D.
David Sun, étudiant M.Sc.
Dahai Qi, chercheur postdoctoral

Les auteurs tiennent à les remercier.

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Le présent document présente les résultats de la phase 3 du projet. Le but de cette phase était de présenter un sommaire du projet, de fournir les spécifications techniques des technologies susceptibles d'être retenues et, finalement, de proposer un plan de transfert des connaissances. Une section qui présente l'analyse du potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique dû à l'opération des systèmes de ventilation et de chauffage a été ajoutée.

L'objectif primaire de ce projet était d'examiner les options technologiques qui permettraient d'atteindre les objectifs de développement durable que le ministère s'est fixés. Le tunnel consomme actuellement 7.536 MWh/an dont 44.3% dû à l'éclairage et 16.8% au chauffage des systèmes de drainage et de protection d'incendie et présente une pointe électrique d'hiver de 1.746MW. Plusieurs technologies permettant de diminuer la consommation énergétique du tunnel et d'optimiser son opération ont été identifiées. Entre autre, l'utilisation des luminaires DEL qui fera baisser la consommation dû à l'éclairage de 40% et la mise en place des contrôles intelligents, prédictifs qui pourraient réduire la consommation énergétique due au chauffage de 20 à 40%.

L'une des pistes d'amélioration possible pour la rénovation du tunnel consiste en l'ajout du déglçage hydronique visant à remplacer l'utilisation du sel. Toutefois, la conception de ce système dépendra des décisions touchant la structure de la dalle, entre autres, l'isolation ou non de celle-ci. L'analyse montre que pour une dalle non-isolée, la capacité du système de déglçage devrait être de 9.8 MW de chaleur pour déglçer les entrées et les sorties (8890 m²). La pointe électrique du tunnel passerait alors de 1.7 MW à 10.3 MW environ et la consommation d'énergie serait de plus de 16 000 MWh. Bien que plusieurs technologies existent pour fournir la chaleur requise au déglçage la géothermie et l'hydroélectricité sont les options les plus intéressantes puisqu'elles sont toutes deux renouvelables.

L'ajout d'une structure semi-transparente à une dalle non-isolée, une solution intégrée, est la technologie la plus intéressante du point de vue énergétique, mais aussi du point de vue sécurité. Cette solution réduira la capacité thermique requise du système de déglçage à seulement 3MW et la pointe électrique sera alors de 3,6 MW. Cette structure éliminera la majorité des précipitations dans la zone critique de 200 mètres (zones avec pente à l'entrée et à la sortie) et le déglçage ne sera nécessaire que dans les premiers 50 mètres. La structure permettrait aussi de rencontrer tous les besoins en chaleur pour le déglçage par la géothermie, une technologie entièrement renouvelable. Cette structure augmentera aussi la sécurité en éliminant l'éblouissement par le soleil qui est fréquent à l'état actuel du tunnel. De plus, cette structure diminuera la possibilité de formation de glace noire et aussi les besoins d'éclairage du tunnel. Finalement, la structure proposée permettra de produire de l'électricité, augmentant ainsi la résilience du tunnel.

L'ajout d'une ferme solaire (PV) et de batteries afin de pouvoir produire sur place une partie de l'électricité requise a aussi été évalué. Cette technologie permettrait d'augmenter la résilience du tunnel en fournissant une source d'électricité indépendante du réseau. Le coût du PV demeure cependant encore élevé et du point de vue strict de rentabilité économique, il demeure plus dispendieux que l'hydroélectricité. Néanmoins, cette technologie augmenterait la résilience du tunnel à un faible coût annuel en fournissant une source additionnelle et indépendante d'électricité.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	9
2	SOMMAIRE DU PROJET	10
2.1	LE SYSTÈME DE DÉGLAÇAGE HYDRONIQUE.....	11
2.2	LES SOURCES DE CHALEUR ET L'HYDROTHERMIE	12
2.3	STRUCTURE SEMI-TRANSPARENTE.....	14
2.4	L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE (PV) ET BATTERIES	15
3	DÉGLAÇAGE HYDRONIQUE : SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES.....	17
3.1	INTRODUCTION.....	17
3.2	DÉGLAÇAGE : DALLE NON-ISOLÉE SANS STRUCTURE SEMI-TRANSPARENTE	17
3.3	SYSTÈME DE DÉGLAÇAGE : DALLE NON-ISOLÉE AVEC STRUCTURE.....	17
4	L'OPÉRATION DES SYSTÈMES ET L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE	19
4.1	INTRODUCTION.....	19
4.2	LA VENTILATION	19
4.3	LE CHAUFFAGE.....	21
5	PLAN DE TRANSFERT DE CONNAISSANCES	24
6	RÉFÉRENCES	25

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Profil de consommation électrique du tunnel actuel et futur	10
Tableau 2 : Synthèse des différentes sources thermiques en fonction des options possibles ...	12
Tableau 3 : Analyse économique pour trois scénarios de capacité installée	16
Tableau 4 : Données techniques sur les ventilateurs	19
Tableau 5 Comparaison de l'utilisation des ventilateurs en juin et juillet.....	20
Tableau 6 : Sommaires des signaux de l'HISTORIEN utilisé pour déterminer le profil	22
Tableau 7 : Puissance de chauffage (kW) en fonction de quatre plages de température	22

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Illustration du cheminement du projet de recherche	9
Figure 2 : Structure en forme d'arche.....	14
Figure 3 : Histogramme de la puissance d'utilisation des ventilateurs	19
Figure 4 : Consommation énergétique du système de ventilation	20
Figure 5 : Utilisation du système de chauffage en fonction de la température extérieure.	23

1 INTRODUCTION

Ce document présente un sommaire du projet et les résultats de la phase 3 du projet d'études du tunnel Louis-Hyppolite-Lafontaine. L'étape 1 a permis de dresser un portrait de la consommation énergétique du tunnel et d'identifier plusieurs pistes de solutions visant à optimiser sa consommation énergétique tout en rencontrant les objectifs de développement durable du ministère. La deuxième étape a servi à préciser le profil énergétique anticipé après les rénovations et à établir la faisabilité des solutions proposées. L'étape 3 vise principalement à fournir l'information nécessaire au déploiement des solutions proposées (Figure 1); entre autres, les exigences de conception en termes de spécifications techniques et de critères de performances.

