



## Étude de faisabilité technique du tramway de Québec et de Lévis



Dossier P-12-600-04

Consortium Tramway Québec-Lévis



et ses partenaires



Intitulé du document

**LIVRABLE 1.3 – MODE D’ALIMENTATION DU SYSTÈME**

**RAPPORT D’ÉTAPE**

Numéro du document	Révision
610879-0300-40ER-0001	01

**PRINCIPAUX COLLABORATEURS AU RAPPORT :**

**Pascal CHOVIN**  
**Gabriel THELISSON**  
**Michel MEZDAD**  
**GENDREAU André**

**VÉRIFIÉ PAR : Pascal CHOVIN, Eric DESSEAUX**

---

**APPROUVÉ PAR : André Gendreau**

---

<b>NUMÉRO DU DOCUMENT :</b>		<b>610879-0300-40ER-0001</b>
<b>REV.</b>	<b>DATE</b>	<b>TYPE DE RELÂCHE</b>
PA	27/08/2013	Émission préliminaire interne
PB	03/09/2013	Émission préliminaire au RTC
00	23/09/2013	Émission intégrant les commentaires du RTC
01	14/11/2013	Émission intégrant les commentaires du RTC suite au Comité de Projet

## TABLE DES MATIÈRES

<b>GLOSSAIRE ET DÉFINITIONS .....</b>	<b>5</b>
<b>1 INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE .....</b>	<b>6</b>
1.1 MISE EN CONTEXTE .....	6
1.1.1 Plan de mobilité durable .....	6
1.1.2 Projet de tramway à Québec et Lévis.....	6
1.1.3 Particularité des analyses sur le territoire de la Ville de Lévis .....	7
1.1.4 Organisation du projet.....	7
1.1.5 Échéancier .....	8
1.2 SITUATION DANS LE PROJET .....	9
1.2.1 Le mandat de services professionnels confié au consortium .....	9
1.2.2 Portée et objectifs de l'étude de faisabilité .....	9
1.2.3 Objectifs du lot 1 – mandat 1 .....	9
1.2.4 Les livrables du lot 1 – mandat 1 .....	10
1.3 PRÉSENTATION DU LIVRABLE 1.3 : MODE D'ALIMENTATION DU SYSTÈME.....	14
1.3.1 Objectifs de l'étude de faisabilité de l'alimentation électrique .....	14
1.3.2 Contenu .....	14
<b>2 PRINCIPES .....</b>	<b>16</b>
2.1 LES HYPOTHÈSES DE BASE DE L'ÉTUDE .....	16
2.1.1 Exploitation et objectifs de performance du tramway .....	16
2.1.2 Caractéristiques physiques du matériel roulant.....	16
2.1.3 Alimentation en énergie électrique .....	16
2.1.4 Autres hypothèses .....	16
2.2 RÉFÉRENTIEL TECHNIQUE PRINCIPAL .....	16
2.3 ENVIRONNEMENT CLIMATIQUE .....	16
2.4 IDENTIFICATION DES INSTALLATIONS ÉLECTRIQUE DU SYSTÈME TRAMWAY .....	16
<b>3 VARIANTES AU PROJET DE RÉFÉRENCE .....</b>	<b>17</b>
3.1 TENSION D'ALIMENTATION TRACTION .....	17
3.1.1 Les tensions en courants alternatifs .....	17
3.1.2 Les tensions en courant continu .....	17
3.1.3 1 <sup>er</sup> niveau de tri pour le choix de la tension d'alimentation traction .....	17
3.1.4 2 <sup>e</sup> niveau de tri pour le choix de la tension d'alimentation traction.....	17
3.1.5 Conclusion et recommandation pour la tension d'alimentation traction .....	18
3.2 SOLUTIONS DE CAPTATION .....	18
3.2.1 Ligne aérienne de contact (LAC) .....	18
3.2.2 Alimentation par le sol (APS).....	18
3.2.3 APS avec contact (système breveté par Alstom) .....	18
3.2.4 APS sans contact (système breveté par Bombardier).....	18
3.2.5 WIPOST de LOHR.....	18
3.2.6 Conclusion et recommandation pour la captation .....	20
3.3 ENERGIE EMBARQUÉS .....	21
3.4 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS POUR LE SYSTÈME D'ALIMENTATION .....	22

<b>4 ÉTUDES TECHNIQUES DU PROJET DE BASE .....</b>	<b>22</b>
4.1 LIGNE AÉRIENNE DE CONTACT .....	22
4.2 PREDIMENSIONNEMENT TRACTION .....	25
4.3 LOCAUX SOUS-STATIONS DE TRACTION.....	27
4.4 RÉCUPÉRATION DE L'ÉNERGIE DE FREINAGE .....	27
4.5 CENTRE DE COMMANDE ÉNERGIE .....	29
4.6 MISE À LA TERRE ET TRAITEMENT DES PERTURBATIONS HARMONIQUES ET DES COURANTS VAGABONDS	29
4.6.1 Mise à la terre.....	29
4.6.2 Traitement des perturbations harmoniques .....	29
4.6.3 Traitement des courants vagabonds.....	30
4.7 EXPLOITATION ET ENTRETIEN DES ÉQUIPEMENTS ÉNERGIE ET LIGNES AÉRIENNES DE CONTACT .....	31
<b>5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>33</b>

### LISTE DES FIGURES :

Figure 1 : Tracé proposé du tramway .....	6
Figure 2 : Structure de gouvernance de l'étude .....	7
Figure 3 : Les 5 mandats.....	9
Figure 4 : Proposition d'exploitation de 6 lignes de tramway – RTC (août 2012) .....	10
Figure 5 : LAC avec poteau axial .....	18
Figure 6 : APS Alstom – Schéma du rail d'alimentation segmenté .....	18
Figure 7 : APS Bombardier - Principe général du système PRIMOVE .....	18
Figure 8 : Principe général du WIPOST2 .....	19
Figure 9 : Énergie par interstation tracé Nord-Sud.....	21
Figure 10 : Énergie par interstation tracé Ouest-Est.....	21
Figure 11 : Exemple poteaux latéraux avec suspension sous transversal (Tramway de Dijon) .....	22
Figure 12 : Exemple ancrages en façade latéraux avec suspension sous transversal (Tramway de Valenciennes) .....	22
Figure 13 : à gauche, photo d'un ancrage en façade avec tige scellée – (Tramway de Strasbourg), à droite photo d'un ancrage avec plaque de répartition (Tramway de Montpellier) .....	22
Figure 14 : Exemple poteau latéral avec consoles couvrants les 2 voies tramway (Tramway de Dijon) ....	23
Figure 15 : Exemple poteau axial avec 2 consoles couvrant chacune 1 voie tramway (Tramway de Valenciennes) .....	23
Figure 16 : Exemple d'accrochage sous ouvrage avec bras de rappel compensé (Tramway d'Orléans)...	23
Figure 17 : Exemple de positionnement des poteaux LAC aux intersections .....	24
Figure 18 : Exemple LAC unifilaire.....	25
Figure 19 : Coupe d'un profil aérien de contact (PAC).....	25

