

REM de l'Est

Phase de développement

SYSTÈME DE TRANSPORT COLLECTIF POUR L'EST DE MONTREAL

Rapport sur le choix du système de captage
de traction

Référence CDPQ Infra : 03-AECSYS-RAP_DEV_ENE_GE00_L433_0433-00

Préparé pour :
CDPQ Infra Inc.

Filiale de la Caisse de dépôt et placement du
Québec
1000, place Jean-Paul-Riopelle
Montréal (Québec) H2Z 2B3

Rapport émis les :
2021-06-11

Révision 01 : 2021-10-27
Révision 02 : 2021-12-10

ISO 9001 :2015

Historique de révisions

Révision	00	01	02
Date	2021-06-11	2021-10-27	2021-12-10
Préparé par	NQ	NQ	NQ
Révisé par	SA	SA	SA
Approuvé par	PK	PK	PK
Commentaires		Commentaires CDPQi	Commentaires CDQQ



Préparé par :

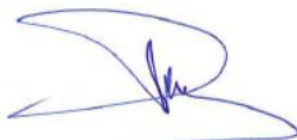
Nicolas QUELLEC
Chef de discipline, électrification
Co-entreprise AECOM SYSTRA

Avec la
participation de :



Révisé par :

Sameh ABOUKIRCHA
Directeur, intégration des systèmes
Co-entreprise AECOM SYSTRA



Approuvé par :

Pascal KERHOAS
Directeur technique
Co-entreprise AECOM SYSTRA



Identification DU DOCUMENT

**SYSTÈME DE TRANSPORT
COLLECTIF POUR L'EST DE
MONTRÉAL**

**Rapport sur le choix du système
de captage de traction**

Référence CDPQ Infra :
03-AECOSYS-RAP_DEV_ENE_GE00_L433_0433-00

Table des matières

1. INTRODUCTION	3
1.1 OBJECTIF DU DOCUMENT	3
1.2 ABRÉVIATIONS	4
1.3 RÉFÉRENCES	4
2. IDENTIFICATION DES SOLUTIONS DE CAPTAGE	7
2.1 TECHNOLOGIE 3^e RAIL	7
2.2 TECHNOLOGIE DE LA CATÉNAIRE	9
2.3 ANALYSE COMPARATIVE	12
2.4 INTÉGRATION URBAINE ET CATÉNAIRE	18
2.5 CONDITIONS CLIMATIQUES ET 3^e RAIL	22
3. CONCLUSION	36

Liste des tableaux

Tableau 1-1 :	Liste des abréviations	4
Tableau 1-2 :	Liste des documents de référence	4
Tableau 1-3 :	Liste des normes	5
Tableau 1-4 :	Liste d'autres références	5
Tableau 2-1 :	Tableau de synthèse des analyses selon les huit critères considérés	17
Tableau 2-2 :	Comparaison des traitement architecturaux pouvant être réalisés dans le cadre d'une ligne classique et du projet REM de l'Est	21

Liste des figures

Figure 2-1 :	Principaux systèmes de captage par 3 ^e rail	7
Figure 2-2 :	Alimentation par 3 ^e rail sur viaduc (métro de Pusan, Corée).....	8
Figure 2-3 :	Trois types de configurations de caténaire en voie principale	9
Figure 2-4 :	Ligne aérienne de contact (LAC).....	10
Figure 2-5 :	Caténaire légère (CAT)	10
Figure 2-6 :	Profilé aérien de contact en tunnel (PAC).....	10
Figure 2-7 :	Configuration du 3 ^e rail au droit d'une communication croisée en voie principale	14
Figure 2-8 :	Train déneigeur aspirant la neige pour la faire fondre et la stocker en eau.....	15
Figure 2-9 :	Exemples d'arches supports de caténaire	18
Figure 2-10 :	Exemples de traitements architecturaux de poteaux supports de caténaire	18
Figure 2-11 :	Exemple de concepts architecturaux développés dans le cadre du concours lancé par le « <i>Royal Institue of British Architects</i> »	19
Figure 2-12 :	Exemples de traitement architectural des armements de caténaire	19
Figure 2-13 :	Armement du projet ACCUM porté par la SNCF, Stratiforme Industries, le Centre d'essais ferroviaires de Valenciennes et l'IMT Lille Douai	20
Figure 2-14 :	Exemples de nouvelles solutions technologiques d'appareils tendeurs	20
Figure 2-15 :	Carte des climats de Köppen-Geiger.....	23
Figure 2-16 :	Photos des métros d'Helsinki et de Moscou	23
Figure 2-17 :	Vue en coupe du montage 3 ^e rail installé sur le métro de Moscou.....	27
Figure 2-18 :	Vues de certaines sections aériennes et surélevées du métro de Moscou	27
Figure 2-19 :	Souffleur utilisé lors de la tempête de février 2021 à Moscou	28
Figure 2-20 :	Déneigement manuel requérant un nettoyage plus précis sur le réseau du métro de Moscou	28
Figure 2-21 :	Métro de Helsinki sur une portion en surface	30
Figure 2-22 :	Accumulation de neige liée au passage des trains - REM de l'Est	32
Figure 2-23 :	Solutions pouvant être mises en œuvre - REM de l'Est	32
Figure 2-24 :	Exemple de réseau de chauffage sous dalle.....	33

REM de l'Est

Phase de
développement

1

Introduction

COENTREPRISE
AECOM | SYSTRA

1. INTRODUCTION

1.1 OBJECTIF DU DOCUMENT

Lors de la phase 1 de la conception préliminaire du projet, la caténaire a été identifiée comme la meilleure alternative pour l'alimentation de traction du système de transport. Cependant, les conflits avec les lignes très haute tension (THT) de Hydro-Québec (HQ) sur les secteurs Sherbrooke et Hochelaga ainsi que la volonté d'améliorer l'aspect esthétique du projet, particulièrement sur le secteur du centre-ville, imposent de revisiter les décisions de la phase 1 en approfondissant l'analyse basée sur une étude multicritères et sur les retours des différents acteurs industriels du système « troisième rail », incluant le patin collecteur du matériel roulant.

Ce document a donc pour objectif de recommander le système de captation de l'énergie de traction le plus adapté au contexte du projet REM de l'Est.

Il est important de souligner que ce rapport a été produit sur la base des deux principales exigences suivantes, caractéristiques du projet REM de l'Est :

- développer un projet *Signature* dans lequel le système de captation doit s'intégrer le plus harmonieusement possible dans l'environnement urbain du projet ;
- définir un système de captation présentant les meilleures garanties en termes de fiabilité et de disponibilité pour le système de transport afin de garantir la qualité de service nominale durant la période hivernale et les conditions climatiques extrêmes de la ville de Montréal.

Dans un tel cas et afin d'être en mesure de conduire à une conclusion issue d'une analyse couvrant tous les critères pris en compte, ce document est constitué de deux chapitres additionnels au premier.

Le deuxième chapitre expose le processus qui aboutit à l'identification des solutions de captage de traction compatibles avec le système de transport du REM de l'Est et les caractéristiques de chaque solution retenue à travers ce processus.

Les conclusions proposées par la co-entreprise pour chaque critère sont établies de façon objective sur la base des arguments développés pour chacun d'eux et indépendamment des autres critères.

Le deuxième chapitre a pour objectif de confronter les solutions de captage identifiées au premier chapitre avec les exigences définies pour le projet REM de l'Est à travers une analyse multicritères en attachant une attention particulière aux conditions météorologiques hivernales de Montréal, critère décisif sur le projet pour lequel une analyse comparative sera développée à travers une palette de projets de métro en service dans des régions du monde qui présentent un profil climatique proche de celui de Montréal, références à l'appui.

Enfin, le document sera conclu par la recommandation finale de la co-entreprise au Client, à la lumière des arguments et constats développés tout au long du document.

1.2 ABRÉVIATIONS

Tableau 1-1 : Liste des abréviations

Abréviation	Signification
CA	courant alternatif
CAT	caténaire
cc	courant continu
CEM	compatibilité électromagnétiques
CV	courants vagabonds
FdC	fil de contact
FDM	fiabilité, disponibilité et maintenabilité
HQ	Hydro-Québec
HT	haute tension
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Commission électrotechnique internationale)
IEEE	Institut des ingénieurs électricité et électronique
LAC	ligne aérienne de contact
MALT	mise à la terre
REM	Réseau express métropolitain
SIL	<i>Safety Integrity Level</i>
SST	sous-station de traction
THT	très haute tension
VF	sous-système voie ferrée

1.3 RÉFÉRENCES

1.3.1 Documents de référence

Tableau 1-2 : Liste des documents de référence

N°	Document de référence	Intitulé du document
[1]	CDPQ_03_5038-L-EDK0-RP-GE00-0004-B	Avant-projet préliminaire - Combo C1
[2]	03-AECSYS-RAP_DEV_EEN_GE00_T05_0094-0	Rapport des exigences fonctionnelles et normatives et liste des interfaces électrification

N°	Document de référence	Intitulé du document
[3]	03-AECSYS-RAP_DEV_BIL_GE00_T06_0092-00	Rapport technique - Choix alimentation
[4]	03-AECSYS-RAP_DEV_BIL_GE00_T06_0093-00	Rapport technique 3 ^e rail vs caténaire
[5]	03-AECYS-ETU_DEV_GEC_GE00_T00_0307-00	Étude comparative de modes lourds de transport collectif

1.3.2 Normes

Tableau 1-3 : Liste des normes

N°	Document de référence	Intitulé du document
1	EN 50122	Applications ferroviaires - Installations fixes - Sécurité électrique, mise à la terre et circuit de retour
2	CSA C22.3 n° 1 :20	<i>Overhead Contact System</i>
3	EN 50119	Applications ferroviaires - Installations fixes - Lignes aériennes de contact pour la traction électrique
4	EN 50162	Protection contre la corrosion due aux courants vagabonds des systèmes à courant continu
5	EN 50500	Procédures de mesure des niveaux de champ magnétique générés par les appareils électriques et électroniques dans l'environnement ferroviaire en regard de l'exposition humaine

1.3.3 Autres références

Tableau 1-4 : Liste d'autres références

N°	Identification sources
1	<i>Climate Data.Org</i>
2	Documentation fournisseurs (REHAU et PANDROL pour 3 ^e rail, VALMONT pour les poteaux architecturaux, FLEXELEC pour le câble chauffant)
3	Retour d'expérience du métro de Moscou

REM de l'Est

Phase de
développement

2

**Identification
des solutions de
captage**

COENTREPRISE
AECOM | SYSTRA

2. IDENTIFICATION DES SOLUTIONS DE CAPTAGE

Ce chapitre a pour objectif de définir les solutions de captage de l'énergie de traction compatible avec le système de transport du REM de l'Est.

Pour rappel, le système de transport retenu pour le REM de l'Est est un métro léger automatisé électrique.

Pour ce système de transport, en se référant aux différents systèmes en exploitation au niveau mondial, nous recensons les deux familles suivantes :

- la technologie caténaire ;
- la technologie 3^e rail.