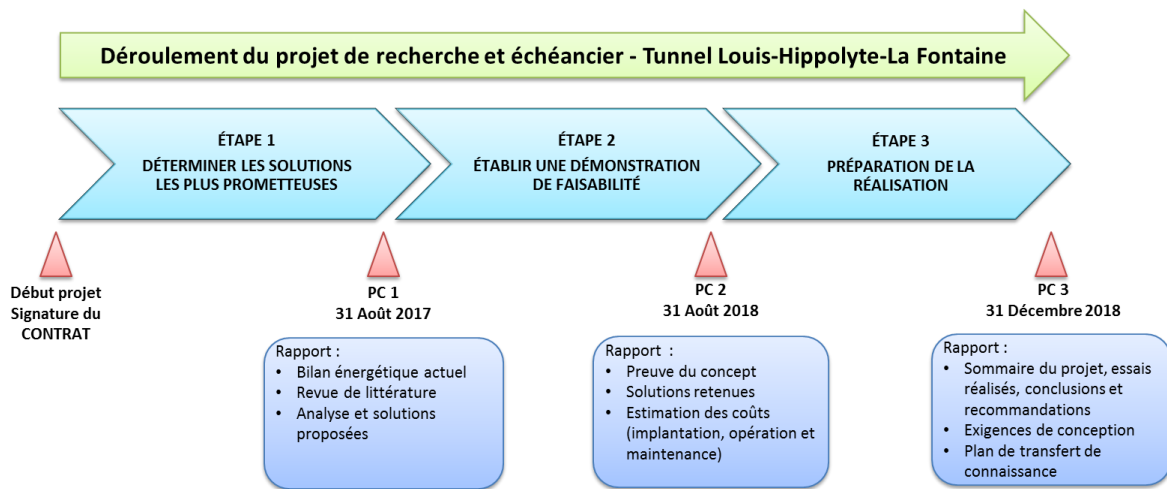


Figure 1 : Illustration du cheminement du projet de recherche

Ce document comporte quatre sections :

- La première présente un sommaire du projet.
- La deuxième donne les exigences de conception en termes de spécifications techniques et de critères de performances du système de déglçage hydronique.
- La troisième présente une analyse des opportunités d'amélioration de l'efficacité énergétique que l'opération du système de ventilation et du chauffage pour la protection contre le gel pourrait générer.
- La quatrième expose le plan de transfert des connaissances.

2 SOMMAIRE DU PROJET

Ce projet comportait trois phases, i) la première visait à présenter un portrait clair du bilan énergétique du tunnel tel qu'il est présentement, ii) montrer le profil anticipé du bilan énergétique suite aux stratégies de rénovations proposées dans un avant-projet et iii) identifier les options de technologies qui permettraient d'être plus efficaces.

Le profil énergétique pour l'année 2015 ainsi que le profil anticipé sont présentés au tableau 1. Le tunnel consomme présentement 7 536 MWh par année et la pointe de demande en électricité a été de 1 746 kW en février 2015. L'année 2015 a été choisie, car c'était la seule année où des données historiques complètes et fiables étaient disponibles. L'analyse présuppose que 2015 est une année représentative.

Tableau 1 : Profil de consommation électrique du tunnel actuel et futur

	Profil actuel			Profil anticipé sans déglacage		
	Consommation énergétique annuelle		Puissance appelée maximale (date) [kW]	Consommation énergétique annuelle		Puissance appelée maximale (date) [kW]
	Valeur (MWh)	% du total		Valeur (MWh)	% du total	
Éclairage	3,318	44.3	691 2015/02/13	1,484	19.1	393 2015/02/13
Chauffage	1,266	16.8	535 2015/02/24	2,227	28.6	938 2015/02/24
Ventilation	224	2.9	861 2015/08/18	224	2.9	861 2015/08/18
Pompage	31.5	0.40	152 2015/05/05	52	0.68	250 2015/05/05
Autres	2,696	35.8	817 2015/02/24	3,791	48.7	937.0 2015/02/24
Entrée électrique	7,536		1746 2015/02/24	7,780		2049 2015/02/24

Le profil anticipé du tunnel est estimé simplement en appliquant les nouvelles charges au profil d'utilisation de 2014-2015. En autres mots, on active les nouvelles charges exactement de la même façon que les anciennes. Par exemple, la charge de chauffage des drains de canalisation sera augmentée d'environ 830 kW lors de la rénovation. Le profil anticipé assume donc que cette nouvelle charge sera activée exactement comme la charge existante l'a été en 2015. On prend donc comme hypothèse que ce profil d'utilisation est représentatif de l'opération normale du tunnel.

Le déglacage n'est pas inclus dans ce profil et est discuté dans une analyse séparée. La catégorie 'Autres' augmente parce que de nouvelles charges diverses ont été ajoutées. Elles incluent : 20MW télécom; 20MW de vidéo de surveillance; 40MW de services électriques pour les tours.

La consommation du tunnel après rénovation augmentera légèrement passant de 7 536 à 7 780 MWh par année, soit une augmentation de 3%. Le profil anticipé montre une diminution de la consommation dû à l'éclairage de 3 318 à 1 484MWh par année soit une économie de 55%, mais une augmentation de la consommation dû au chauffage de 1 266 à 2 227 MWh par année, soit une augmentation de 75%. Cette augmentation provient de l'ajout de 830 kW de chauffage pour la protection contre le gel du système de drainage.