Figure 20 : Exemple d'une caténaire légère (Tramway rapide de desserte de l'aéroport de Lyon Saint Exupery) .....	25
Figure 21 : Mode nominal – Rames de 43 m – Courants (en A) débités par les sous-stations en heure de pointe .....	25
Figure 22 : Mode nominal – Rames de 43 m – Gain par sous-stations avec la réinjection MR .....	26
Figure 23 : Rames de 43 m – Tableau de synthèse des préconisations sous-stations .....	26
Figure 24 : Synoptique architecture Commande Centralisée des installations électriques du tramway .....	29
Figure 25 : Schéma général du réseau de terre .....	29
Figure 26 : Phénomène des courants vagabonds .....	30
Figure 27 : Photo d'un camion rail/route avec nacelle de grandes dimensions .....	32

**LISTE DES TABLEAUX :**

Tableau 1 : Tableau de synthèse domaine d'application des tensions .....	17
Tableau 2 : Évaluation des différentes solutions de captation suivant trois niveaux .....	20

## GLOSSAIRE ET DÉFINITIONS

### GLOSSAIRE

Abréviations	Définitions
APS	Alimentation par le sol
BHNS	Bus à haut niveau de service
BT	Basse Tension
CEE	Centre d'exploitation et d'entretien
CV	Courants vagabonds
GLO	Gabarit Limite d'Obstacle
GTC	Gestion Technique Centralisée
HQ	Hydro-Québec
LAC	Ligne aérienne de contact
LATE	Ligne aérienne de traction électrique Même signification pour les 2 abréviations
MALT	Mise à la terre
MT	Moyenne Tension
PAC	Profil aérien de contact (type particulier de ligne aérienne de contact)
PCC	Poste de Commande Centralisé tramway
P+R	Parc Relais
PL	Poids lourd
RTC	Réseau de transport de la Capitale
SST	Sous-station de traction tramway
SAEIV	Système d'Aide à l'Exploitation et à l'Information Voyageurs
STLévis	Société de transport de Lévis
TC	Transport collectif
TGV	Train à Grande Vitesse
VP	Véhicule particulier

### DÉFINITIONS

Centre d'échange :	Point de convergence et d'échange des usagers du tramway avec le réseau d'autobus ou avec tout autre mode de transport; le centre d'échange peut être un terminus d'autobus, un stationnement incitatif pour automobiles, un stationnement pour un système d'auto-partage, un stationnement pour vélo ou un regroupement total ou partiel de toutes ces fonctions.
Ligne de tramway :	Axe opérationnel (défini avec un horaire d'opération) utilisant une partie, un ou plusieurs tracé(s) (infrastructures) spécifiquement aménagé(s) pour le tramway
Corridor :	Délimitation géographique d'une largeur totale de 1 km environ et dont les extrémités sont fixées.
Site propre :	Les voies du tramway sont exclusivement utilisées par le tramway (et les véhicules d'entretien du système tramway).
Site mixte :	Une des deux (2) voies du tramway est utilisée par les véhicules particuliers (voitures particulières, poids lourds, bus, etc.).
Site banal :	Les deux (2) voies du tramway sont utilisées par les véhicules particuliers.
Section électrique :	Portion de ligne située entre 2 sous-stations de traction
Sous-station :	Local ou bâtiment regroupant les équipements électrique d'acquisition MT, production / distribution traction, commande/contrôle, basse tension
Station :	Point d'embarquement ou de débarquement des usagers du tramway le long du tracé.
Tracé :	Infrastructures spécifiques et nécessaires pour l'opération du tramway.

## 1 INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE

### 1.1 MISE EN CONTEXTE

#### 1.1.1 Plan de mobilité durable

En janvier 2009, le maire de Québec a mis sur pied le groupe de travail sur la mobilité durable. Au terme de 18 mois de réflexions, d'échanges et d'analyses, le groupe de travail a rendu publiques, en juin 2010, les propositions du Plan de mobilité durable. Ces propositions ont été soumises à une large consultation de la population au cours des mois de septembre et d'octobre 2010. Le 9 novembre 2011, le maire de Québec rendait public le rapport final du Plan de mobilité durable de la Ville de Québec en présence de M. Sam Hamad, Ministre responsable de la région de la Capitale Nationale et de M. Pierre Moreau, Ministre des Transports du Québec.

Le Plan de mobilité durable définit sur un horizon de 20 ans une vision intégrée du développement, de l'aménagement et du transport pour la ville de Québec. La finalité du plan est de contribuer à faire de Québec une région attrayante, prospère et durable qui s'illustre notamment par une forte intégration de l'aménagement du territoire et des transports et dont la population privilégie les modes de déplacement actifs et collectifs. Le plan repose sur six (6) grandes orientations :

- contenir la croissance à l'intérieur du périmètre urbanisé des villes de Québec et de Lévis;
- privilégier une plus grande mixité des fonctions dans les pôles urbains et le long des principales artères;
- structurer, consolider et développer le territoire urbain par le transport public;
- assurer l'accessibilité aux lieux d'emplois, d'études, d'affaires et de loisirs par des modes autres que l'automobile;
- favoriser une utilisation efficace de chacun des modes de transport des marchandises;
- mettre à contribution les institutions et les entreprises qui génèrent beaucoup de déplacements.

Dans le domaine du transport, ces orientations sont liées à des cibles ambitieuses de transfert modal pour 2030. L'objectif est de doubler la part modale du transport en commun à Québec et à Lévis. Pour l'agglomération de Québec, la cible est de 20 % de part modale pour le transport en commun en 2030 sur 24 heures et de 26 % en période de pointe.

Cette vision est conforme à la vision du Plan métropolitain d'aménagement et de développement du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec adopté par la Communauté métropolitaine de Québec le 15 décembre 2011 et en attente de l'avis gouvernemental.

#### 1.1.2 Projet de tramway à Québec et Lévis

Pour structurer, consolider et développer le territoire urbain par le transport public et pour atteindre l'objectif de doubler la part modale du transport collectif au cours des 20 prochaines années, le Plan de mobilité durable propose la mise en place de deux (2) lignes de tramway soit une ligne Est-Ouest de 22,3 km et une ligne nord-sud de 6,6 km. Le Plan de mobilité durable évalue de façon sommaire le coût de mise en place de l'ensemble de ce réseau de tramway à environ 1,5 milliard \$ excluant le prolongement dont il est question ci-après.

La figure qui suit illustre le tracé proposé du tramway.



Figure 1 : Tracé proposé du tramway

Il est à noter qu'à ce tracé de 28,9 km, il est aussi envisagé un projet d'extension de 7,7 km sur la Rive-Sud entre la 4<sup>e</sup> Avenue et le boulevard Alphonse-Desjardins. Le coût du projet serait de 2,0 milliards \$ avec cette extension. L'étude de faisabilité porte sur l'ensemble du tracé, soit quelque 36,6 km.

Le réseau de tramway proposé par le Plan de mobilité durable sera l'élément structurant du réseau de transport collectif, avec le quartier Saint-Roch comme plaque tournante.

La ligne Nord-Sud reliera la 41<sup>e</sup> Rue au Grand Théâtre sur la colline parlementaire. Le corridor préliminaire emprunte la 1<sup>re</sup> Avenue, l'avenue Eugène-Lamontagne, la rue de la Pointe-aux-Lièvres, la rue Dorchester, la Côte d'Abraham, l'avenue Honoré-Mercier, la place d'Youville et le boulevard René-Lévesque pour desservir en partant du Nord vers le Sud :

- le quartier Lairet;
- le secteur d'ExpoCité, incluant le futur amphithéâtre;
- le futur écoquartier de la Pointe-aux-Lièvres;

- le quartier Saint-Roch;
- la colline Parlementaire.