Ce chapitre présente ces technologies et se conclut par une analyse comparative des solutions retenues.

2.1 TECHNOLOGIE 3^e RAIL

L'énergie est transmise aux trains le long de la voie ferrée au moyen d'un système au niveau du sol, en utilisant un 3^e rail posé à proximité des rails de roulement.

La figure ci-dessous montre les principaux systèmes de captage par 3^e rail.

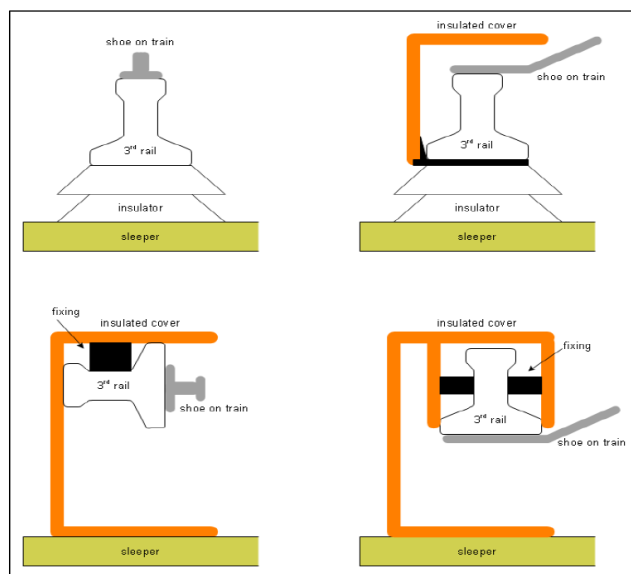


Figure 2-1 : Principaux systèmes de captage par 3^e rail

Le système le plus économique et aussi le plus répandu est le système de « contact par le haut ». Son inconvénient le plus important est que la face de contact du rail est exposée aux conditions météorologiques ; cette configuration peut engendrer des défauts de captage lors de conditions météorologiques défavorables. Une solution possible à ce problème consiste à ajouter un couvercle isolé au rail. Cette protection est généralement réalisée en fibre de verre sans halogène et ignifugée pour les tunnels.

Le contact latéral est également une bonne option, même s'il est plus coûteux. Il est principalement utilisé pour les lignes de métro sur pneus.

Dans le cas d'un contact par le bas avec un couvercle de protection ou d'un contact par le haut avec un niveau de protection, le matériel roulant devra être équipé de bras de support du sabot de contact. La longueur de ces bras devra être incluse dans le gabarit du matériel roulant pour des raisons de sécurité vis-à-vis des personnes pouvant circuler à proximité des voies.

Le 3^e rail est réalisé en fer doux ou en matériau composite (également appelé 3^e rail composite) : aluminium avec une bande de contact réalisée en acier inoxydable ou en fer doux.

Le 3^e rail composite est proposé pour un contact par le haut ou par le bas.

Comme expliqué dans le livre « *Electrical Railway Transportation Systems* » par Brenna, Foadelli et Zaninelle aux éditions Wiley-IEEE, 2018 ; le système 3^e rail est appliqué dans des villes comme New-York, Vancouver, Sao Paulo, London, Vienna et Osaka avec, généralement, une tension de 750 V cc.

Il y a cependant des exceptions allant de 600 V cc à 1 200 V cc comme Tokyo et Berlin ou encore un rare cas à 1 500 V cc. comme la ville de Guangzhou.

Le 3^e rail est aussi couramment utilisé pour les systèmes de métro sans conducteur comme dans les villes de Copenhague, Milan, Riyadh, Doha, Dubaï, Thessalonique et Taipei.

Il est plus courant de trouver les systèmes avec 3^e rail en tunnel (comme à Montréal) car ils permettent d'optimiser les coûts de construction des tunnels. Ils sont plus rares dans les systèmes en aérien mais Dubaï et Le Caire sont des exemples de réseaux possédant des tronçons aériens en exploitation avec un 3^e rail. Le Royaume-Uni possède également 2 000 km de chemin de fer en 750 V cc, 3^e rail.



Figure 2-2 : Alimentation par 3^e rail sur viaduc (métro de Pusan, Corée)

2.2 TECHNOLOGIE DE LA CATÉNAIRE

Il s'agit d'un système mécanique qui supporte un ou deux conducteurs en cuivre ou en aluminium au-dessus des voies par lesquels l'énergie est transmise aux trains. Le captage du courant est effectué par un (ou des) pantographe(s) situé(s) sur le toit du matériel roulant. Le courant revient aux sous-stations par les rails de roulement.

La caténaire peut être accompagnée d'un feeder installé le long des voies, renforçant la distribution de l'énergie.

Les caténaires peuvent être classées selon leur conception comme suit :

- la caténaire souple constituée d'au moins un fil de contact ;
- la caténaire rigide avec profil en aluminium et fil de contact en cuivre.

Ces différents types de caténaires sont envisagés selon différents critères tels que :

- la vitesse de conception ;
- le parcours des trains en site propre ou en site urbain partagé, par exemple ;
 - la tension d'alimentation ;
 - les caractéristiques du matériel roulant ;
 - etc.

En voie principale, correspondant aux sections viaduc et tunnel sur le REM de l'Est, il existe trois types de configurations://



Ligne aérienne de contact (LAC)



Caténaire légère (CAT)



Profil aérien de contact (PAC)

Figure 2-3 : Trois types de configurations de caténaire en voie principale

En règle générale, les installations avec un fil de contact sont utilisées pour les systèmes urbains dont la vitesse de conception ne dépasse pas 70 km/h.



Figure 2-4 : Ligne aérienne de contact (LAC)

Dès lors que la vitesse de conception est supérieure à cette valeur, la mise en œuvre d'une caténaire souple composée d'au moins un fil de contact et un porteur est requise.



Figure 2-5 : Caténaire légère (CAT)

En tunnel, compte tenu de l'encombrement de la caténaire souple, qui peut être un facteur pénalisant, l'utilisation de la caténaire rigide est privilégiée. Cette dernière est particulièrement adaptée à une alimentation en courant continu, pour des vitesses de conception aux alentours de 100 à 120 km/h. Ces dernières valeurs ne présentent d'ailleurs aucun caractère restrictif.

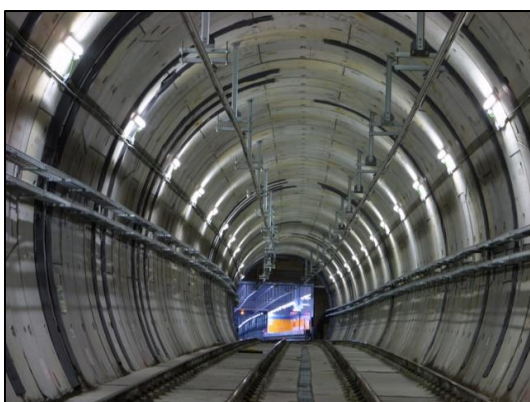





Figure 2-6 : Profilé aérien de contact en tunnel (PAC)

Une analyse comparative entre les différentes solutions caténaire est présentée page suivante.

Exploitation	Solution LAC	Solution CAT	Solution PAC
	V ≤ 70 km/h Vitesse maximale	V ≤ 200 km/h Vitesse maximale	V ≤ 100 km/h Vitesse maximale
Caractéristiques mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> Fil de contact Suspension au droit de chaque support uniquement Intervalle support : 20 à 50 m Dégagement vertical : 1,5 m 	<ul style="list-style-type: none"> Fil de contact + porteur Suspension au droit de chaque support + pendules entre supports Intervalle support : 20 à 50 m Dégagement vertical : 2,25 m 	<ul style="list-style-type: none"> Profilé + fil de contact Suspension au droit de chaque élément de profil aérien de contact Intervalle support : 10 m Dégagement vertical : 0,8 à 1,5 m
Caractéristiques électriques	<ul style="list-style-type: none"> Section électrique : 150 mm² Poste d'alimentation à intervalle de 1,5 km 	<ul style="list-style-type: none"> Section électrique : 407 mm² Poste d'alimentation à intervalle de 3,0 km 	<ul style="list-style-type: none"> Section électrique : 1 378 mm² Poste d'alimentation à intervalle de 3,0 km
Illustrations			

Compte tenu de la vitesse d'exploitation maximale du REM de l'Est fixée à 90 km/h, la solution LAC ne peut être retenue.

La solution PAC est retenue pour la section tunnel de la voie principale du REM de l'Est pour :

- son encombrement minimal compatible avec le diamètre du tunnel ;
- la possibilité de déposer/reposer rapide du système caténaire par tronçon lors d'opérations de maintenance.

La solution CAT est retenue pour la section viaduc de la voie principale du REM de l'Est pour :

- sa capacité à affronter les conditions météorologiques ;
- sa compatibilité avec la vitesse maximale de conception retenue.

2.3 ANALYSE COMPARATIVE

Sur la base des descriptions techniques faites aux précédents paragraphes, l'analyse suivante a pour objectif de définir quelle est la solution, entre le 3^e rail et la caténaire, la plus adaptée au projet REM de l'Est.

L'analyse effectuée porte sur les huit critères listés ci-dessous :

- la vitesse maximale d'exploitation ;
- les conditions météorologiques ;
- les caractéristiques électriques ;
- les caractéristiques de la ligne principale ;
- l'exploitation et maintenance ;
- l'intégration urbaine ;
- la sécurité ;
- le retour d'expérience.

2.3.1 Vitesse maximale d'exploitation

Ce critère de la « vitesse maximale d'exploitation » fait référence à la vitesse maximale d'exploitation du matériel roulant définie dans le cadre du projet et pour laquelle la compatibilité de la solution de captage est analysée.

Dans le cadre du REM de l'Est, la vitesse d'exploitation retenue est de 90 km/h mais le système de transport doit être conçu pour une vitesse maximale de 100 km/h.

Cette valeur est retenue comme référence pour l'analyse menée.

La solution caténaire, dans le cadre de systèmes de transport urbain, permet d'envisager des vitesses de circulation allant jusqu'à :

- 200 km/h pour la solution caténaire souple ; et
- 120 km/h pour le profil aérien de contact.

Ces limites sont définies par la typologie du tracé et les caractéristiques mécaniques (tension du fil de contact, portées, pendulage, hauteur) et font l'objet de vérifications systématiques pour des vitesses au-delà de 80 km/h par l'étude du comportement dynamique de l'interface pantographe-caténaire.

En ce qui concerne la solution 3^e rail, la vitesse maximale considérée en conception est de 120 km/h. Cependant, la plage de vitesse recommandée est de 50 à 100 km/h.

Sur la base des retours d'expérience des métros en exploitation dans le monde, la limite de 100 km/h est définie par la qualité dynamique du contact patin/3^e rail et les caractéristiques des tracés de voies principales.

2.3.2 Conditions météorologiques

Dans ce paragraphe, la capacité de chaque solution de captage à faire face aux conditions météorologiques identifiées pour le projet REM de l'Est, quelle que soit la saison est analysée.