Plusieurs pistes de solutions ont été présentées dans le premier rapport [1]. Les pistes de solutions possibles incluaient : la production locale d'électricité et de chaleur en utilisant des technologies comme le photovoltaïque, la cogénération et les thermopompes géothermiques ou l'utilisation de l'eau du fleuve comme source de chaleur; le stockage électrique et thermique afin de pouvoir gérer la pointe de puissance; des améliorations à l'opération des systèmes de ventilation et d'éclairage et l'ajout d'une structure semi-transparente afin de diminuer les besoins d'éclairage artificiel, mais principalement pour augmenter la sécurité en diminuant considérablement la formation de glace. Les solutions nécessitant une analyse de préfaisabilité retenues par le Ministère étaient les suivantes :

- Système de déglacage hydronique
- L'hydrothermie, soit l'utilisation de l'eau du fleuve comme source de chaleur.
- L'ajout d'une structure semi-transparente (paralume)
- L'évaluation de l'utilisation de photovoltaïque et de batteries pour produire de l'électricité.

Voici le sommaire des résultats de ces études de préfaisabilité.

2.1 LE SYSTÈME DE DÉGLAÇAGE HYDRONIQUE

L'analyse de faisabilité consistait à :

- Valider si la capacité de 615W/m² proposée dans l'ADP était adéquate;
- Analyser s'il est nécessaire de maintenir la dalle à 2 °C et quelles seraient les avantages de laisser baisser la température durant les périodes où il n'y a pas de précipitations;
- Examiner les différentes options pour rencontrer les besoins thermiques de déglacage
- Examiner l'impact possible du déglacage sur la pointe électrique;
- Évaluer les besoins de déglacage avec l'ajout des structures semi-transparentes.

L'analyse de préfaisabilité a été réalisée pour trois scénarios différentes soit :

- Une dalle non-isolée sans structure semi-transparente;
- Une dalle isolée sans structure semi-transparente et;
- Une dalle non-isolée mais avec une structure semi-transparente couvrant les entrées et sorties du tunnel.

Le tableau 2 présente le sommaire des résultats de l'analyse de préfaisabilité pour ces trois scénarios.

Tableau 2 : Synthèse des différentes sources thermiques en fonction des options possibles

	Dalle non-isolée Sans structure	Dalle isolée sans structure	Dalle non-isolée Avec structure
Puissance requise à la surface (W/m ²)	1 100	615	615
Puissance thermique requise (kW)	9 800	5 400	3 000
Pointe électrique totale (kW)	10 300	5 900	3 330
Description du système	2,8MW géothermie Bouilloire électrique 7MW	2,8MW géothermie et 2,6MW bouilloire électrique	2,8 MW géothermie Bouilloire électrique seulement pour redondance

Pour une dalle non-isolée sans structure semi-transparente la pointe électrique passera de 1 746 kW à plus de 10 000 kW et la consommation annuelle électrique passera de 7 536 à 16 770 MWh par année, soit une augmentation de plus du double. Il est important de se rappeler que cette analyse est basée sur l'hypothèse qu'il n'y a aucune accumulation de neige sur la chaussée; donc, le système de déglçage ne fait pas fondre la neige. L'accumulation de neige augmentera la consommation de façon significative.

L'isolation de la dalle permettrait de diminuer l'impact du déglçage hydronique. La pointe électrique ne serait plus que de 5 900 kW.

Le scénario le plus intéressant du point de vue énergétique est sans contredit l'ajout d'une structure semi-transparente à une dalle non-isolée. L'ajout d'une telle structure permet pratiquement d'éliminer les précipitations sur la chaussée à déglçer ce qui fait diminuer la charge requise de déglçage. De plus, cette structure diminue aussi considérablement la vitesse du vent à la surface de la chaussée et réduit proportionnellement les pertes de chaleur. En résumé, l'ajout d'une structure ferait passer la charge de déglçage de 9,8MW à seulement 3MW; la pointe électrique de 10 680kW à 3 300kW et la consommation électrique annuelle de 7 536 à 9 281, soit une augmentation de seulement 23%.

2.2 LES SOURCES DE CHALEUR ET L'HYDROTHERMIE

Le système hydronique doit être alimenté par une source de chaleur. Plusieurs options existent incluant : bouilloire au gaz naturel, bouilloire électrique, cogénération, géothermie et hydrothermie. La décision a été prise de ne pas utiliser le gaz naturel ce qui élimine les options de bouilloire au gaz et de cogénération. La cogénération utilisant des biocarburants demeure une possibilité, mais n'a pas été étudiée dans ce projet.

La géothermie est une technologie de choix, car elle est renouvelable. Cette technologie, qui devrait donc être utilisée au maximum, à elle seule ne peut cependant pas fournir toute la chaleur requise dans le scénario d'une dalle non-isolée sans structure semi-transparente, car la superficie du terrain ne le permet pas. Cette technologie n'est pas non-plus indiquée pour fournir un appel de puissance élevé. Une bouilloire électrique est plus appropriée pour ce genre de situation. La centrale thermique pour une dalle non-isolée sans structure serait donc composée de 2,8MW de géothermie et d'une bouilloire électrique de 7MW.

La géothermie offre aussi le potentiel de récupérer et de stocker la chaleur en été. En été, la température de la chaussée augmente sous la chaleur du soleil le système de géothermie peut être opéré pour refroidir la chaussée et chauffer les puits géothermiques. Cette technique permet de faire du stockage saisonnier. Cette chaleur stockée durant l'été sera utilisée l'hiver.

L'hydrothermie, soit l'utilisation de l'eau du fleuve comme source de chaleur a été étudiée. L'accès au fleuve du côté nord n'est cependant pas possible puisqu'il faudrait passer sous les installations du port de Montréal. De plus, l'installation d'un système dans le fleuve de ce côté est aussi problématique à cause du dragage et de la circulation. L'hydrothermie n'est donc pas une option du côté nord. Elle est théoriquement possible du côté sud. L'hydrothermie présente des risques plus élevés que la géothermie et une bouilloire électrique. La faisabilité de cette technologie dépend entièrement des caractéristiques du site considéré. Il faudrait donc examiner si des sites appropriés sont disponibles. Le seul bénéfice d'adopter l'hydrothermie du côté sud est de diminuer la consommation électrique totale en remplaçant la bouilloire électrique par une thermopompe qui aura 1 COP de 2 ou plus. L'impact n'est cependant pas très élevé. L'hydrothermie ferait passer la pointe électrique de 10 300 kW à 8 600 kW environ. L'augmentation de la complexité du système et les risques associés à cette technologie devront être pris en considération dans la décision.