Le prolongement vers l'est rejoindrait le pôle de D'Estimauville. Le corridor préliminaire emprunte le boulevard Charest, la rue Jean-Lesage, le boulevard des Capucins, le chemin de la Canardière et le boulevard Sainte-Anne pour desservir d'ouest en est :

- le quartier Saint-Roch;
- le secteur Saint-Dominique;
- le Cégep de Limoilou;
- le secteur Maizerets du quartier Limoilou;
- le pôle et l'Écoquartier de D'Estimauville.

Le prolongement vers l'ouest rejoindrait Lévis. Le corridor préliminaire emprunte le boulevard Charest, la rue Nérée-Tremblay, le campus de l'Université Laval, le boulevard Laurier, le pont de Québec et le boulevard de la Rive-Sud pour desservir :

- le quartier Saint-Roch;
- le quartier Saint-Sauveur;
- le boulevard Charest;
- le Cégep de Sainte-Foy;
- l'Université Laval;
- le secteur Laurier dans Sainte-Foy;
- le secteur de l'ex-ville de Saint-Romuald à Lévis.

En plus de desservir les pôles générateurs de déplacements les plus importants (quartiers denses, services, commerces, emplois, éducation, tourisme, etc.), ces deux lignes vont permettre à de nombreux projets structurants de se développer dans un contexte d'accessibilité favorable au transport collectif, notamment :

- le site d'ExpoCité;
- le futur amphithéâtre;
- l'Écoquartier de la Pointe-aux-Lièvres;
- le pôle Saint-Dominique;
- la future gare TGV;
- l'écoquartier et le parc technologique D'Estimauville;
- le pôle Marie-de-l'Incarnation;
- le nouveau boulevard urbain et le développement immobilier et des activités (parcs industriels, parc technologique) de l'axe Charest;
- le secteur de l'Université Laval et du Cégep Sainte-Foy;
- le secteur de la tête des ponts à Lévis;
- les plans particuliers d'urbanisme (PPU) de Saint-Roch et Sainte-Foy.

### 1.1.3 Particularité des analyses sur le territoire de la Ville de Lévis

La Société de transport de Lévis (STLévis) en collaboration avec la Ville de Lévis prévoit réaliser, entre 2013 et 2019 environ, le réaménagement du boulevard de la Rive-Sud depuis le pont de Québec jusqu'à la route Monseigneur-Bourget, dans le but notamment d'y insérer des voies en site exclusif pour un service de bus à haut niveau de service (BHNS). Ce projet est prévu en différentes

phases de planification et de réalisation. La première phase de planification est en cours soit une étude d'avant-projet pour la partie comprise entre les rues Alphonse-Desjardins et Saint-Omer. Le reste du corridor, soit de la rue Alphonse-Desjardins au chemin du Sault, fera l'objet d'une étude de faisabilité et d'avant-projet préliminaire qui doivent débiter à l'été 2012 et se terminer à l'automne 2013. Dans le cadre de ces études d'avant-projet, la STLévis demandera à ses consultants de planifier ces voies en site exclusif de telle façon qu'elles puissent éventuellement recevoir un tramway.

Sur le territoire de la Ville de Lévis, le projet de tramway emprunte le boulevard de la Rive-Sud du pont de Québec au boulevard Alphonse-Desjardins. Sur le boulevard de la Rive-sud, l'étude de faisabilité doit faire l'insertion du tramway et en analyser les impacts par rapport à la situation actuelle.

Pour tenir compte du projet de BHNS de la Ville de Lévis, le lot 1 – mandat 1 comprend un livrable spécifique (livrable 1.7) qui demande l'analyse d'une variante qui tient compte du projet de BHNS.

### 1.1.4 Organisation du projet

La figure qui suit illustre la structure de gouvernance de l'étude.

Le côté droit de la figure décrit la structure de maîtrise d'ouvrage de l'étude. La maîtrise d'ouvrage de l'étude relève du conseil d'administration du RTC. La responsabilité administrative est assurée par le directeur de projet qui est le cadre supérieur du RTC de qui relève l'étude. Le gestionnaire de l'étude, qui relève du RTC, est la personne responsable de mener à bien la réalisation de l'étude. Pour ce faire, il supervise le personnel technique nécessaire, gère les mandats des consultants et crée et anime tous les groupes de travail nécessaires à la réalisation de l'étude.

Le côté gauche décrit la structure de coordination entre la Ville de Québec, le maître d'ouvrage et les divers organismes participant à l'étude (Communauté urbaine de Québec, Ville de Lévis, Ministère des transports du Québec, Société de transport de Lévis, Hydro-Québec, etc.). Elle comprend un comité d'orientation, un comité directeur et un comité de projet.

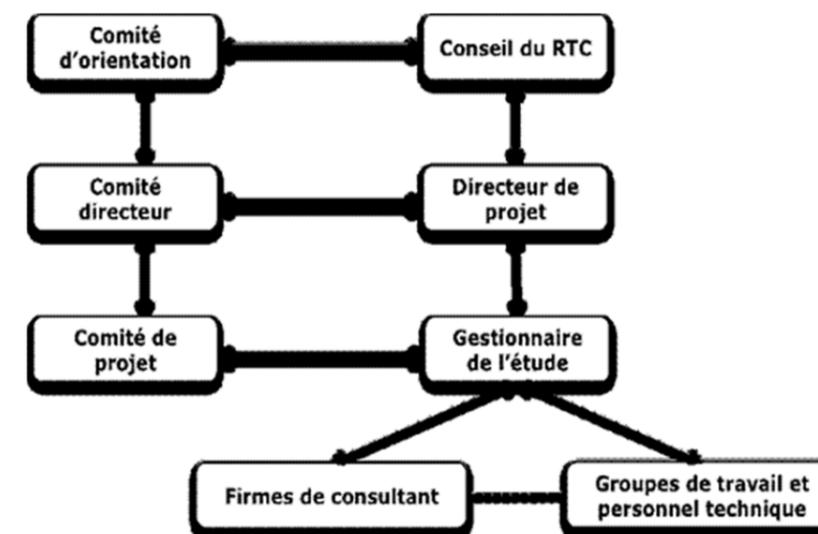


Figure 2 : Structure de gouvernance de l'étude

### Comité d'orientation

Le comité d'orientation a principalement une responsabilité décisionnelle. Il joue entre autres les rôles suivants :

- assurer que l'étude respecte les orientations du Plan de mobilité durable;
- approuver les grandes orientations de l'étude;
- approuver les principaux mandats et les principaux livrables de l'étude.

### Comité directeur

Le comité directeur a principalement une responsabilité administrative. Il joue entre autres les rôles suivants :

- assurer le respect des décisions du comité d'orientation;
- assurer un déroulement harmonieux de la réalisation de l'étude;
- assurer le respect des échéanciers et du budget;
- faire au comité d'orientation les recommandations requises sur les mandats et les livrables.