En ce qui concerne la solution caténaire, des actions de maintenance connues, tant préventives et que correctives, permettent de garantir une exploitation dans des conditions météorologiques extrêmes et bénéficient de retours d'expérience conséquents décrits ci-après :

- maintenance préventive : application de produits antigels biodégradables sur base de dérivé de glycol ;
- maintenance corrective : utilisation de pantographes racleurs, de systèmes de montée en température du fil de contact par mise en court-circuit de la section électrique concernée.

La solution caténaire permet de contrôler visuellement l'ensemble de la ligne et d'identifier les zones à traiter. Elle nécessite un contrôle appuyé lors des phases hivernales pour s'assurer que les caractéristiques électriques et mécaniques du système sont garanties sur toutes les plages d'exploitation ou de maintenance.

En ce qui concerne la solution 3^e rail, en rappelant que la configuration retenue est le 3^e rail par contact inférieur avec capot isolant, une solution de système chauffant par câbles permet de prévenir la formation de gel sur le 3^e rail.

Cette solution est éprouvée et est notamment appliquée sur différents systèmes de transport en Europe du Nord.

Pour lutter contre l'accumulation de neige entre la voie ferrée et le 3^e rail, aucune disposition constructive, adaptée au contexte du REM de l'Est et éprouvée dans un système de transport globalement équivalent, n'est recensée à ce jour.

Une solution consisterait à, avec un système de chauffage, faire fondre la neige et à assurer le drainage des eaux de fonte jusqu'aux canalisations d'évacuation des eaux de ruissellement en intégrant à la structure du viaduc et sur la totalité des cheminements d'évacuation exposés au gel.

2.3.3 Caractéristiques électriques

Le critère des caractéristiques électriques porte sur l'architecture du réseau de traction à considérer en fonction de la solution de captage comme, notamment, la tension d'alimentation de traction, le nombre de postes redresseurs, la section électrique des conducteurs, etc.

Dans le cas de la solution caténaire, une alimentation en 1 500 V cc est possible permettant de minimiser le nombre de postes redresseurs (postes délivrant l'énergie de traction nécessaire à l'alimentation des trains) en considérant un intervalle entre postes de l'ordre de 3 à 3,5 km en moyenne.

Dans le cas de la solution 3^e rail, seule une alimentation en 750 V cc est envisageable pour des raisons d'isolement et de sécurité électrique. Cette configuration impose un nombre de postes redresseurs plus important, avec un intervalle moyen de l'ordre de 1 à 1,5 km entre postes redresseurs.

2.3.4 Caractéristiques de la ligne principale

Ce critère fait référence à la comptabilité de la solution de captage avec les caractéristiques d'exploitation (longueurs des trains, tension d'alimentation, parcours des trains) et le schéma des voies de la ligne principale considérés sur le projet (zones de communication, de bifurcation ou de retournement des trains).

Dans le cas de la solution caténaire, les caractéristiques du schéma de voies et du matériel roulant ne présentent aucune difficulté de compatibilité entre les caractéristiques géométriques de la caténaire et les parcours des trains envisagés dans le cadre de l'exploitation de la ligne.

Dans le cas de la solution 3^e rail, un risque de non-comptabilité, entre la longueur des trains et les principes d'implantation du 3^e rail, pouvant induire une perte d'alimentation de traction sur le parcours d'une communication croisée est identifié. La figure suivante illustre cette configuration critique.

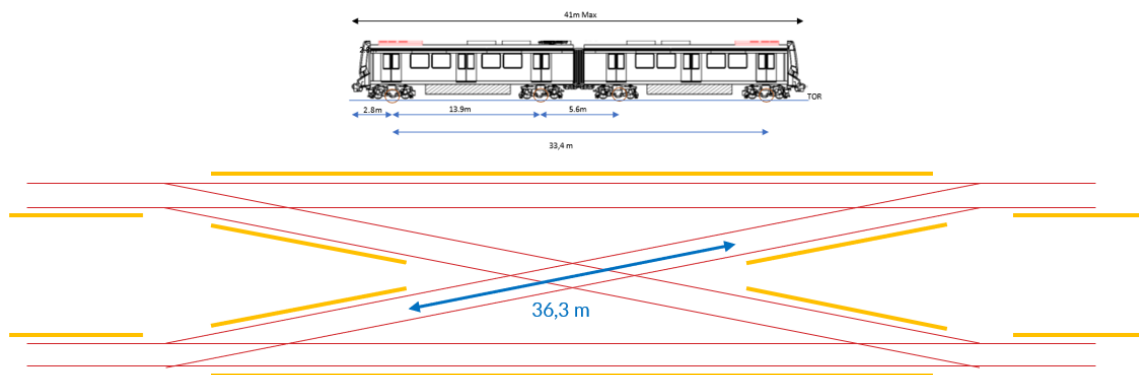


Figure 2-7 : Configuration du 3^e rail au droit d'une communication croisée en voie principale

2.3.5 Exploitation et maintenance

Le critère « opérations et maintenance » porte sur le volume des actions à mener pour garantir le niveau fiabilité/disponibilité/maintenabilité/sécurité défini sur le projet tout au long du cycle de vie du système.

Dans le cas de la solution caténaire, des opérations supplémentaires à un plan E&M standard sont à considérer afin de garantir le même niveau de disponibilité et fiabilité de la ligne, y compris en période hivernale.

Deux types de maintenances sont identifiées :

- maintenance préventive : application de produits antigels sur le fil de contact afin de prévenir la formation de glace et de givre en amont des épisodes météorologiques ;
- maintenance corrective : passage d'un train équipé de pantographe racleur, échauffement du fil de contact par mise en court-circuit contrôlée de la section impactée par la formation de givre/gel.

Dans le cas de la solution 3^e rail, le lecteur doit se reporter au paragraphe 2.5 Conditions climatiques et 3^e rail.

Concernant les opérations de déneigement, du fait de la contrainte de ne pas pouvoir évacuer latéralement à l'avancement la neige accumulée sur les voies, il est envisagé d'utiliser un train déneigeur qui aspirerait la neige pour la faire fondre et la stocker en eau pour *in fine* évacuer cette dernière sur un/des site(s) dont les caractéristiques et les emplacements restent à valider.



Figure 2-8 : Train déneigeur aspirant la neige pour la faire fondre et la stocker en eau

Si cette solution résolvait le déneigement de la voie tout en respectant le gabarit limite d'obstacles de la caténaire et du 3^e rail, en revanche, le déneigement de la zone au-dessous du 3^e rail est une problématique et ne bénéficie d'aucune solution référencée à ce jour ayant prouvé son efficacité dans un contexte comme Montréal.

Une solution consisterait à équiper le train déneigeur de balais latéraux dont l'efficacité est à démontrer dans le contexte de Montréal avec des 3^e rails en entrevoie ou latéraux.

2.3.6 Intégration urbaine

Le critère « intégration urbaine » fait référence au degré de discrétion visuelle et/ou de minimalisme des infrastructures nécessaires au déploiement de la solution de captage dans un environnement urbain.

À ce titre, la solution caténaire offre une palette de solutions limitées aux poteaux et aux armements où un travail architectural peut être développé. Les traitements architecturaux sont contraints par les exigences en teneur mécanique qui garantissent le bon fonctionnement du système caténaire (résistance aux efforts applicables, régularisation du fil de contact).

La solution 3^e rail, du fait de son implantation au niveau de la voie ferrée, permet une intégration urbaine optimale ceci, d'autant plus quand le tracé de la ligne est aérien dans les secteurs à enjeux architecturaux.

2.3.7 Sécurité

Le critère « sécurité » considère les risques d'incident/d'accident pour le personnel d'exploitation et de maintenance amené à accéder à la plateforme ferroviaire.

Pour la solution caténaire, les inspections visuelles depuis la plateforme et certains travaux de maintenance peuvent être menés en garantissant la sécurité du personnel grâce à la distance entre le fil de contact de la caténaire et la voie ferrée.

Pour la solution 3^e rail, les inspections visuelles doivent être encadrées afin d'assurer, par le personnel de maintenance, le respect des distances d'éloignement vis-à-vis du 3^e rail. En revanche, toute intervention de maintenance au niveau de la plateforme doit faire l'objet d'une consignation afin que le 3^e rail soit hors tension, impactant par la même occasion l'exploitation si l'activité ne peut être menée hors période d'exploitation.

2.3.8 REX (retour d'expérience)

Le « retour d'expérience » porte sur le nombre d'années d'exploitation de systèmes de transport avec de telles solutions dans un contexte globale au moins équivalent.

Nous tenons à rappeler que les solutions de captage faisant l'objet de la présente analyse sont les solutions historiques de la traction électrique dont les premiers travaux remontent aux années 1800 et dont nous vous exposons ci-dessous les événements historiques marquants.

En 1879 à Berlin, Werner von Siemens fait rouler un train de démonstration tracté par une locomotive électrique sur un circuit circulaire de 300 m. C'est le premier train à traction électrique transportant des passagers. La petite locomotive électrique était entraînée à 13 km/h par un moteur série de 2,2 kW alimenté en 150 V continu par 3^e rail sur lequel roulait un galet collecteur.

En 1881 à Paris, le même Werner von Siemens fait la démonstration d'une alimentation par ligne de contact aérienne.

La même année le premier tramway électrique est mis en service à Lichterfelde. Les véhicules de 4 kW étaient alimentés en 180 V par les rails.

En 1883, le tramway entre Mödling et Hinterbrühl, près de Vienne en Autriche est le premier service régulier sous caténaire. Cinq ans plus tard, Frank J. Sprague appliquera cette alimentation par caténaire au tramway de Richmond.

En 1901 en France, la ligne de Saint-Gervais-les-Bains-Le Fayet à Vallorcine est mise en service. Cette ligne de montagne à voie métrique est équipée d'une alimentation en tension continu de 800 V, assurée

par un 3^e rail. La traction électrique fournit une puissance suffisante pour exploiter la ligne en simple adhérence malgré un profil difficile. Mise en service à partir de 1909, la ligne de Cerdagne présente des caractéristiques très voisines, avec une tension continue de 850 V.

Si la technologie 3^e rail a évolué depuis ces premières expériences en termes de principe acquérant uniquement au cours des années des évolutions significatives visant à améliorer l'isolation et offrant différentes configurations de contact, la solution caténaire a considérablement évolué de 1900 à 1945 pour aboutir à des solutions adaptées à tous types de vitesse et couvrant l'ensemble des systèmes de transport, du tramway jusqu'au train à grande vitesse en passant par les métros et les trains intercity.

Ces deux solutions bénéficient donc d'un retour d'expérience de plus de 100 ans permettant de valider la compatibilité de celles-ci avec le système métro léger du REM de l'Est.

En revanche, elles restent vulnérables quant aux conditions hivernales extrêmes comme c'est le cas à Montréal.