2.3 STRUCTURE SEMI-TRANSPARENTE

L'installation de structures semi-transparentes-photovoltaïques aux entrées et sorties sur une longueur entre 140 et 200 mètres représente une option intéressante pour diminuer sensiblement la consommation énergétique du tunnel, mais, surtout, augmenter la sécurité des conducteurs. Un rapport détaillé touchant l'analyse de cette option a été réalisé et est présenté dans un rapport séparé [2].

L'ajout d'une structure sur une longueur de 140 mètres peut se faire en utilisant les murs de soutient déjà en place. Pour une longueur excédant les 140 mètres, il faudra construire une nouvelle structure de soutient. Idéalement, pour obtenir les bénéfices maximums, la structure devrait couvrir la longueur totale à déglçer, soit 200 mètres.

L'ajout d'une telle structure pourrait avoir un impact significatif qui inclut :

- La diminution de la luminosité extérieure qui permet à l'œil des conducteurs de s'adapter avant d'entrer dans le tunnel réduisant ainsi les besoins en éclairage d'environ 15%;
- La réduction ou l'élimination de l'éblouissement des conducteurs aux heures critiques;
- La réduction des précipitations sur la chaussée faisant passer les besoins de déglçage de 9,8MW à moins de 3MW.

L'utilisation de structures semi-transparentes pour des applications similaires au tunnel n'est pas nouvelle. On en retrouve plusieurs applications pour des tunnels et des ponts.

Une structure simple en forme d'arche de type fermée a été étudiée (Figure 2) :

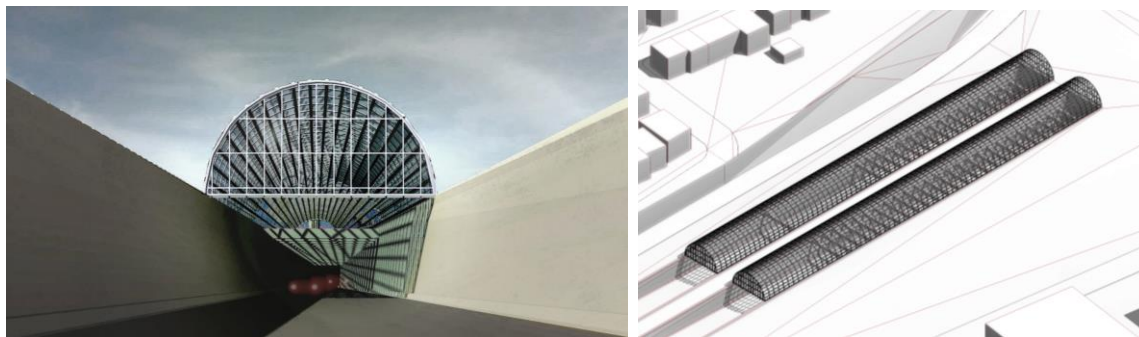


Figure 2 : Structure en forme d'arche

Ce genre de structure est reconnu pour sa résistance structurelle et pour son habileté à ne pas accumuler de neige. Les paramètres de conception sont : la hauteur; le niveau de transparence; avec ou sans ouvertures (le degré d'ouverture peut varier grandement); le type de matériaux.

Une analyse de préfaisabilité n'a pas été réalisée, car cette structure sera conçue sur-mesure en fonction des critères de performance requis. Ces critères incluent :

- Capacité à résister à une charge de neige ou de glace. Les ingénieurs en structures peuvent facilement définir ce critère. Plusieurs matériaux et formes peuvent permettre de rencontrer ce critère.
- Capacité à éliminer la fumée en cas de feu et à résister à la chaleur : Plusieurs matériaux et formes peuvent permettre de rencontrer ce critère. Par exemple, le positionnement stratégique d'ouverture dans la structure faciliterait l'évacuation de fumée. L'ajout de ventilateur aux endroits appropriés permettrait aussi de rencontrer ce critère.

- Capacité à résister à l'encrassement : Encore une fois, différents types de matériaux peuvent être utilisés. La forme aura aussi un impact sur la résistance à l'encrassement. Une structure plus élevée permettant une bonne circulation de l'air serait moins susceptible à l'encrassement qu'une structure plus près de l'échappement des camions.
- Capacité à ne pas former de glace et de glaçons : Ce critère peut facilement être rencontré en choisissant les bons matériaux et la bonne forme.

Donc, en résumé, l'ajout d'une structure semi-transparente devrait être sérieusement considéré, compte tenu de l'impact majeur qu'une telle structure aurait, en premier lieu sur l'augmentation de la sécurité, et en deuxième lieu sur la diminution considérable des besoins énergétiques et de la pointe électrique du tunnel.

L'ajout d'une structure pourrait aussi permettre de mettre en place une signature à l'entrée de Montréal par l'autoroute 20.

2.4 L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE (PV) ET BATTERIES

Une analyse économique de l'ajout d'une ferme solaire a été réalisée à la phase 2. Les données utilisées pour cette analyse sont les suivantes :

- anneaux de 300 W silicium polycristallin;
- Efficacité de 15,8 %;
- Espacement entre les rangées de 9,7 m;
- Orientation sud-ouest (195°), angle d'inclinaison 60°.