### Comité de projet

Le comité de projet a principalement une responsabilité technique. Il joue entre autres les rôles suivants :

- supporter le responsable et les soumissionnaires retenus dans la réalisation de l'étude;
- assurer la qualité technique des analyses effectuées;
- faire au comité directeur les recommandations requises sur les mandats et les livrables.

### Groupe de travail

Un groupe de travail est formé, lorsque requis pour accompagner le soumissionnaire retenu dans la réalisation d'une partie spécifique de l'étude de faisabilité.

## 1.1.5 Échéancier

L'échéancier de l'Étude de faisabilité technique du tramway (lot 1 – mandat 1) dépend principalement des dates suivantes :

- remise du livrable 1.1 – version préliminaire du rapport - 4 septembre 2012. Ce rapport a été remis le 7 septembre 2012;
- remise du livrable 1.2 – technologie et insertion – version préliminaire du rapport – 30 juillet 2013;
- remise du livrable 1.3 – mode d'alimentation du système – version préliminaire du rapport – 30 août 2013;
- remise du livrable 1.4 – équipements, exploitation, maintenance et dépôt – version préliminaire du rapport – 20 décembre 2013;
- remise du livrable 1.5 – phasages et échéancier de construction du projet – version préliminaire du rapport – 18 décembre 2013;
- remise du livrable 1.6 – coûts d'immobilisation et d'exploitation – version préliminaire du rapport – 20 décembre 2013;
- remise du livrable 1.7 – impacts de la mise en place d'un BHNS à Lévis – version préliminaire du rapport – 13 décembre 2013
- livrable final – Lot 1 – version préliminaire au plus tard le 24 février 2014.

## 1.2 SITUATION DANS LE PROJET

### 1.2.1 Le mandat de services professionnels confié au consortium

Le mandat de services professionnels confié au Consortium Roche, SNC-Lavalin et Egis Rail dans le cadre de l'étude de faisabilité du tramway de Québec et de Lévis fait partie d'un ensemble d'études coupées en cinq (5) mandats.

La figure ci-après présente ces 5 mandats.

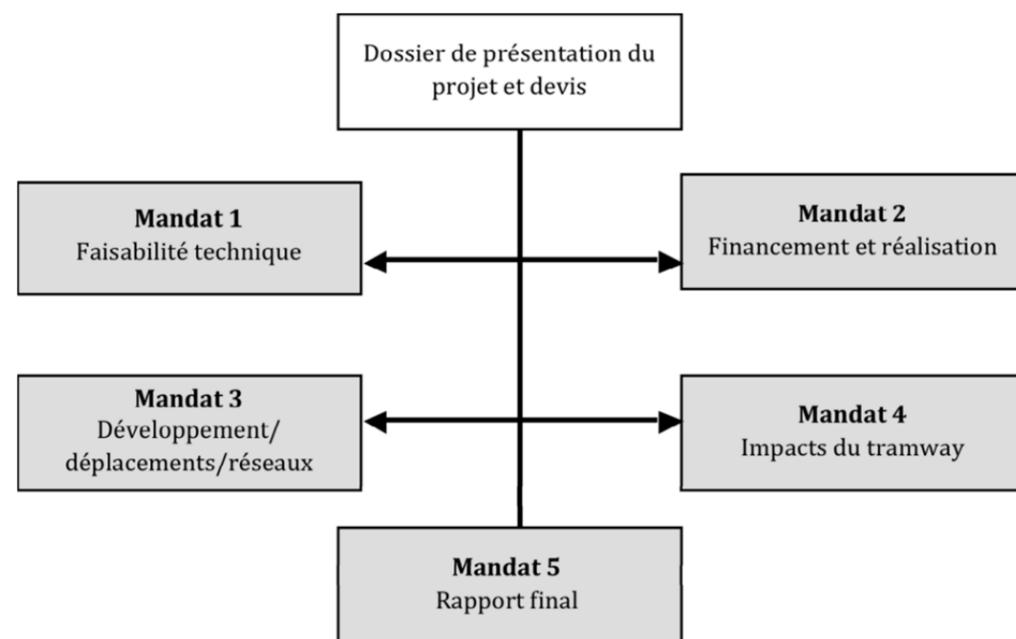


Figure 3 : Les 5 mandats

Le Réseau de transport de la Capitale (RTC) a regroupé ces mandats en trois (3) lots :

- le lot 1 comprend le mandat 1 (faisabilité technique);
- le lot 2 comprend le mandat 2 (modes de financement et de réalisation);
- le lot 3 comprend les mandats 3, 4 et 5 (développement/déplacements/réseaux, impacts du tramway et rapport final).

Le lot 1- mandat 1 : Étude de faisabilité technique du tramway a été confié par le RTC au Consortium tramway Québec-Lévis composé des firmes Roche, SNC-Lavalin et Egis Rail.

Le lot 1 – mandat 1 est constitué de 8 livrables. Le présent rapport est le deuxième de ces livrables, soit : Technologie et insertion.

### 1.2.2 Portée et objectifs de l'étude de faisabilité

L'étude de faisabilité du projet de tramway ne porte pas sur un éventuel choix de corridors, ceux-ci ayant été définis dans le cadre du Plan de mobilité durable. Elle porte sur la faisabilité et les impacts de la mise en place d'un tramway dans ces corridors.

Les objectifs de l'étude sont de :

- préciser le projet de tramway, en évaluer les coûts et les impacts, les avantages et les inconvénients;
- viser à établir un consensus des organismes concernés sur les caractéristiques du projet;
- permettre, par le dépôt de l'étude, une décision sur la poursuite de la démarche de mise en place d'un tramway à Québec et Lévis;
- assurer que l'étude de faisabilité puisse aussi servir de dossier de présentation stratégique tel que prévu dans la politique-cadre sur la gouvernance des grands projets d'infrastructure publique du gouvernement du Québec.

### 1.2.3 Objectifs du lot 1 – mandat 1

Les principaux objectifs du mandat 1 sont les suivants :

- définir le projet de référence, les variantes et les enjeux du tramway;
- définir l'insertion urbaine et les principes d'aménagement du projet de tramway;
- définir les différentes composantes de l'infrastructure (plateforme voie ferrée, voirie, drainage, réseaux souterrains, ouvrages d'art, etc.);
- définir les divers systèmes requis au fonctionnement du tramway;
- définir le mode de propulsion et l'alimentation en énergie;
- définir les principes fonctionnels et concevoir les stations et les centres d'échange;
- identifier la localisation du centre d'exploitation et d'entretien du tramway (CEE) et définir ses principales caractéristiques techniques;
- définir les caractéristiques techniques du matériel roulant;
- définir l'exploitation du système;
- définir les principes de fonctionnement des carrefours empruntés par le tramway;
- dresser l'échéancier de réalisation du tramway, avec stratégie de phasage le cas échéant.

Le Consortium doit estimer les coûts de réalisation du tramway avec une précision de  $\pm 30\%$ .