Des retours d'expérience de systèmes de transport exploités dans des conditions proches avec l'une ou l'autre solution nous permettent de prévoir les problèmes récurrents rencontrés dans de telles conditions et de définir les actions préventives/correctives éprouvées (voir paragraphe 2.3.7).

En revanche, la problématique de la configuration du tracé en viaduc avec 3^e rail et les conditions d'enneigement de Montréal ne bénéficie d'aucun retour d'expérience rendant cette solution un prototype.

2.3.9 Synthèse de l'analyse selon les huit critères considérés

Le tableau dessous compile les avis formulés par la co-entreprise sur les deux systèmes de captage selon les huit critères considérés.

Tableau 2-1: Tableau de synthèse des analyses selon les huit critères considérés

Critères	Solution CAT	Solution 3 ^e rail
Vitesse maximale d'exploitation	😊	😊
Conditions météorologiques	😐	😞
Caractéristiques électriques	😊	😐
Caractéristiques de la ligne	😊	😐
Opérations et maintenance	😐	😐
Intégration urbaine	😞	😊
Sécurité	😊	😐
REX	😊	😐

Les prochains chapitres développent les deux points critiques identifiés en rouge ci-dessus afin d'explorer leurs possibilités d'amélioration.

2.4 INTÉGRATION URBAINE ET CATÉNAIRE

Afin d'optimiser l'intégration urbaine du sous-système caténaire, il est important de souligner que des solutions architecturales existent et sont régulièrement appliquées, notamment pour les projets tramways, mais peuvent tout à fait être appliquées aux projets métros légers.

Des exemples de développements et d'adaptations architecturaux appliqués aux supports de caténaire, lesquels peuvent allier fonctionnalité et mise en valeur de l'ouvrage, sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

2.4.1 Traitement architectural des supports caténaire

Il existe des solutions basées sur les arches où la structure porteuse est monobloc et encadre la plateforme.



Figure 2-9 : Exemples d'arches supports de caténaire

Et les solutions sur base poteaux (la plus répandue) permettant une implantation axiale ou latérale.



Figure 2-10 : Exemples de traitements architecturaux de poteaux supports de caténaire

Il est à noter qu'une signature architecturale de poteaux peut être développée par les architectes du projet REM de l'Est afin d'assurer la cohérence architecturale du projet. La seule limite à ce développement est constituée par la résistance mécanique qu'il sera nécessaire d'assurer au regard des efforts statiques et mécaniques générés par un système caténaire.

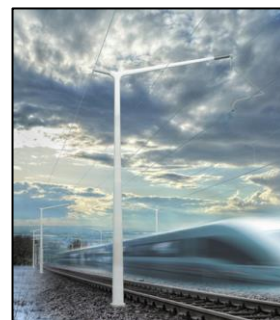
Pour illustrer cette démarche, citons par exemple le concours pour la conception de systèmes caténaire lancé par le « Royal Institute of British Architects » [Shortlisted Designs | Aesthetic Overhead Line Structures \(ribacompetitions.com\)](http://ribacompetitions.com).



Projet BOW (Bystrup Architecture)



Integrated OLS (Moxon Architects)



Tomahawk (KOBE)

Figure 2-11 : Exemple de concepts architecturaux développés dans le cadre du concours lancé par le « Royal Institute of British Architects »

2.4.2 Armements de caténaire

En termes d'armements (équipements qui font la jonction entre le poteau et le fil de contact), les solutions d'innovation architecturale sont limitées par les contraintes techniques auxquelles doivent répondre ces équipements (isolement électrique, résistance mécanique, ...).

Cependant, des produits existent sur le marché qui aboutissent à un nombre minimal de pièces et, par la même occasion, à une réduction de leur impact visuel. Les photos ci-dessous illustrent les conceptions visant à réduire l'impact visuel des armements de caténaire.



Figure 2-12 : Exemples de traitement architectural des armements de caténaire

À noter que certaines innovations sont également en cours de développement qui, pour certaines, ont dépassé le stade de l'industrialisation et sont désormais en phases d'essais sur des réseaux exploités.

Citons par exemple le projet ACCUM porté par la SNCF, Stratiforme Industries, le Centre d'essais ferroviaires de Valenciennes et l'IMT Lille Douai.

Ce projet de modernisation est mené depuis une dizaine d'années en collaboration avec la SNCF et Stratiforme Industries, société spécialisée en matériaux composites. En 2019, il a abouti à l'installation de 50 armements prototypes sur des lignes de tests du Centre d'essais ferroviaires, puis à des installations sur des lignes commerciales.



Figure 2-13 : Armement du projet ACCUM porté par la SNCF, Stratiforme Industries, le Centre d'essais ferroviaires de Valenciennes et l'IMT Lille Douai

L'innovation portée par cet armement est, au-delà de sa conception, une diminution de 50 % du nombre de constituants (par rapport à un armement classique) ainsi que la standardisation des pièces optimisant la gestion des stocks et une facilité de manutention et la rapidité d'installation ou de renouvellement par son faible poids.

2.4.3 Appareils tendeurs

Au même titre que les armements, de nouvelles solutions technologiques d'appareils tendeurs ont vu le jour ces 15 dernières années afin :

- de minimiser l'emprise spatiale d'un montage appareil tendeur classique ;
- de diminuer de façon significative le nombre de pièces constituant un montage appareil tendeur ;
- d'augmenter la fiabilité et la qualité de la régularisation ;
- de faciliter les opérations lors des phases d'installation et de maintenance en minimisant les moyens nécessaires associés.

Certains appareils tendeurs proposent une collecte à distance des valeurs caractéristiques de réglages permettant en temps réel ou en différé d'analyser les résultats.

2.4.4 Synthèse

En conclusion, des solutions pour améliorer l'intégration urbaine de la caténaire existent et peuvent faire l'objet d'une définition spécifique dans le cadre de la mission d'intégration urbaine assurée par le cabinet Lemay ou d'exigences d'intégration transférées aux futurs constructeurs dans le respect des fonctionnalités techniques (mécaniques et électriques) des équipements de caténaire, en référence aux normes définies dans le mémoire des phases 1 et 2A du projet REM de l'Est.

À la page suivante, un tableau met en évidence l'aspect visuel d'une caténaire de ligne/projet classique et ce que pourrait être mis en œuvre dans le cadre du projet REM de l'Est.









Appareil tendeur à ressort

Appareil tendeur à gaz

Figure 2-14 : Exemples de nouvelles solutions technologiques d'appareils tendeurs

Tableau 2-2 : Comparaison des traitement architecturaux pouvant être réalisés dans le cadre d’une ligne classique et du projet REM de l’Est

	Supports	Armements	Appareils tendeurs
Ligne classique			
Projet REM de l'Est			

2.5 CONDITIONS CLIMATIQUES ET 3^e RAIL

2.5.1 Préambule

Les conditions climatiques hivernales de Montréal constituent le point de faiblesse de la solution 3^e rail.

Ce paragraphe va s'attacher à détailler les problématiques que rencontrerait le système 3^e rail dans les conditions hivernales de Montréal, sur la section viaduc du tracé, et proposer des mesures de mitigation de(s) risque(s) identifié(s).

L'analyse sera menée en quatre temps :

- l'identification du modèle climat/système de transport équivalent à Montréal ;
- la présentation du retour d'expérience obtenu par l'exploitant du métro de Moscou ;
- la présentation du retour d'expérience obtenu par l'exploitant du métro d'Helsinki ;
- la mise en évidence des particularités du projet REM de l'Est.

Pour rappel, les conditions climatiques définies pour la conception du système de transport du REM de l'Est sont les suivantes:

- les températures : -40 °C à + 40 °C ;
- les précipitations quotidiennes extrêmes :
 - de pluie : 95 mm ;
 - de neige : 44 cm ;
 - de pluie verglaçante : 30 mm ;
- les taux horaires de précipitations :
 - de pluie : 60 mm/h ;
 - de neige : 55 mm/h ;
 - de pluie verglaçante : 5 mm/h ;
- les chutes de neige annuelles moyennes : 210 cm ;
- le couvert de neige extrême : 102 cm ;
- la vitesse extrême des vents : 90 km/h ;
- les rafales de vent extrêmes : 161 km/h ;
- l'humidité relative : 10 % à 100 %.

2.5.2 Identification du modèle climat/système de transport équivalent à Montréal

Le classement climatologique de Köppen Geiger permet d'identifier la/les ville(s) ayant les caractéristiques météorologiques globalement équivalentes à Montréal et dotée(s) d'un système de transport type métro.

La classification de Köppen est une classification des climats fondée sur les précipitations et les températures.

C'est la plus courante des classifications climatiques dans sa version présentée par Rudolf Geiger (de) en 1961. Un très grand nombre d'études climatiques et de publications ont adopté une des versions de ce système. La carte de Köppen-Geiger reste aujourd'hui une référence grâce à ses mises à jour fréquentes tant dans les domaines de l'hydrologie, de la géographie, de l'agriculture, de la biologie, la climatologie à travers ses recherches sur l'évolution des climats.

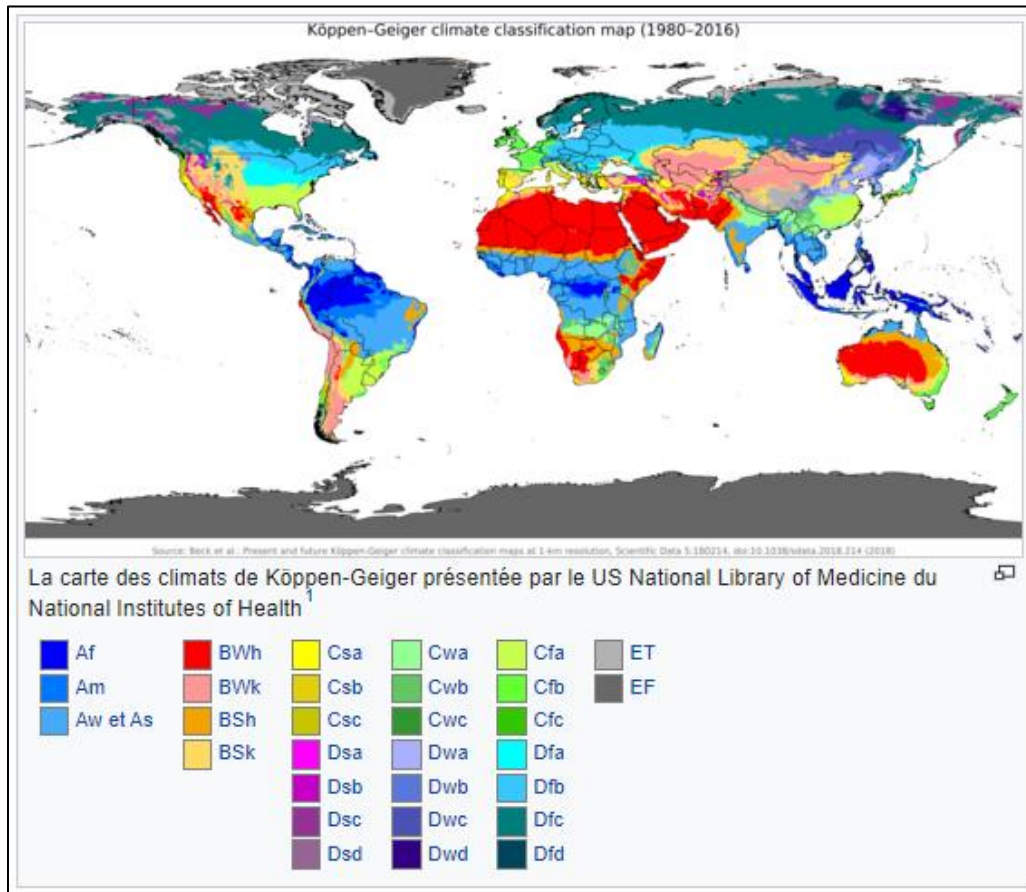


Figure 2-15 : Carte des climats de Köppen-Geiger

Le climat de Montréal appartient, selon le classement Kopen Geiger, à la classe Dfb.