Les paramètres financiers utilisés pour l'analyse sont les suivants :

• Coûts/kW installé:	1,500
• Taux d'inflation:	2%
• Taux d'endettement: (n'assume aucun coût de financement)	0%
• Taux d'actualisation:	5%
• Taux d'augmentation de coûts de l'électricité:	3%
• Coût d'entretien pour le PV (\$/kW/année)	18
• Tarif d'électricité pour les 210 premiers kWh	\$0.0369
• Tarif d'électricité après les 210 premiers kWh	\$0.0497
• Puissance	\$14.43/kW
• Durée de vie du système	25 ans

La valeur mensuelle de l'énergie produite et la puissance évitée sont utilisées pour calculer la Valeur Actualisée Nette (VAN) pour la durée de vie du système. Cette évaluation a été faite pour

le profil de demande anticipé selon l'APD. Les résultats (tableau 3) montrent que sur une période de 20 ans, la VAN est négative pour tous les scénarios. Le coût de production du PV revient à environ \$0.115/kWh comparativement à un coût d'environ \$0.04/kWh d'Hydro Québec, donc tout près du triple et ce même si le coût par kWp installé est sous-estimé. Sur une base purement économique, le PV n'est pas rentable. La contribution du PV à la réduction de la puissance est faible puisque le profil de charge anticipé ne montre pas de pointe coïncidente avec la production du PV de jour. Le PV ne peut donc pas écrêter complètement les pointes et sa seule valeur est donc la valeur de l'énergie réduite à \$0.04/kWh.

Tableau 3 : Analyse économique pour trois scénarios de capacité installée

Scénario	Énergie (\$/mois)	Réduction de la demande (\$/mois)	VAN sur 25 ans
500 kW	\$22,821	\$4,827	-\$405,923
1MW	\$44,912	\$6,804	-\$870,991
1,8MW	\$70,115	\$8,262	-\$1,818,312

L'utilisation de batteries seules pour écrêter la pointe a été évaluée, mais n'est pas non plus économique.

Il est important de noter que la VAN est négative sur 25 ans, mais que la présence du PV augmenterait la résilience du tunnel en offrant une autre source d'énergie. Par exemple, un système de 500kW pourrait être installé pour alimenter principalement l'éclairage. Les besoins en éclairage coïncident avec la production provenant du PV. Sur 25 ans, il en coûterait seulement 16,000 par année de plus pour avoir une source d'énergie supplémentaire.

3 DÉGLAÇAGE HYDRONIQUE : SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES

3.1 INTRODUCTION

Les spécifications techniques et les critères de performances sont présentés pour deux scénarios différents soit, une dalle non-isolée sans structure semi-transparente et une dalle non-isolée mais avec une structure semi-transparente. Un troisième scénario aurait pu être présenté, soit une dalle isolée, mais le ministère a indiqué que ce scénario ne serait pas considéré.

3.2 DÉGLAÇAGE : DALLE NON-ISOLÉE SANS STRUCTURE SEMI-TRANSPARENT

Chaque section d'entrées et de sorties du tunnel couvre une superficie de 2 220 m² pour un total de 8 890 m². Le système de dégivrage aura les spécifications suivantes :

- Tuyaux au milieu de la dalle;
- Capable de fournir une puissance à la surface de 1 100W/m², soit une capacité totale de 9,8MW ;
- Composé de deux systèmes de dégivrage indépendants de 4,9MW chacun;
- Chaque système (côté nord et côté sud) sera alimenté par un système géothermique d'une capacité de chauffage de 1 400kW représentant environ 120 puits pour chaque approche;
- Le système de géothermie devrait avoir une thermopompe/refroidisseur ayant 1 COP en mode chauffage de 4 et 1 COP global pour le système complet de 3,5;
- Le système devra permettre la recharge des puits géothermiques en période estivale;
- Chaque système de dégivrage sera aussi alimenté par une bouilloire électrique d'environ 4MW. Ceci n'inclut pas de redondance.

3.3 SYSTÈME DE DÉGLAÇAGE : DALLE NON-ISOLÉE AVEC STRUCTURE

La structure éliminera à toute fin pratique les précipitations sur la chaussée. Les précipitations ne devraient être présentes que sur les premiers 50 mètres de la surface. Donc, le système devrait opérer en mode fonte seulement dans la première partie de la zone à déglacer. Un système de déglacement à deux zones devrait être installé ; une zone d'environ 50 m qui pourra opérer en mode «fonte» principalement et une deuxième zone de 150 m qui elle opérera en mode «maintien». La puissance requise pour opérer les 50 premiers mètres en mode «fonte» serait de 340 kW par sortie/entrée (50 m * 11,1 m : 555 m²) exigeant une puissance à la surface de 615W/m². Chaque approche aura donc besoin d'une capacité de 680kW pour alimenter la première zone.

La deuxième zone exigera une capacité de 370 kW par entrée sortie (220W/m²*1665m²) pour un total de 740kW par approche.

Le système de dégivrage pour ce scénario aura les spécifications suivantes :

- Tuyaux au milieu de la dalle
- Composé de deux systèmes de dégivrage indépendants de 1,5MW chacun
- Le système de dégivrage devrait comporter deux zones :
 - Une première zone d'environ 50 m par entrée et sortie, pouvant fournir une puissance à la surface de 615W/m² pour un total de 680 kW par approche;
 - Une deuxième zone de 150 m par entrée et sortie pouvant fournir une puissance

à la surface de 220W/m² pour une capacité totale de 740 kW par approche.

- Chaque système (côté nord et côté sud) sera alimenté par un système géothermique d'une capacité de chauffage de 1 400kW représentant environ 120 puits pour chaque approche;
- Le système de géothermie devrait avoir une thermopompe/refroidisseur ayant un coefficient de performance en mode chauffage de 4 et un coefficient de performance global pour le système complet de 3,5;
- Le système devra permettre la recharge des puits géothermiques en période estivale;
- Chaque système de dégivrage sera aussi alimenté par une bouilloire électrique d'appoint d'environ 2MW qui assurera une redondance.

4 L'OPÉRATION DES SYSTÈMES ET L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

4.1 INTRODUCTION

Un des objectifs importants du ministère est de minimiser l'énergie requise pour le tunnel. L'efficacité énergétique dépend évidemment des équipements installés, mais aussi de l'utilisation qu'on en fait. Cette section présente l'analyse de l'opération de deux systèmes; soit la ventilation et le chauffage pour la protection contre le gel. Cette analyse vise à dresser un portrait réel de la façon dont ces systèmes sont opérés dans le but d'établir des stratégies qui pourraient permettre de les opérer de façon plus efficace.