Il est à noter que les termes de référence du dossier prévoyaient l'étude de deux (2) tracés pour une opération organisée que sur la base de deux lignes, une ligne Est-Ouest et une ligne Nord-Sud. Les hypothèses présentées récemment par la RTC orienteraient vers deux tracés (Nord-Sud et Est-Ouest), mais exploités sous forme de quatre lignes ou six qui seraient :

1. Ligne Est-Ouest;
2. Ligne Nord-Sud;
3. Ligne Est-Sud;
4. Ligne Nord-Ouest;
5. Ligne Ouest-Sud;
6. Ligne Nord-Est.

Toutefois, compte tenu des impacts engendrés par le désir de garder ouvertes toutes ces possibilités d'exploitation tant sur l'aménagement physique (espace requis pour l'insertion des aiguillages), impact visuel (toile d'araignée pour la LAC), et moins bonne fréquence et lisibilité pour les usagers (une (1) rame sur deux(2) ou sur trois (3) va à la destination de l'utilisateur), le RTC va procéder à une analyse plus fine des origines et destinations des usagers et préciser les lignes qu'il souhaite exploiter.

Elles sont illustrées schématiquement ci-dessous.

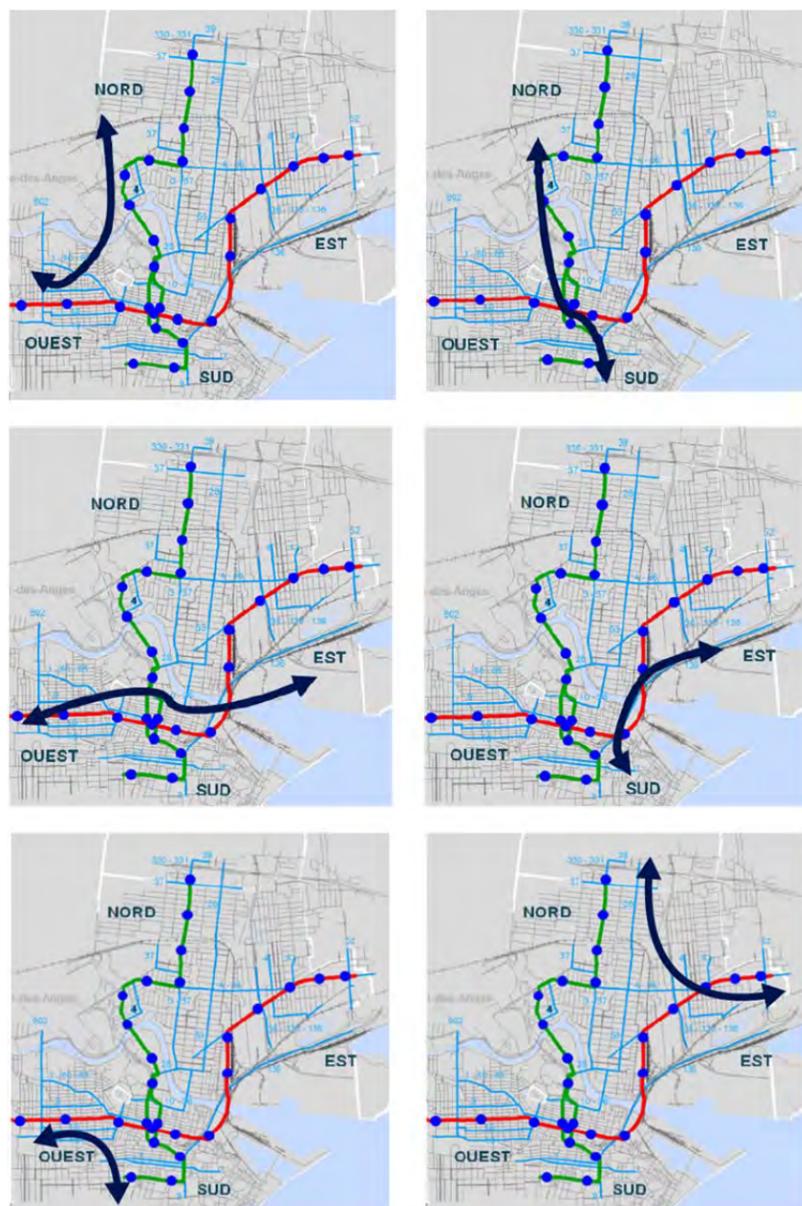


Figure 4 : Proposition d'exploitation de 6 lignes de tramway – RTC (août 2012)

### 1.2.4 Les livrables du lot 1 – mandat 1

Le lot 1 – mandat 1 est composé de 8 livrables : soit :

#### Livrable 1.1 : Projet de référence, variantes et enjeux du tramway

Ce premier livrable a trois objectifs. Le premier est de bien identifier le projet de référence de l'étude en termes de matériel roulant, de tracé, d'alimentation électrique et de localisation du CEE. Le

deuxième est d'identifier de façon préliminaire les problématiques d'insertion d'un tramway le long du tracé de référence. Le troisième est d'identifier les variantes possibles par rapport au projet de référence qui doivent être considérées et étudiées dans la poursuite de l'étude.

Il est aussi requis dans ce livrable d'identifier les études et projets majeurs en cours qui ont un impact sur le projet de tramway, notamment les études et projets concernant le pont de Québec et les études et projet concernant la mise en place sur voies en site exclusif d'un système de bus à haut niveau de service (BHNS) sur le boulevard de la Rive-Sud à Lévis.

#### Projet de référence

Décrire le projet de référence et en cartographier le tracé.

#### Variantes

Faire l'inventaire des types de matériel roulant et des modes d'alimentation qui peuvent être pertinents pour le projet de Québec et de Lévis et en décrire les principaux avantages et désavantages. Faire une recommandation sur les variantes qui seront conservées pour analyse tout au long de l'étude.

Dans les corridors décrits au Plan de mobilité durable de la ville de Québec, identifier les diverses variantes de tracé possible. Faire une recommandation sur les variantes de tracé qui seront conservées pour analyse tout au long de l'étude.

Identifier les sites potentiels pour localiser le CEE. Faire une recommandation sur les variantes de localisation du CEE qui seront conservées pour analyse tout au long de l'étude.

#### Problématiques d'insertion

L'objectif est de dresser un inventaire préliminaire des difficultés d'insertion d'un tramway le long du tracé proposé afin de mieux cibler les analyses à effectuer dans les volets suivants. Pour ce faire, les activités suivantes doivent être réalisées :

- illustrer les sections des insertions possibles d'un tramway en milieu urbain pour la technologie de référence et les variantes retenues. Ces sections donneront les dimensions requises autant pour la circulation en ligne droite que pour la circulation en virage;
- illustrer sur plan les insertions possibles d'une station en montrant la localisation et l'étendue des quais;
- identifier les pentes sur le tracé de référence et les variantes retenues. Le résultat devra être illustré sur un plan d'ensemble avec une légende pour des tranches de 2 % jusqu'à 6 % et des tranches de 1 % au-delà de 6 %. Les tronçons avec des pentes de plus de 6 % devront être illustrés avec une plus grande précision;
- dresser la typologie du tracé à l'étude (plans d'ensemble et plans spécifiques à chaque tronçon) quant aux types d'insertion possibles : en ligne droite, en rive sur un côté, en rive sur deux côtés, au centre. Cette typologie devra donner par tronçon les largeurs d'emprise actuelle, nombre et utilisation actuelle des voies de circulation et stationnement, largeur trottoir à trottoir, largeur bâtiment à bâtiment. Le nombre et l'horaire des places de stationnement éliminées ou maintenues devront être spécifiés;
- illustrer avec une plus grande précision, le tracé des virages à faible rayon le long du tracé et les rayons de courbure possibles avec une insertion au centre ou en rive;
- identifier sur un plan d'ensemble les tronçons où l'insertion d'un tramway pourrait se faire en demeurant à plus d'un demi mètre des valeurs critiques (généralement minimum 3,6 m ou

- maximum 6,5 m) du tirant d'air sous la caténaire (au rail). Les cas où ces valeurs critiques ne sont pas respectées doivent être décrits avec un descriptif (bulle) sur le plan d'ensemble;
- dresser un inventaire préliminaire des problématiques majeures d'insertion d'un tramway sur le tracé de référence et les options retenues, avec plan d'ensemble et liste.