En se limitant aux villes appartenant à la même classe de climat, deux villes aux conditions météorologiques proches de celles de Montréal sont identifiées. Il s'agit d'Helsinki (Finlande) et de Moscou (Russie).



Méto de Helsinki



Méto de Moscou

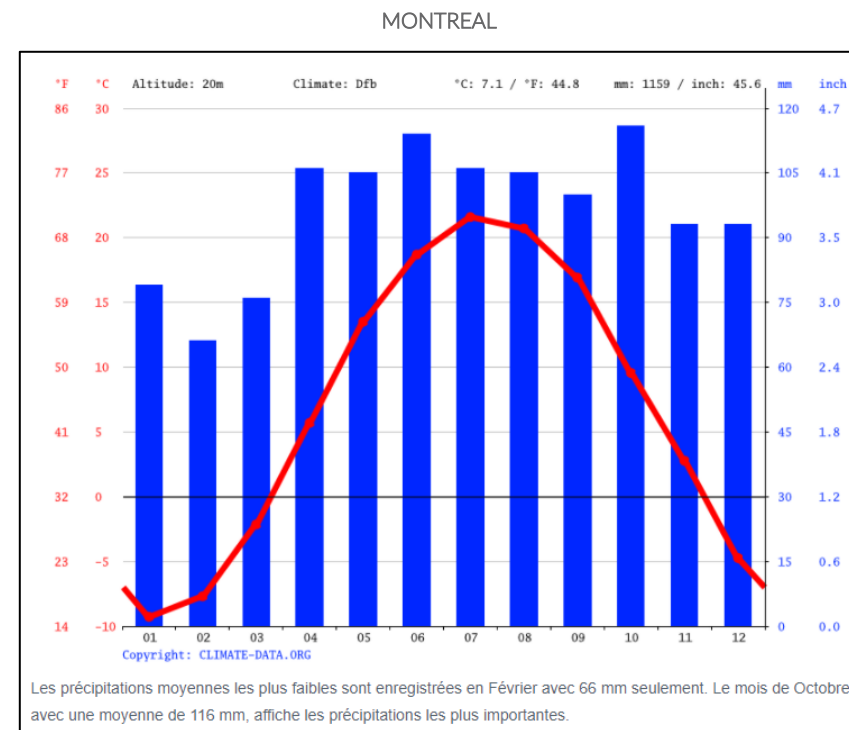
Figure 2-16 : Photos des métros d'Helsinki et de Moscou

L'analyse comparative qui suit s'attachera à présenter les particularités de ces deux lignes ainsi que les mesures de déneigement appliquées par les exploitants respectifs avant de conclure sur l'applicabilité de telles mesures sur le projet REM de l'Est.

Toutes les données climatiques collectées sur le site <https://fr.climate-data.org> sont basées sur les données de l'ECMWF. Le modèle possède plus de 1,8 milliard de points de données et une résolution de 0,1 à 0,25 grade. Ces données météorologiques ont été recueillies entre 1999 et 2019. Les graphiques et tableaux sont générés à l'aide des informations du Copernicus Climate Change Service entre 1999 et 2019.

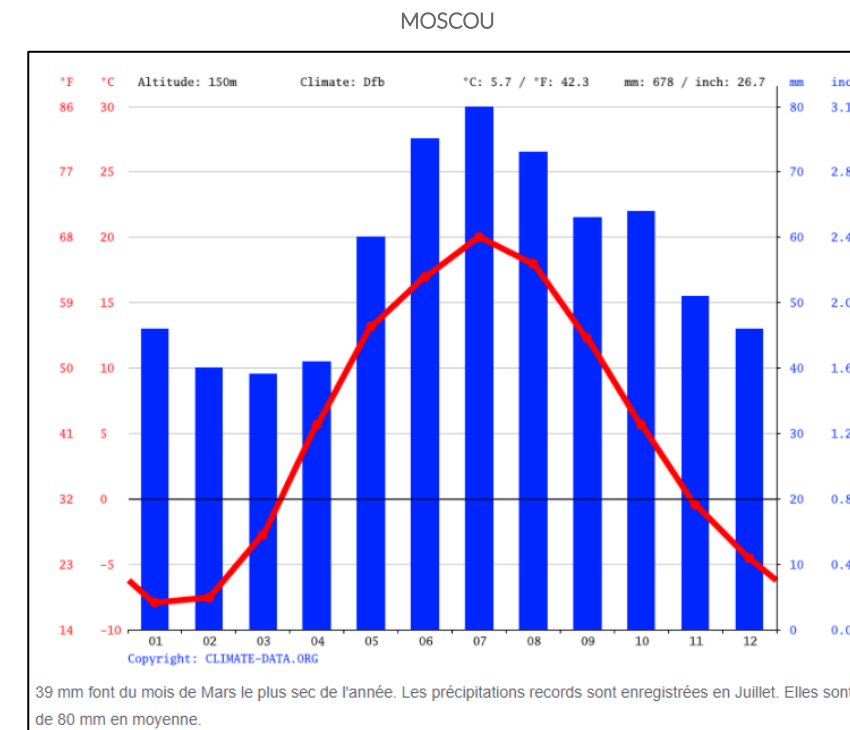
Concernant les précipitations de neige, les informations partagées sur ce site ne permettent pas de différencier les précipitations pluviales des chutes de neige. En conséquence, l'analyse entre villes considère que les précipitations relevées de décembre à mars correspondent à des chutes de neige.

Une analyse des conditions météorologiques de Montréal sera traitée à la suite de celle-ci sur la base des relevés émis par le site du Gouvernement du Québec.



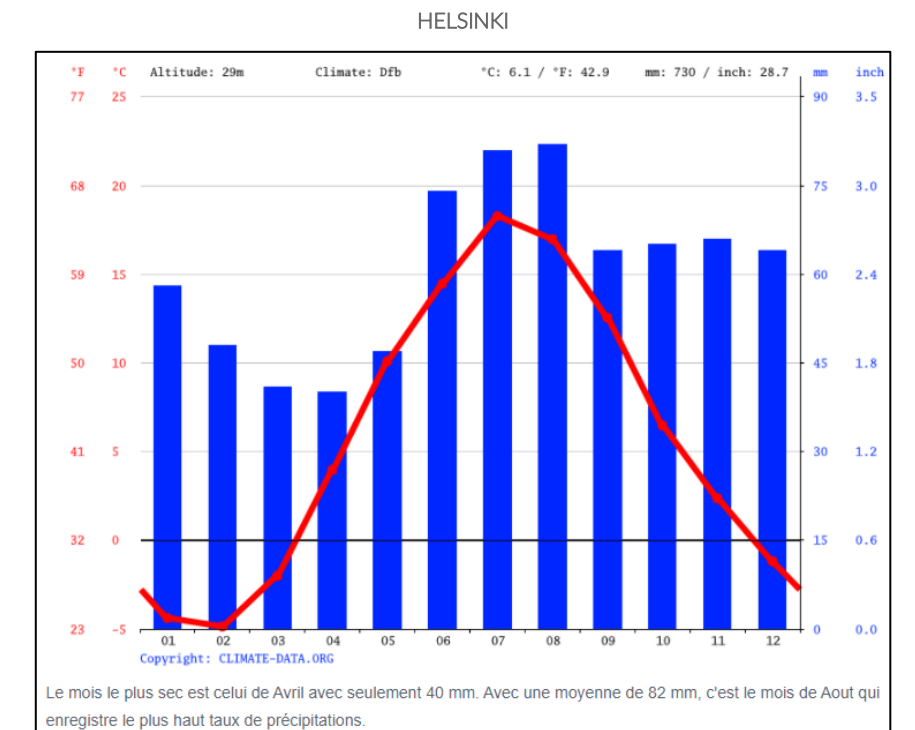
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température moyenne (°C)	-9.3	-7.7	-2.2	5.7	13.5	18.7	21.5	20.7	16.9	9.6	2.8	-4.7
Température minimale moyenne (°C)	-13.3	-11.8	-6.2	1.2	8.8	14.5	17.8	16.9	13.2	6.6	0.1	-7.9
Température maximale (°C)	-4.7	-2.7	2.9	11.2	18.9	23.5	26	25	21.3	13.3	6.2	-1.1
Précipitations (mm)	79	66	76	106	105	114	106	105	100	116	93	93
Humidité(%)	75%	72%	86%	83%	84%	89%	89%	71%	72%	73%	76%	77%
Jours de pluie (j/ée)	8	8	8	9	9	9	10	8	7	9	9	9

La différence de précipitations entre le mois le plus sec et le mois le plus humide est de 50 mm. Une variation de 30.9 °C est enregistrée sur l'année.



	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température moyenne (°C)	-7.9	-7.6	-2.8	5.7	13.2	17	20	18	12.3	5.7	-0.5	-4.5
Température minimale moyenne (°C)	-10.7	-10.7	-6.6	0.3	7.4	11.8	15.3	13.5	8.5	3	-2.5	-6.8
Température maximale (°C)	-5.7	-4.9	0.8	10.3	17.7	21	24	22	15.8	8.2	1.4	-2.6
Précipitations (mm)	46	40	39	41	60	75	80	73	63	64	51	46
Humidité(%)	85%	84%	80%	89%	84%	85%	88%	70%	75%	79%	84%	84%
Jours de pluie (j/ée)	9	8	7	7	8	9	9	8	7	9	8	9

Entre le plus sec et le plus humide des mois, l'amplitude des précipitations est de 41 mm. La température moyenne au court de l'année varie de 28.0 °C.