4.2 LA VENTILATION

Le système de ventilation est composé de seize ventilateurs (Tableau 4). La puissance totale installée présentement est de 1.8MW.

Tableau 4 : Données techniques sur les ventilateurs

Identifiant	Nombre	Puissance nominale [kW]	Débit	Vitesse nominale
VA	4	149 (200HP)	231 m ³ /s (49,000 ft ³ /min)	450 RPM
	4	74.6 (100HP) 93.2 (125HP)	165 m ³ /s (35,000 ft ³ /min)	
VE	8	112 kW (150 HP)	226.5 m ³ /s (48,000 ft ³ /min)	430 RPM

Les ventilateurs utilisés principalement pour une ventilation normale sont les VE. Ils sont utilisés à une fraction de leur puissance nominale. Pour 90% des heures de ventilation, la puissance totale activée était inférieure à 260kW (Fig. 3).

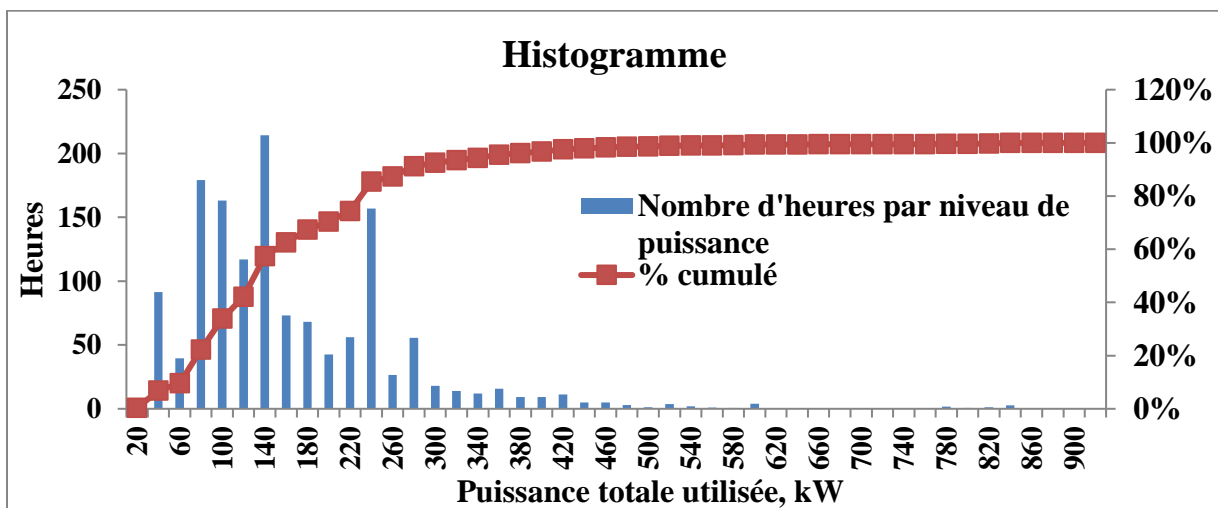


Figure 3 : Histogramme de la puissance d'utilisation des ventilateurs

Le profil de puissance du système de ventilation pour 2015 montre que des pointes de puissance de près de 800kW ont été observées à deux occasions et une autre pointe de près de 500kW à une autre occasion. Si on exclut ces trois cas, la pointe de ventilation se situe à environ 400kW. La figure 4 montre la consommation mensuelle du système de ventilation pour 2014 et 2015.

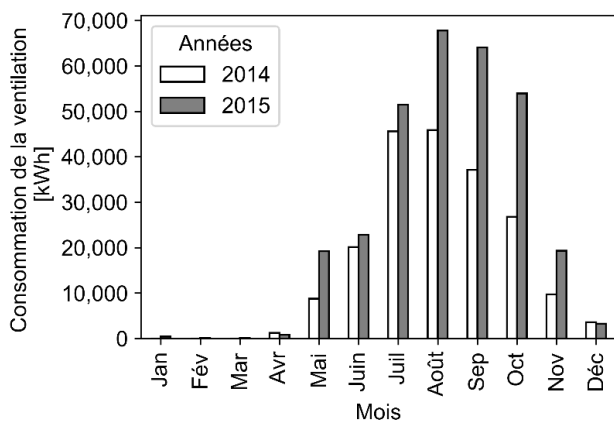


Figure 4 : Consommation énergétique du système de ventilation

La consommation passe d'environ 20 000 kWh en juin à plus de 50 000 kWh en juillet, soit une augmentation de 250%. Bien que les concentrations de NO₂ ou de CO soient similaires en juin et juillet, la consommation énergétique due au système de ventilation double. Le tableau 5 montre une utilisation des ventilateurs assez différents en juillet comparés à juin. En juin, les ventilateurs à la sortie du tunnel ainsi que pratiquement tous les ventilateurs d'alimentation sont peu utilisés alors qu'en juillet, les ventilateurs à la sortie (VE251 - VE254) sont utilisés beaucoup plus fréquemment et pour des durées plus élevées qu'en juin. Les ventilateurs d'alimentation VA-103 et VA-104, qui sont peu utilisés en juin, sont très sollicités en juillet. Les causes de ce changement de stratégie d'opération n'ont pu être identifiées.

Tableau 5 Comparaison de l'utilisation des ventilateurs en juin et juillet

Ventilateur	Nombre de jours d'opération		Nombre d'heures moyen d'utilisation	
	Jun 2014	Juillet 2014	Jun 2014	Juillet 2014
VE151	22	28	7,1	6,8
VE152	8	18	5,3	7,8
VE153	10	16	5,2	5,3
VE154	18	18	7,5	5,8
VE251	2	10	1,4	5,0
VE252	0	9	0,0	3,0
VE253	2	17	0,8	3,7
VE254	1	16	1,8	5,4
VA101	7	6	3,7	3,4
VA102	5	2	5,1	3,6
VA103	3	15	3,3	3,4
VA104	2	19	2,8	4,9
VA201	1	9	1,0	2,9
VA202	0	2	0,0	1,9
VA203	0	0	0,0	0,0
VA204	0	3	0,0	3,8

En conclusion, il est clair que ce n'est pas la concentration de NO₂ ou de CO qui détermine le taux de ventilation du tunnel.