#### Rapport d'étape

Produire un rapport d'étape faisant état des analyses et recommandations découlant du livrable 1.1.

Ce rapport a été remis le 1 novembre 2012.

#### Livrable 1.2 : Technologie et insertion

##### Principes généraux

Dans la recherche d'une solution technologique, le Consortium tiendra compte des principes suivants.

- favoriser les déplacements et le confort des usagers;
- assurer la sécurité des personnes, la sécurité des installations et des équipements, la sécurité routière et la sécurité publique;
- assurer l'accessibilité aux personnes à mobilité réduite, incluant les personnes en fauteuil roulant, sans intervention du personnel;
- minimiser l'ensemble des coûts;
- faciliter l'entretien des infrastructures, des équipements et du matériel roulant;
- offrir des services pratiques aux usagers;
- maximiser les interfaces avec les réseaux de transport en commun;
- minimiser les impacts sur le milieu urbain et le réseau routier;
- assurer le maintien de la fluidité de la circulation et des autres modes de transport présents le long du tracé du tramway;
- optimiser le concept visuel;
- favoriser le sens d'orientation par des aménagements simples et logiques;
- assurer le fonctionnement et la performance du système dans les conditions climatiques de la région de Québec.

##### Énoncé de conception

Le Consortium devra rédiger un énoncé (ou hypothèses) de conception relatif aux problématiques d'insertion et aux différents systèmes. Ce chapitre rassemblera les hypothèses d'études générales applicables à tous les domaines techniques. Les hypothèses spécifiques à un domaine technique seront formulées dans le chapitre dédié à ce domaine.

Cet énoncé devra prendre en compte toutes les normes applicables qu'elles soient internationales, nationales ou locales.

##### Définition du matériel roulant

À partir de la technologie de référence et des variantes retenues au livrable 1.1, le Consortium décrira :

- le matériel roulant;
- l'environnement opérationnel requis pour le matériel roulant;
- les spécifications générales pour l'exploitation du matériel roulant;

- les spécifications fonctionnelles du matériel roulant.

##### Définition de la plateforme, des stations et des pôles d'échanges

À partir de la technologie de référence et des variantes retenues au livrable 1.1, le Consortium décrira :

- les différentes caractéristiques de l'infrastructure (plateforme voie ferrée, voirie, drainage, réseaux souterrains);
- la définition technique et fonctionnelle des stations;
- la définition technique et fonctionnelle des terminus de lignes;
- les données d'entrée du tracé de la plateforme en plan, profil en long et profil en travers.

##### Insertion fonctionnelle du tramway

L'insertion fonctionnelle consiste à mettre en place sur le terrain l'ensemble des éléments (infrastructure, voie ferrée, ouvrages d'art, stations et centres d'échange, système d'alimentation, autres systèmes) requis pour le fonctionnement du système de tramway.

Le Consortium devra donc :

- cartographier à une échelle de 1/1000 l'insertion du tramway et de toutes ses composantes;
- les points critiques devront être cartographiés avec une plus grande précision lorsque requis;
- décrire l'ensemble des modifications que cette insertion apporte aux divers réseaux urbains incluant la géométrie routière, l'aménagement des intersections, la signalisation routière, l'éclairage, les trottoirs et pistes cyclables, etc.;
- identifier l'ensemble des travaux requis pour l'insertion fonctionnelle et pour les modifications aux réseaux urbains pour pouvoir en calculer les coûts.

Le Consortium retenu pour le mandat 1 (lot 1) est responsable de l'insertion fonctionnelle du tramway. Cependant, dans l'axe du boulevard Charest entre la rue St-Sacrement et la rue Nérée-Tremblay, cette insertion va dépendre de divers scénarios de développement ou de redéveloppement. Le mandataire du mandat 3 (lot 3) est responsable d'élaborer ces scénarios. Le Consortium retenu pour le mandat 1 et le mandataire du mandat 3 devront travailler en étroite concertation dans ce secteur.

##### Insertion et aménagement de l'espace urbain

Au-delà de son insertion fonctionnelle, la mise en place d'un système de tramway a un impact important sur l'espace et le paysage urbain. Le Consortium devra donc proposer des aménagements spécifiques pour chaque secteur traversé par le tramway. Ces aménagements devront s'adapter au contexte local en fonction des volontés d'imposer le tramway comme élément structurant de l'espace public ou au contraire le fonder dans le cadre local afin qu'il s'adapte aux lieux traversés.

Le Consortium devra donc :

- définir un concept général d'image de marque pour le tramway et illustrer ce concept;
- découper la ligne en tronçons présentant des caractéristiques similaires, par exemple, du point de vue des unités de paysage, de la géométrie et de la typologie des espaces publics;
- caractériser et analyser les tronçons en regard de la morphologie urbaine, de la configuration de l'espace public et de la composante paysagère;
- identifier les contraintes et formuler les recommandations pour une insertion optimale;

- pour chaque tronçon, définir l'aménagement de l'espace urbain en tenant compte des caractéristiques du tronçon et de l'image de marque souhaitée pour le tramway;
- illustrer le concept d'aménagement de chaque tronçon;
- identifier l'ensemble des travaux requis pour réaliser cette insertion dans le but d'en calculer les coûts.

### Livrable 1.3 : Mode d'alimentation du système

Le présent rapport constituant le livrable 1.3, la section 1.3 du présent document présente en détail les objectifs de ce livrable et le contenu du rapport.

### Livrable 1.4 : Équipements, exploitation, maintenance et dépôt

L'objectif de ce livrable est de :

- définir les caractéristiques du service offert par le tramway en fonction des besoins et de l'achalandage;
- dimensionner le parc de matériel roulant et le kilométrage annuel;
- définir les ressources requises pour l'exploitation et l'entretien du service, du garage et des systèmes et infrastructures;
- définir les équipements requis pour le projet tel que la signalisation, les communications, etc.

#### Équipements requis

Le Consortium devra définir l'ensemble des systèmes et équipements requis pour le bon fonctionnement du tramway.

#### Exploitation du système

Le Consortium devra décrire les principes d'exploitation recommandés et faire l'estimation du parc de matériel roulant, de la vitesse commerciale du système, ainsi que des paramètres d'exploitation nécessaires au fonctionnement du tramway. Cela contribue au calcul du coût d'exploitation du système.