	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température moyenne (°C)	-4.4	-4.9	-2	4	10.1	14.5	18.3	17	12.6	6.5	2.4	-1.2
Température minimale moyenne (°C)	-6.4	-7.1	-5	0.4	6.2	10.9	14.9	14	10.1	4.5	0.8	-2.8
Température maximale (°C)	-2.6	-2.9	0.7	7.3	13.4	17.5	21.2	19.8	15	8.3	3.7	0.4
Précipitations (mm)	58	48	41	40	47	74	81	82	64	65	66	64
Humidité(%)	86%	87%	83%	74%	88%	89%	72%	75%	80%	84%	87%	88%
Jours de pluie (j/ée)	9	8	7	7	7	8	9	10	8	9	9	10

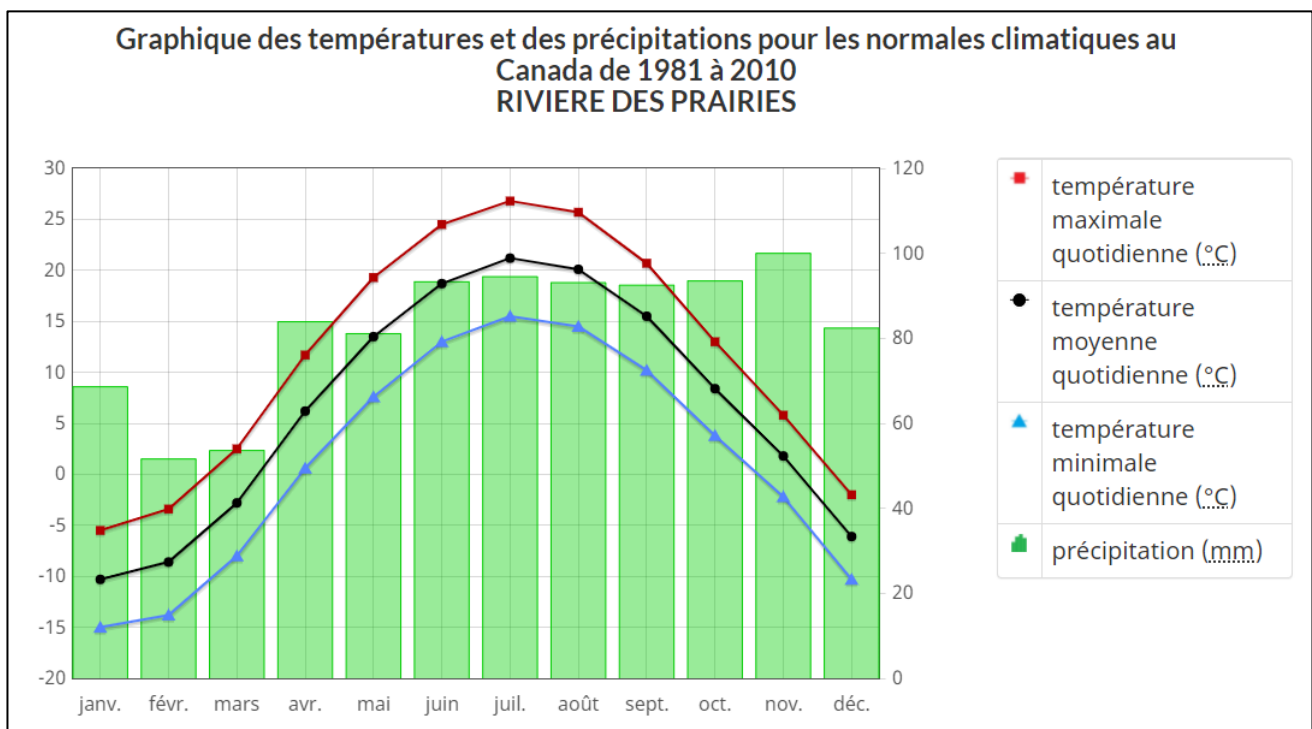
La différence de précipitations entre le mois le plus sec et le mois le plus humide est de 42 mm. Sur l'année, la température varie de 23.1 °C.

- Avant de commencer l'exploitation des données ci-dessus, nous tenons à alerter le lecteur que les histogrammes ne possèdent pas la même échelle en ordonnée ce qui pourrait induire en erreur. Si ces diagrammes semblent en apparence proche visuellement, ce n'est pas le cas en termes de valeurs numériques. Ces diagrammes étant la source du site : <https://fr.climate-data.org>, nous n'avons pas la possibilité de les réajuster.
- Sur le volet températures, Moscou est la ville présentant des températures très proches de celles de Montréal et constitue donc un excellent modèle.
- Concernant le volet précipitations neigeuses, Moscou se situe entre 38 et 46 mm de précipitation maximale par mois de moyenne alors que Montréal se situe entre 68 et 92 mm soit un ratio de 0,7 à 2,0 en faveur de Montréal.
- En revanche, Helsinki se situe entre 40 et 64 mm de précipitation maximale mensuelle. Helsinki constitue donc le meilleur modèle bien que l'écart avec Montréal soit un ratio de 0,3 à 0,4 en faveur de Montréal.
- La conclusion est que Moscou peut être considéré comme un bon modèle pour la contrainte de givre/gel.
- En revanche, le modèle d'Helsinki est la meilleure référence malgré un écart de 40 % à 70 % avec Montréal.

Après cette analyse macro du climat de Montréal au niveau mondial, nous exposons ci-dessous les données climatiques détaillées issues du site du site du gouvernement du Canada (https://climat.meteo.gc.ca/climate_data).

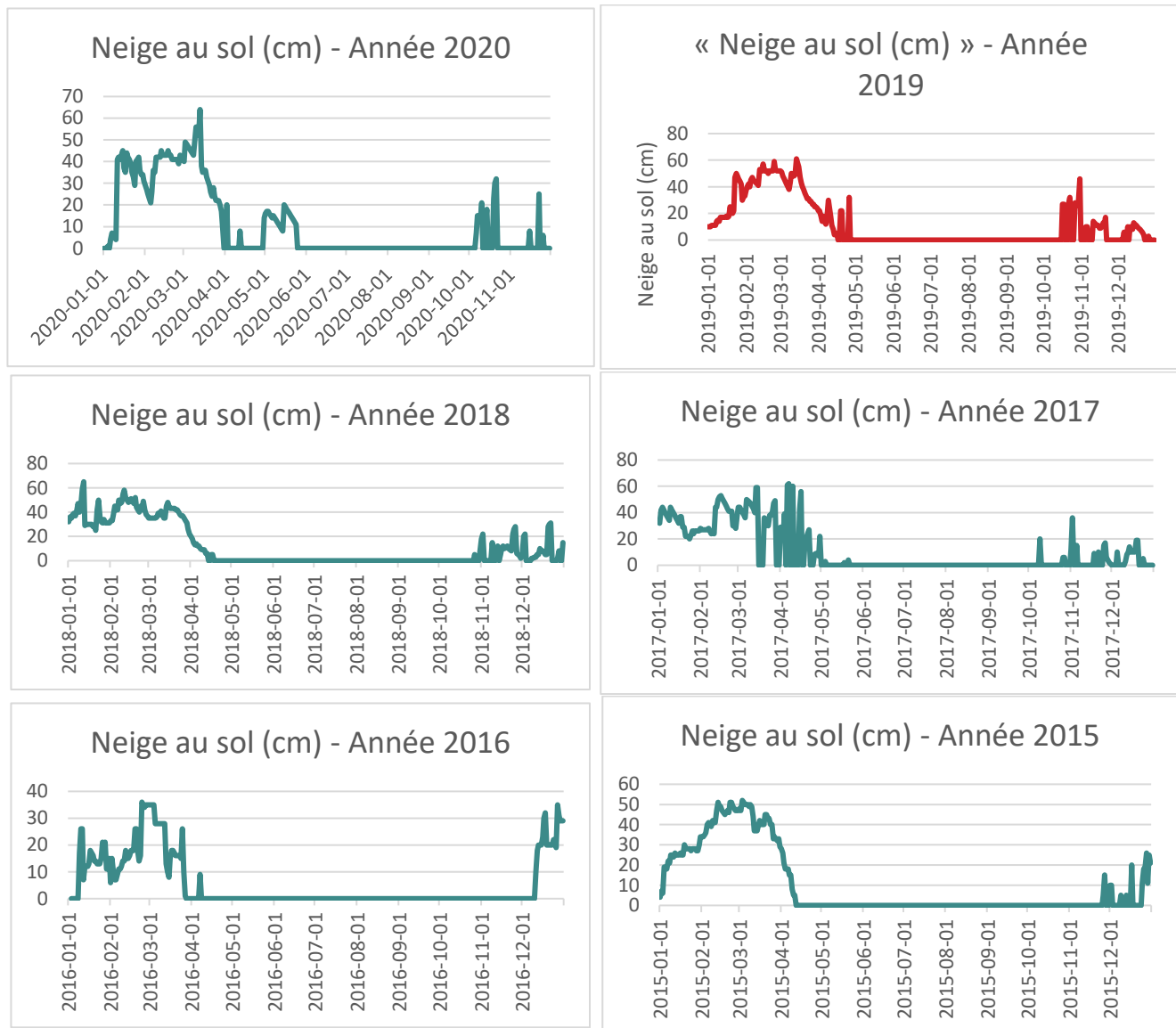
Dans un premier temps, ci-après le graphique des températures et des précipitations annuelles sur la période de 1980 à 2021, relevés établis par la station Rivière-des-Prairies, identifié comme le plus proche du tracé du projet REM de l'Est.

Nous remarquerons la proximité des données affichées avec celles affichées par le site <https://fr.climate-data.org> utilisées dans l'analyse précédente.



Le site du gouvernement du Canada dresse les données météorologiques au jour le jour en identifiant les précipitations de neige et l'accumulation de neige au sol.

Veillez noter que les données du mois de décembre ne sont pas disponibles expliquant l'absence d'affiche sur le diagramme de l'année 2020.



Sur la base des graphiques, nous effectuons le constat suivant :

- les plus hauts niveaux de neige au sol sont atteints sur la période de janvier à avril ;
- à l'exception de 2016, le couvert de neige atteint *a minima* 50 cm et peut atteindre 65 cm.

Nous tenons à rappeler que ces constats sont établis sur les cinq dernières années mais si l'on se réfère au graphique des températures et des précipitations annuelles sur la période de 1980 à 2021 (voir page précédente), en considérant les précipitations de novembre à avril, comme de la neige, il est à noter que les précipitations les plus importantes sont atteintes sur la période de novembre à décembre, une maximale de 104 mm en novembre, ce qui peut laisser supposer un couvert de neige au moins égal à cette valeur justifiant le couvert de neige extrême défini dans le cadre des exigences rappelées au paragraphe 2.5.1 du présent document.

2.5.3 Retour d'expérience du métro de Moscou

Moscou a été identifiée comme la ville ayant les conditions climatiques les plus proches de celles de Montréal. En conséquence, un contact a été pris avec un représentant du département électromécanique du métro de Moscou. Les informations collectées sont résumées ci-dessous.

- le métro de Moscou est constitué de 15 lignes ;
- à l'exception du réseau MCC (*Moscow Central Circle*), qui est équipée de caténaire, toutes les lignes du métro sont équipées d'une alimentation par 3^e rail car l'essentiel des lignes sont souterraines ;
- les lignes de transport léger urbain (tramways et trolleybus) et lignes interurbaines en service dans la métropole moscovite ont adopté la solution caténaire du fait de leur exposition aux conditions climatiques et parce que le 3^e rail n'est pas adapté à une plateforme partagée avec les piétons et les véhicules routiers en milieu urbain.