Les stratégies de ventilation sont présentement établies sur la base des connaissances des opérateurs plutôt que sur ces données mesurables. Par exemple, les opérateurs décident du niveau de ventilation basé sur ces observations tel que la visibilité et la présence d'odeurs dans le tunnel. Et, en l'absence de sondes permettant de mesurer tous ces paramètres, l'efficacité de stratégies retenues ne peut être confirmée.

Basé sur les observations réalisées lors de cette étude il est recommandé d'identifier les facteurs déterminants les besoins et la stratégie de ventilation. Il est fort probable que des économies d'énergies pourraient être réalisées. La méthodologie recommandée est la suivante:

Étape 1 : Analyse des critères utilisés par les opérateurs

Les opérateurs du système de ventilation ont une grande expérience et opère le tunnel sur une base de connaissance souvent intrinsèque. Par exemple, les opérateurs vont activer les ventilateurs sur la base de variables qu'ils perçoivent comme la présence d'odeurs, la visibilité et d'autres facteurs présentement qualitatifs. La première étape qui devrait durer environ un mois visera à bien comprendre tous les critères utilisés par les opérateurs. Une fois ces critères identifiés nous allons développer un protocole de mesure pour pouvoir quantifier, dans la mesure du possible ces variables. Par exemple, la présence d'odeurs peut être mesurée une fois l'identification des produits responsables faites. Des variables comme la visibilité peuvent aussi être mesurés.

Étape 2 : Acquisition des données

Une phase de mesure sera lancée de mai à octobre pour obtenir les données nécessaires pour comprendre les facteurs déterminants les besoins de ventilation et pour valider les perceptions des opérateurs. Nous pourrons ainsi aussi valider également la relation entre le niveau de ventilation utilisé par les opérateurs et ces variables. Cette analyse nous permettra de travailler avec les opérateurs pour optimiser leurs stratégies de contrôle.

Étape 3 : Développement d'un modèle et des stratégies de contrôle

À partir des données un modèle décrivant les conditions déterminant les besoins de ventilation sera développé. Ce modèle sera utilisé pour développer la stratégie de contrôle. La stratégie inclura le contrôle prédictif permettant un contrôle beaucoup plus optimisé en ventilant juste à temps et seulement quand c'est nécessaire.

4.3 LE CHAUFFAGE

La charge de chauffage du tunnel est un agrégat de la charge de chauffage de plusieurs sous-systèmes, eux-mêmes constitués de nombreux éléments chauffants. Afin de clarifier la nature des charges, celles-ci ont été regroupées en 5 catégories selon le service desservi :

- Protection incendie
- Eau domestique
- Drainage
- Déglacement
- Espaces occupés

Les capacités installées des différents sous-systèmes sont présentées au tableau 6. Excluant le chauffage des espaces occupées, un total de 850 kW de chauffage est utilisé pour la protection contre le gel. Le gel dépendra des conditions extérieures telles que la température, la vitesse des vents, l'humidité et les précipitations. Idéalement, le système de chauffage devrait être opéré, et l'intensité du chauffage devrait varier, en fonction de ces paramètres.

Tableau 6 : Sommaires des signaux de l'HISTORIEN utilisé pour déterminer le profil

Sous-système	Élément	Capacité estimée [kW]
Protection incendie	Éléments chauffants installés dans les cabinets	30
	Traçage électrique sur la tuyauterie de 4 pouces de diamètre menant vers les cabinets	14,4
	Traçage électrique sur la tuyauterie d'alimentation principale du réseau de protection incendie	144
Eau domestique	Traçage électrique sur la tuyauterie d'alimentation principale d'eau domestique	252
Drainage	Traçage électrique des tranchées de drainage	138
	Traçage électrique des canalisations de drainage	200
Déglçage	Déglçage de l'entrée des garages	69,6
Espaces occupés		160,5
Total		1 008,5

Le tableau 7 présente la puissance utilisée pour différentes plages de température : très froid (sous -10°C), froid (-10°C < T < -5°C), tempéré (-5°C < T < 0°C) et chaud (T > 0°C) pour les sous-systèmes les plus importants.

Tableau 7 : Puissance de chauffage (kW) utilisée en fonction de quatre plages de température

		Très Froid T < -10°C (887 h)	Froid -10°C < T < -5°C (695 h)	Tempéré -5°C < T < 0°C (783 h)	Chaud T > 0°C (1190 h)
Tuyau Princ. PI	Charge Moyenne	28.4	15.8	10.7	4.0
	Charge Maximale	83.7	64.5	74.9	57.7
Tuyau Eau Dom.	Charge Moyenne	20.4	12.0	4.9	1.1
	Charge Maximale	44.8	40.0	39.3	35.9
Tranchées Drainage	Charge Moyenne	104.0	102.9	102.6	81.7
	Charge Maximale	104.8	104.8	104.8	104.8
Canalisations Drainage	Charge Moyenne	168.1	168.3	168.0	129.8
	Charge Maximale	169.1	169.0	168.9	169.3
Déglçage Garage	Charge Moyenne	34.8	34.8	34.5	14.3
	Charge Maximale	34.8	34.8	34.8	34.8

L'analyse montre que le chauffage est activé même pour des températures au-dessus de 0°C. C'est le cas pour le chauffage du système de drainage qui est activé à presque sa pleine charge dès que la température s'approche de +10°C. Cette plage de température est la plus importante en termes de nombre d'heures dans une année, soit 1190 heures. La consommation électrique durant cette période pour l'ensemble des sous-systèmes est de 308 000 kWh, soit 25% de la consommation totale due au chauffage. Dès que la température tombe en dessous de zéro le système est activé à sa pleine puissance peu importe le taux d'humidité ou l'absence de précipitations. Pour la période de température tempérée (-5°C < T < 0°C), le système de chauffage a consommé 285 000 kWh d'électricité. Au total, 48% de la consommation d'électricité due au chauffage se retrouve dans une plage où la température est supérieure à -5°C peu importe s'il y a des précipitations et un taux d'humidité élevé. Plusieurs éléments sont en fait activés à pleine puissance lorsque la température atteint +10°C. C'est le cas notamment des éléments chauffants le système de drainage (Fig.5). Le système de chauffage des tranchées et des canalisations chauffe à plus de 265kW lorsque la température extérieure est de +12°C et demeure à ce niveau tout le reste de l'hiver.