Le Consortium doit :

- évaluer qualitativement les différents scénarios d'exploitation du tramway en fonction des caractéristiques de la demande (conception et définition des lignes);
- dimensionner l'offre de transport journalière (évolution des intervalles d'exploitation et la longueur des trains);
- calculer la marche type, le temps d'arrêt en station, la vitesse commerciale et la durée d'un tour;
- dimensionner le parc de matériel roulant et calculer les véhicules-km;
- décrire le fonctionnement des terminus de ligne (configuration et mouvement des trains) et des aires de remisage en ligne;
- décrire le fonctionnement en mode nominal, y compris insertion/retrait des rames;
- décrire le fonctionnement en mode dégradé, en ligne (services provisoires) et en terminus;
- produire le plan de voies;
- établir les ressources requises pour l'exploitation du système.

Le calcul de la demande est de la responsabilité du mandataire du mandat 3 (lot 3). Celui-ci doit fournir les caractéristiques de la demande pour le tramway. À partir de cette information, le Consortium du mandat 1 (lot 1) devra faire la conception des lignes, définir les vitesses, la longueur des trains, les horaires et les fréquences.

#### Maintenance et dépôt

Par rapport au CEE, le Consortium devra :

- analyser les différents scénarios de localisation et proposer une localisation;
- établir les dimensions requises pour le terrain du centre;
- décrire les fonctions du CEE;
- dimensionner de façon préliminaire le CEE et décrire sommairement son mode de fonctionnement;
- établir les ressources requises pour le fonctionnement du CEE.

#### Rapport d'étape

Produire un rapport d'étape faisant état des analyses et recommandations découlant du livrable 1.4. La version préliminaire de ce rapport était prévue pour le 21 octobre 2013.

Pour faciliter le suivi de l'évolution et la validation progressive de ce livrable, le Consortium a subdivisé ce livrable en 6 sous livrables présentés sous forme de 6 notes techniques.

### Livrable 1.5 : Phasage et échéancier de construction du projet

#### Phasage du projet

Le Consortium devra analyser s'il est possible de mettre en place le projet de tramway par phases. Si cela est possible, il devra proposer un découpage des phases du projet et proposer une priorité de mise en place des différentes phases.

Dans l'analyse du phasage du projet, il doit tenir compte des éléments suivants :

- les priorités des divers projets de développement le long des corridors du tramway;
- les différences de coûts d'immobilisation entre un projet complet ou un projet par phase;
- la capacité d'exploiter de façon performante le système de tramway;
- l'impact sur les déplacements et l'achalandage du tramway;
- les avantages et les coûts du projet.

Il devra se concerter avec le mandataire des mandats 3 et 4 (lot 3) pour tenir compte de l'impact des déplacements, de l'achalandage et des avantages ainsi que des coûts sur le phasage du projet.

#### Échéancier de construction

Le Consortium devra produire un échéancier sommaire de construction du projet de tramway. Cet échéancier devra tenir compte des éléments suivants :

- l'échéancier doit être construit pour que l'ouverture du système se fasse préférentiellement le 1<sup>er</sup> janvier 2026;
- l'échéancier doit détailler les principales étapes qui sont nécessaires à la mise en place du projet de tramway, de la confection des plans et devis à l'ouverture officielle du système;

- l'échéancier doit être présenté en tenant compte des phases potentielles du projet et des variantes retenues.

#### Rapport d'étape

Produire un rapport d'étape faisant état des analyses et recommandations découlant du livrable 1.5. La version préliminaire de ce rapport était prévue pour le 21 août 2013.

#### Livrable 1.6 : Coûts d'immobilisation et d'exploitation

L'objectif de ce livrable est de :

- définir les coûts d'immobilisation du projet pour le concept de référence et les variantes;
- définir les coûts annuels d'exploitation du système pour le concept de référence et les variantes.

#### Coût d'immobilisation du projet

Le Consortium devra calculer et présenter les coûts d'immobilisation du projet par phase, sur une base annuelle, en dollars 2012 avec une précision de  $\pm 30\%$ . Ce calcul devra tenir compte des éléments suivants :

- comprendre tous les coûts qui sont nécessaires à la mise en place du projet de tramway, de la confection des plans et devis à l'ouverture officielle du système;
- comprendre le coût des mesures de mitigations requises pendant les travaux de construction du tramway;
- être réparti en sous-systèmes afin de bien illustrer le coût des différentes composantes du tramway.

Le Consortium devra indiquer la durée de vie des principales infrastructures, des principaux équipements, du matériel roulant et présenter leur coût de remplacement.

#### Coûts annuels d'exploitation

Le Consortium devra calculer et présenter les coûts annuels d'exploitation du système de tramway par phase, sur une base annuelle, en dollars 2012 avec une précision de  $\pm 30\%$ . Ce calcul devra tenir compte des éléments suivants :

- comprendre tous les coûts annuels qui sont nécessaires à l'exploitation du système de tramway;
- être détaillé sur la même base que les budgets annuels du RTC;
- les coûts d'exploitation seront calculés annuellement de 2026 à 2041 (intran à l'analyse avantages/coûts).

#### Rapport d'étape

Produire un rapport d'étape faisant état des analyses et recommandations découlant du livrable 1.6. Ce rapport s'adresse aux divers comités du projet. La version préliminaire de ce rapport était prévue pour le 29 octobre 2013.

#### Livrable 1.7 : Impacts de la mise en place d'un BHNS à Lévis

Compte tenu de la réalisation potentielle d'un BHNS à Lévis, le Consortium devra dans le cadre de la réalisation du mandat 1 :

- coordonner ses analyses avec le consultant choisi par STLévis pour l'étude de faisabilité et d'avant-projet du BHNS sur le boulevard de la Rive-Sud;
- s'assurer que l'insertion retenue pour le tramway sur le boulevard de la Rive-Sud soit cohérente avec les travaux prévus pour la mise en place d'un BHNS;
- tenir compte du projet de BHNS dans l'étude de phasage du projet tramway;
- pour les coûts d'immobilisation, calculer une variante qui prévoit que le BHNS est en place sur le boulevard de la Rive-Sud au moment de la construction du tramway (les informations concernant le BHNS seront fournies par le consultant de STLévis).

#### Rapport d'étape

Produire un rapport d'étape faisant état des analyses et recommandations découlant du livrable 1.7. La version préliminaire de ce rapport était prévue pour le 11 octobre 2013.

#### Livrable 1.8 : rapport technique du mandat 1

Le Consortium devra produire un rapport technique qui présente de façon claire les inventaires, les constats, les analyses et les résultats du mandat 1 de l'étude de faisabilité portant sur la faisabilité technique du tramway. La version préliminaire de ce rapport était prévue pour le 8 janvier 2014.

## 1.3 PRÉSENTATION DU LIVRABLE 1.3 : MODE D'ALIMENTATION DU SYSTÈME

### 1.3.1 Objectifs de l'étude de faisabilité de l'alimentation électrique

#### Définition des sous-systèmes fonctionnels

Le sous-système « énergie et lignes aériennes de contact » de la ligne de tramway se compose, pour le scénario de référence, de quatre sous-ensembles fonctionnels :

- la transformation de l'énergie Moyenne Tension (MT) du réseau de distribution d'électricité en énergie de traction continue d'alimentation des matériels roulants et en énergie Basse Tension (BT) qui alimente les stations voyageurs, le dépôt (CEE) et les équipements en ligne;
- la distribution de l'énergie de traction au matériel roulant qui se fait au moyen de lignes aériennes de contact (LAC) sur poteaux, intégrées au paysage urbain;
- la commande et le contrôle des équipements électriques à partir du centre de commande énergie;
- la récupération de l'énergie de freinage en vue d'optimiser la consommation énergétique de la ligne.