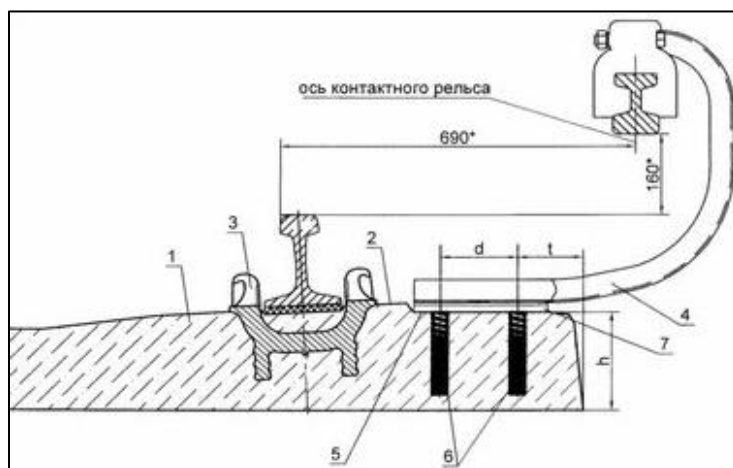


Figure 2-17 : Vue en coupe du montage 3^e rail installé sur le métro de Moscou

- la tension nominale d'alimentation de traction est de 825 V cc ;
- les lignes 1, 2, 3, 3a, 7 et 12 comportent des sections aériennes/surélevées. Il y a cinq viaducs répartis sur les lignes 1, 2, 3 et 3a.



Figure 2-18 : Vues de certaines sections aériennes et surélevées du métro de Moscou

Ci-après les retours d'expériences obtenus par l'exploitant du métro de Moscou concernant le 3^e rail.

2.5.3.1 Déneigement

Pour les opérations de déneigement des portions de tracé au sol ou aériennes, le service E&M est équipé de véhicules spéciaux appelés « souffleurs » tels que celui présenté ci-dessous utilisés lors de la tempête de neige de février 2021 qui a entraîné l'arrêt de l'exploitation commerciale.



Figure 2-19 : Souffleur utilisé lors de la tempête de février 2021 à Moscou

En complément de cette solution mécanisée, un déneigement manuel est assuré au niveau des appareils de voie en ligne et au dépôt.

Pour le déneigement manuel, l'équipement est constitué d'un compresseur avec une lance à air comprimé pour traiter les zones non accessibles et qui requièrent un nettoyage plus précis.



Figure 2-20 : Déneigement manuel requérant un nettoyage plus précis sur le réseau du métro de Moscou

Note : Lien vers une vidéo : <https://youtu.be/Y3GyJCNIMQ>

2.5.3.2 Gel et givre

L'intervalle entre trains est équivalent à celui prévu sur le REM de l'Est (jusqu'à 1,5 min entre trains).

L'exploitant du métro de Moscou considère que cet intervalle ne permet pas la formation de glace durant les heures d'exploitation grâce au frottement du patin sur le 3^e rail et au courant circulant dans ce dernier, source d'effet Joule.

L'exploitant atteste que, jamais, aucun problème lié au gel n'a impacté le trafic et ni avoir jamais eu recours à des câbles chauffants.

Durant la nuit, l'exploitation est arrêtée de 2 h 00 à 5 h 00 du matin. Si besoin, des véhicules « souffleurs » sont envoyés en ligne pour dégager la neige accumulée.

2.5.3.3 Variation de températures

À l'automne, des tournées d'inspection sont systématiquement programmées afin de corriger tout défaut/écart de tolérance avant la période hivernale. Une inspection soutenue est maintenue en hiver pour prévenir de tout incident.

Le principal défaut du 3^e rail identifié est sa réaction aux variations de températures.

Une inspection fréquente doit être effectuée afin de contrôler les mouvements du 3^e rail relatifs à sa dilatation pour garantir un bon plan de contact et l'intégrité des connexions.

2.5.3.4 Vitesse d'exploitation

La vitesse d'exploitation est de 80 km/h.

En conclusion de ce chapitre, le retour d'expérience collecté sur le métro de Moscou n'apporte aucune garantie quant à la fiabilité et la disponibilité du système 3^e rail au regard des conditions climatiques de Montréal.

Par ailleurs, les niveaux d'enneigement à Moscou sont deux fois inférieurs à ceux de Montréal et les contraintes d'évacuation de la neige sont minimalistes sur les sections viaduc qui traversent des zones non urbanisées.

2.5.4 Retour d'expérience du métro d'Helsinki

Le métro d'Helsinki est constitué de deux lignes actuellement, les M1 et M2, couvrant un tracé d'une longueur totale de 35 km incluant 25 stations avec un parcours de 20,5 km en tunnel et le reste du parcours en surface.



Figure 2-21 : Métro de Helsinki sur une portion en surface

L'alimentation des trains est en 750 V cc par 3^e rail.

Le type de 3^e rail est équivalent à celui envisagé pour le REM de l'Est, c'est-à-dire un 3^e rail avec contact inférieur et capot supérieur isolant.

Même si la vitesse des trains peut atteindre 90 km/h, voire 100 km/h (trains M100), la vitesse maximale autorisée est de 80 km/h, limitée à 70 km/h dans le tunnel du centre-ville.

Sur la section en surface, le 3^e rail est équipé d'un câble chauffant afin de prévenir la formation de gel et l'accumulation de neige sur celui-ci.

Pendant les heures d'exploitation, la fréquence des trains combiné avec la neige et la glace ne sont jamais un problème pour la conservation de la disponibilité du 3^e rail.

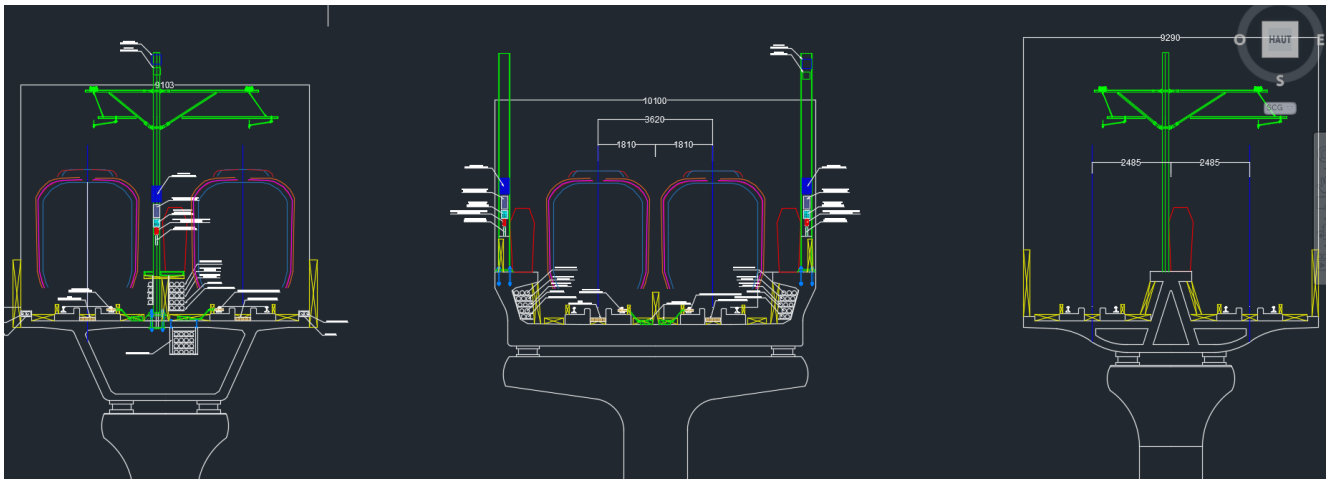
Parfois, un train circule à vide pendant la nuit pour garder la voie dégagée. En cas de fortes chutes de neige, des véhicules de déneigement sont déployés. Ces derniers soufflent également la neige du 3^e rail, technique envisageable du fait que le tracé est en surface et non aérien.

En conclusion de ce chapitre, le retour d'expérience sur le métro d'Helsinki apporte à son tour aucune garantie quant à la fiabilité et la disponibilité du système 3^e rail concernant les exigences climatiques de Montréal. Les enneigements sur Helsinki sont de 0,3 à 0,5 inférieurs à ceux de Montréal et les contraintes d'évacuation de la neige étant minimalistes car le tracé étant en site propre au sol.

2.5.5 Caractéristiques du projet REM de l'Est

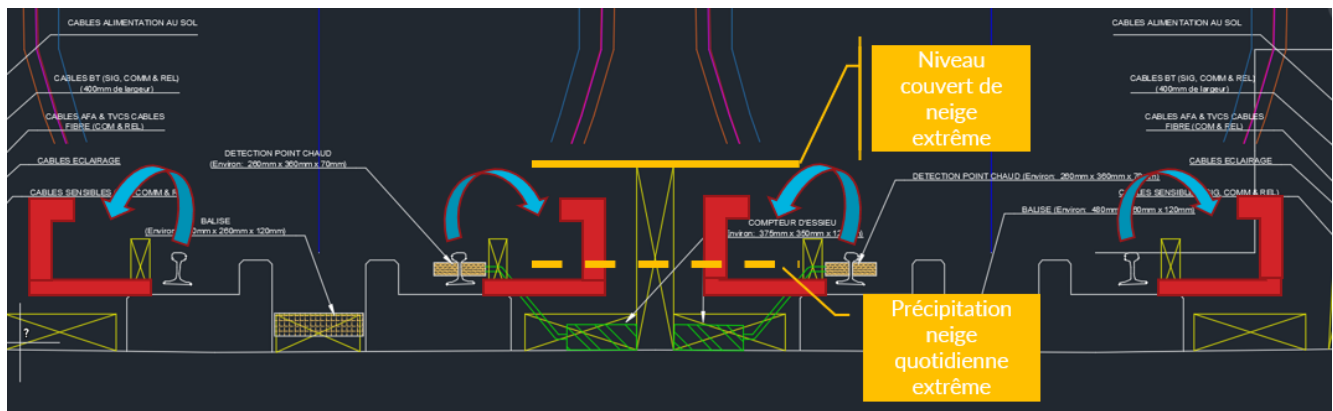
Le projet REM de l'Est est une ligne de métro de 32 km dont 8 km seront en tunnel et 24 km en viaduc.

Les zones traversées par la portion aérienne du tracé se situent en zone urbanisée (de très dense à dense) exigeant la mise en œuvre de protections antibruit sous forme de parois latérales fixées au tablier du viaduc.



Les problématiques de déneigement ne sont donc pas comparables à celles des modèles de Moscou et de Helsinki tant au niveau de l'enneigement que de la configuration du tracé en viaduc.