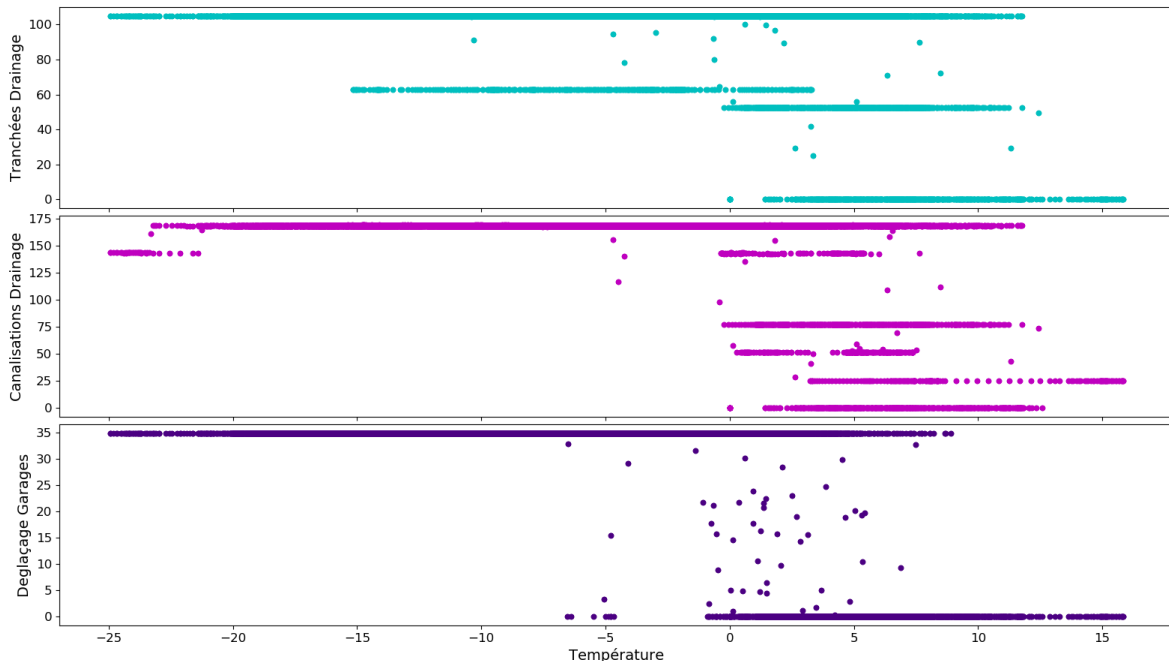


Figure 5 : Utilisation du système de chauffage en fonction de la température extérieure.

Pour la protection des tuyaux contre le gel, il est nécessaire de maintenir la température au-dessus de zéro en tout temps. Par contre, ce n'est pas nécessairement le cas pour le système de drainage. Il est clair que la stratégie d'opération du chauffage du système de drainage n'est pas optimisée et conduit à un gaspille d'énergie qui pourrait être facilement évité. Même à des températures de -5°C la formation de glace ne se produira que s'il y a des précipitations ou un haut taux d'humidité.

Il est recommandé de réaliser une étude exhaustive des conditions causant vraiment la formation de glace et de développer une stratégie de contrôle permettant de chauffer seulement lorsque requis. Cette analyse permettrait l'utilisation des contrôles prédictifs, c'est-à-dire, lorsque les

prévisions météorologiques prédisent que les conditions favorisant la formation de glace vont être présentes dans un avenir donné, le système de chauffage serait activé pour atteindre les températures désirées avant que les conditions favorisant la formation de glace soient présentes.

5 PLAN DE TRANSFERT DE CONNAISSANCES

Le transfert de connaissances devrait se faire à trois niveaux ; premièrement aux concepteurs des systèmes retenus, deuxièmement aux ingénieurs du ministère et finalement, aux opérateurs des systèmes.

Pour les concepteurs, l'équipe de Concordia présentera les analyses réalisées et les résultats obtenus aux équipes qui le désirent.

Pour les ingénieurs du ministère, nous proposons une formation sur l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables, et aussi le déglacement. Ce cours exigera un diplôme d'ingénieur. Il permettra aux participants de comprendre les bases des technologies et des techniques reliées à l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables pour les infrastructures dans le domaine des transports. Les participants recevront une formation de base sur les calculs de transfert de chaleur et d'énergie (routes, tunnels, et ponts). Les participants comprendront les différences entre les technologies, en particulier, les avantages et désavantages.

Le cours comportera cinq modules de six heures :

1. Initiation aux transferts de chaleur et d'énergie dans le domaine du bâti et modèles de déglacement;
2. Initiation aux radiations solaires, à l'éclairage naturel et à l'éclairage artificiel;
3. L'énergie solaire : photovoltaïque et thermique;
4. La géothermie et les pompes à chaleur et les systèmes d'énergie renouvelable;
5. Introduction aux contrôles.

La formation couvrira également les différents logiciels utilisés.

Pour les opérateurs nous proposons un cours sur le contrôle des différents systèmes, entre autres, le système de déglacement.

6 RÉFÉRENCES

- [1] A. Athienitis, K. C. D'Avignon, C. Alecsandru, P. Pilay, T. Stathopoulos, L. Wang. Effacité énergétique et déglacement des entrées et sorties sans utilisation de sel du tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine, Montréal, Canada, 2017
- [2] S. . H. S. Cucuzzella, C. Goubran, "Étude de conception d'alternatives de structures semi-transparentes pour le tunnel Louis-Hypolite-Lafontaine," 2018.