Le schéma présenté ci-dessous met en évidence le phénomène conjugué décrit auparavant où figurent en rouge les implantations possibles du 3^e rail et en jaune les niveaux de précipitation de neige quotidienne ainsi que le couvert de neige extrêmes sur la base des exigences définies sur le projet REM de l'Est et rappelées au paragraphe 2.5.1 du présent document.



Aux phénomènes exposés précédemment vient s'ajouter l'accumulation de neige liée au passage des trains tel qu'illustré au schéma ci-dessous.

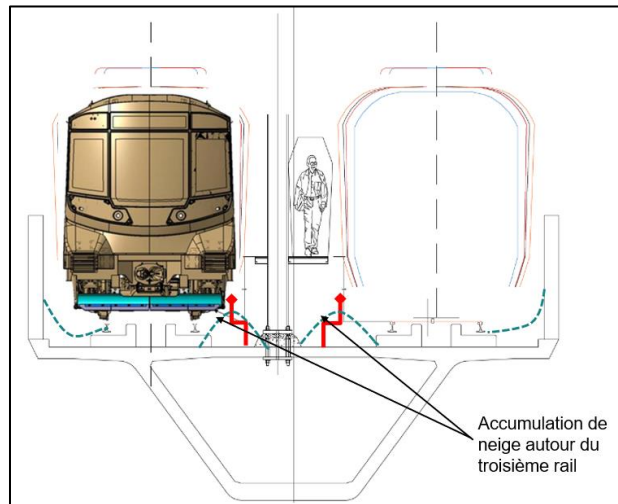


Figure 2-22 : Accumulation de neige liée au passage des trains - REM de l'Est

La problématique de l'enneigement et/ou de la formation de gel/givre sur le 3^e rail est un problème inhérent aux systèmes de transport réalisés dans des villes exposées à des températures négatives associées à des chutes de neige.

Pour ce faire, deux solutions peuvent être mise en œuvre :

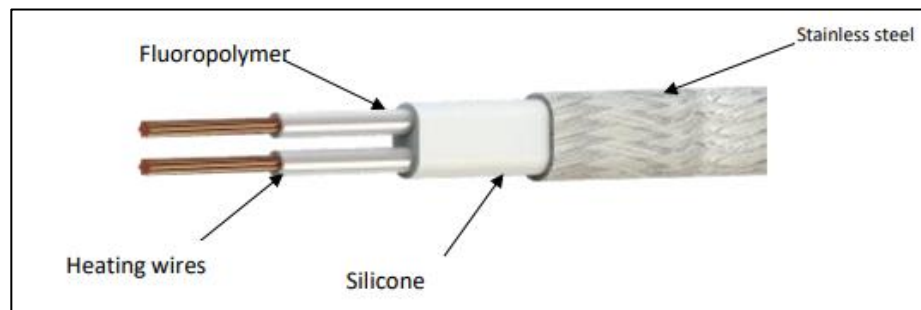
- la protection par capot supérieur ;
- la mise en place de câbles chauffants le long de l'âme du 3^e rail.

Sur la base des échanges avec le fournisseur FLEXELEC qui propose des systèmes de chauffage de structure par câbles et qui fournit un grand nombre de systèmes de transport à travers le monde, les deux préconisations citées ci-dessus sont tout à fait applicables à Montréal et garantiraient l'accumulation de neige et de givre/gel sur le 3^e rail.

Néanmoins, cette solution devrait être associée à des dispositions qui garantissent l'écoulement de la glace ou de la neige fondue jusqu'à une canalisation située hors zone de gel.



Fixation du câble chauffant



Nature du câble chauffant

Figure 2-23 : Solutions pouvant être mises en œuvre – REM de l'Est

Concernant l'accumulation de neige sous le 3^e rail, il n'a pas de référence comparable au contexte du REM de l'Est (typologie viaduc et conditions hivernales). La seule solution consisterait à faire fondre la neige et garantir l'écoulement de la neige fondue jusqu'au circuit d'évacuation des eaux pluviales situé en zone hors gel.

Cela se traduirait par la mise en place d'un réseau de chauffage sous dalle intégré à la structure du viaduc et dimensionné pour garantir la fonte des neiges aux conditions extrêmes en termes de précipitations et de couverts de neige.

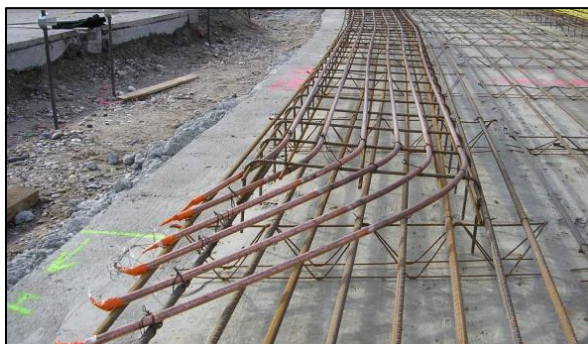


Figure 2-24 : Exemple de réseau de chauffage sous dalle

Un tel réseau aurait pour conséquence un surdimensionnement du tablier du viaduc afin de pouvoir intégrer une telle installation et supporter le poids associé, incluant le système d'écoulement sur la surface de la dalle.

De plus, cela engendrait une activité supplémentaire en termes de maintenance et, en cas de défaillance, aurait pour conséquence la coupure d'exploitation et la destruction de la dalle de voie afin d'être en mesure de supprimer le(s) défaut(s).

Enfin, sur la base des exigences climatiques du projet, il a été estimé de façon préliminaire que le besoin de dégagement calorifique nécessaire pour le déneigement de la dalle serait de 240 W/m, estimation calculée par le fournisseur FLEXELEX dont les détails pourront être communiqués à la demande.

Ainsi, si l'on considère la longueur de la portion viaduc du tracé à 24 km, un tel réseau nécessiterait une puissance appelée de 5 760 kW (hors chauffage 3^e rail) qui, ramenée au bilan de puissance établi par la co-entreprise, égalerait la totalité des besoins énergétiques (traction + MEP + systèmes) d'une demi-branche du REM de l'Est comme l'antenne Pointe-aux-Trembles.

Cette puissance, certainement sous-dimensionnée au vu des intrants très préliminaires, viendrait surcharger le poste de livraison PS01 Hydro-Québec ce qui forcerait ce dernier à envisager un renforcement de son réseau sur le secteur Pointe-aux-Trembles.

Ce projet constituerait un prototype avec les aléas et imprévus associés qui au vu des arguments identifiés ci-dessus impacteront négativement les objectifs qualité, coût et délai du projet REM de l'Est.

2.5.6 Synthèse

La particularité du climat de Montréal quant au niveau d'enneigement associée au parcours aérien sur un linéaire de 24 km font du REM de l'Est un projet précurseur privé de tout retour d'expérience sur système de transport avec des conditions d'exploitation équivalentes.

Pour garantir la disponibilité du 3^e rail quelque soient les conditions climatiques connues pour Montréal, une solution de réseau de chauffage serait nécessaire mais l'impact énergétique serait tel que la puissance appelée, en faisant la somme des besoins en chauffage du 3^e rail et du circuit d'évacuation pluviale, avoisinerait la puissance appelée par une branche du réseau REM de l'Est pour son exploitation.

Il serait nécessaire de poursuivre les études pour identifier les contraintes et impacts que cette solution génèrerait sur les infrastructures civiles du REM de l'Est.

Comme pour toute mise en œuvre de prototype, le projet REM de l'Est pourrait devoir faire face à des imprévus en phase d'installation, de mise ne service et en exploitation, le risque majeur étant la mise en arrêt de l'exploitation jusqu'à la résolution du/des défauts sur le réseau de chauffage sous dalle.

REM de l'Est

Phase de
développement

3

Conclusion

COENTREPRISE
AECOM | SYSTRA

3. CONCLUSION

En conclusion de l'analyse multicritères objet de ce rapport, dont l'objectif premier est de définir la solution de captage qui garantit les critères de fiabilité/disponibilité/maintenabilité/sécurité du système de transport, tout en offrant une intégration urbaine optimale, la co entreprise confirme sa recommandation d'un système de captage de l'énergie de traction par caténaire pour le REM de l'Est.

Les principales raisons de cette recommandation, qui répondent aux critères considérés dans ce rapport, sont les suivantes :

- la combinaison précipitations neige et contraintes déneigement :
 - le niveau élevé des précipitations de neige couramment constatées depuis 20 ans à Montréal, conjugué aux contraintes de déneigement rencontrées en viaduc dans un milieu hautement urbanisé, constituent un risque majeur de mise en défaut du système de captage par 3^e rail du fait de son positionnement proche de la plateforme et de l'absence de références des fournisseurs sur des solutions de déneigement ;
- l'absence de retour d'expérience sur des systèmes de transport en exploitation soumis à des conditions climatiques équivalentes :
 - aucun système de transport avec 3^e rail n'est exploité dans des conditions hivernales (enneigement + températures minimales) équivalentes à celles de Montréal ;
 - cette situation ferait du REM de l'Est un cas unique et un prototype avec tous les aléas et risques associés ;
 - en revanche, des systèmes globalement équivalents avec solution caténaire existent au Canada via les projets comme le REM de l'Ouest et l'Ontario Line. Il est à noter par ailleurs que la ligne Deux-Montagnes constitue une référence caténaire à Montréal malgré son démantèlement ;
- les contraintes en cas de maintenance sur la voie :
 - en plus de ces contraintes intrinsèques (consignation du 3^e rail pour intervention du personnel de maintenance à proximité et dépose du 3^e rail en cas de travaux de reprise de la voie ferrée), le 3^e rail mis en œuvre dans le cadre du projet REM de l'Est compliquerait les opérations de déneigement de la plateforme, lesquelles l'exposeraient à un enneigement encore plus important ainsi qu'au givre étant données les difficultés, pour les véhicules de déneigement, à accéder sous le 3^e rail ;
 - si la caténaire est également fortement exposée au givre, des techniques éprouvées de lutte contre ce phénomène existent (par retour d'expérience d'exploitants ferroviaires et de fournisseurs) et un contrôle visuel est accessible en tout point facilitant les détections de zones à risques ou de zones à traiter. Concernant la problématique d'enneigement évoquée pour le 3^e rail, du fait de son positionnement, la caténaire est épargnée.

Enfin, en référence au rapport technique initial (réf. : 03-AECSYS-RAP_DEV_BIL_GE00_T06_0093-00), nous rappelons les avantages majeurs de cette solution :

- la réduction des risques associés à l'introduction du 3^e rail en aérien pour la première fois dans l'environnement de Montréal ;

- l'optimisation des besoins fonciers pour l'implantation des sous-stations de traction en milieu urbain dense ;
- l'optimisation des coûts d'investissement et de maintenance du fait de la réduction du nombre de sous-stations ;
- l'optimisation de la maintenabilité du système d'alimentation de traction dans les conditions climatiques hivernales de Montréal ;
- la garantie de la meilleure qualité de service en termes d'exploitation durant les conditions extrêmes de la période hivernale.