#### Objectifs de l'étude faisabilité de l'alimentation électrique

À l'instar des autres systèmes du tramway, l'étude de faisabilité de l'alimentation électrique a pour objectif :

- de s'assurer de la faisabilité du système « énergie et alimentation électrique » dans le respect des normes et des lois;
- de caractériser les équipements de ce système dans un détail nécessaire et suffisant pour estimer les coûts d'investissement avec une précision de  $\pm 30\%$ ;
- de déterminer la consommation en énergie et en puissance électrique du tramway et d'en déterminer le coût annuel avec une précision de  $\pm 30\%$ ;
- de caractériser les requis en entretien (équipement et personnel) et d'en déterminer le coût annuel avec une précision de  $\pm 30\%$ ;
- de proposer et d'étudier des alternatives au système d'énergie et de ligne de contact de référence (alimentation par le sol, par batteries, etc.).

#### Exigences générales

Dans l'élaboration des concepts techniques, les principes de base à considérer, pour le projet de référence sont les suivants :

- appliquer un concept éprouvé et sécuritaire;
- tenir compte des conditions climatiques (très grande variation entre les hivers froids et l'été), du relief (dénivelé important de la ligne) et des conditions de circulation en environnement urbain;
- minimiser les impacts sur l'environnement;
- optimiser les coûts d'immobilisation et d'exploitation sur la durée de vie des infrastructures;
- optimiser l'implantation des divers équipements en milieu urbain;
- faciliter l'entretien des infrastructures et des équipements servant à l'électrification.

#### Identification des critères de conception

Rédiger un énoncé (ou hypothèses) des critères de conception relatif aux problématiques d'insertion et aux différents systèmes. Il s'agit principalement de définir le référentiel normatif du projet pour ce qui concerne :

- l'identification des enjeux majeurs et des problèmes associés à la réalisation du scénario de référence et des variantes retenues;
- l'identification des normes (incluant celles d'Hydro-Québec) et pratiques à respecter pour la mise en place, l'exploitation et la maintenance des équipements électriques du tramway aérien;
- l'élaboration des critères ainsi que des normes de conception des ouvrages et des équipements électriques, notamment en ce qui a trait aux structures à mettre en place et aux gabarits à respecter;
- l'identification et l'analyse des contraintes imposées par la circulation de véhicules hors gabarit (pompiers, véhicules hors gabarits), ainsi que l'analyse des impacts que les équipements peuvent avoir sur la circulation de ces véhicules, le cas échéant;
- l'identification des contraintes environnementales et des règles qui devront être suivies;
- l'identification des enjeux liés aux conditions climatiques et l'identification des impacts sur les exigences d'exploitation et de maintenance.

#### Thèmes principaux à traiter

Les sujets à traiter dans l'étude de faisabilité comprennent entre autres :

- la détermination du niveau et du choix de tension de la ligne aérienne de contact (LAC);
- la détermination de la configuration de l'alimentation optimale;
- la détermination de la localisation et des puissances des postes de redressement;
- les choix technologiques associés aux équipements des postes de redressement et les principes de raccordement au réseau d'Hydro-Québec;
- la définition de l'insertion de la ligne aérienne de contact;
- la définition des équipements de la ligne aérienne;
- la définition des fonctions principales et équipements associés au centre de commande d'énergie;
- l'étude, la caractérisation et la comparaison des différents systèmes de récupération d'énergie de freinage;
- la mise à la terre et le traitement des perturbations harmoniques et des courants vagabonds;
- l'exploitation et l'entretien des équipements « énergie et lignes aériennes »;
- l'étude des variantes au projet de référence.

### 1.3.2 Contenu

Pour faciliter le suivi de l'évolution et la validation progressive du livrable 1.3 Mode d'alimentation du système tramway, le Consortium a subdivisé le livrable en sous-livrables présentés sous forme de notes techniques et d'un rapport d'étape.

Le livrable 1.3 est constitué des documents suivants :

- Rapport d'étape (présent document);
- 1<sup>er</sup> sous-livrable 1.3 : Critères de conception;
- 2<sup>e</sup> sous-livrable 1.3 : Équipements et raccordement électrique;
- 3<sup>e</sup> sous-livrable 1.3 : Ligne aérienne de contact;
- 4<sup>e</sup> sous livrable 1.3 : Centre de commande énergie;
- 5<sup>e</sup> sous-livrable 1.5 : Récupération de l'énergie de freinage;
- 6<sup>e</sup> sous-livrable 1.6 : Mise à la terre et traitement des perturbations harmoniques;
- 7<sup>e</sup> sous-livrable 1.7 : Exploitation et entretien des équipements énergie et ligne aérienne de contact.

Le rapport d'étape livrable 1.3 est structuré de la façon suivante, suite au présent chapitre 1 d'introduction et de mise en contexte :

- chapitre 2 – Principes : ce chapitre présente les hypothèses de base de l'étude, les principes des installations électriques du système tramway, ainsi que les critères de conception;
- chapitre 3 – Variantes au projet de base : ce chapitre présente les différentes variantes analysées :
  - tension d'alimentation traction;
  - solutions de captations;
  - énergie embarquée à bord des rames de tramway;
  - Il présente également les recommandations sur ces variantes.
- chapitre 4 – Études techniques de la solution de base : ce chapitre présente au niveau du projet les études faites sur les installations électriques du système tramway :
  - Les lignes aériennes de contact;
  - Les équipements avec le pré-dimensionnement des installations traction;
  - L'analyse de la récupération de l'énergie de freinage;
  - Le centre de commande énergie du système tramway;
  - La mise à la terre et le traitement des perturbations harmoniques et des courants vagabonds.
- chapitre 5 – Conclusions et recommandations
- chapitre 6 – Annexes : les annexes seront constituées de :
  - 1<sup>er</sup> sous-livrable 1.3 : Critères de conception;
  - 2<sup>e</sup> sous-livrable 1.3 : Équipements et raccordement électrique;
  - 3<sup>e</sup> sous-livrable 1.3 : Ligne aérienne de contact;
  - 4<sup>e</sup> sous livrable 1.3 : Centre de commande énergie;
  - 5<sup>e</sup> sous-livrable 1.5 : Récupération de l'énergie de freinage;
  - 6<sup>e</sup> sous-livrable 1.6 : Mise à la terre et traitement des perturbations harmoniques;
  - 7<sup>e</sup> sous-livrable 1.7 : Exploitation et entretien des équipements énergie et ligne aérienne de contact.

## 2 PRINCIPES

### 2.1 LES HYPOTHÈSES DE BASE DE L'ÉTUDE

#### 2.1.1 Exploitation et objectifs de performance du tramway

La régularité est primordiale et termes d'attractivité du système : le temps de parcours doit être fiable. Pour atteindre cet objectif, le système d'alimentation électrique du tramway doit être fiable et fournir aux rames de tramway l'énergie nécessaire pour respecter le temps de parcours.

La fréquence du système doit également être attractive, en heure de pointe comme en heure creuse. De ce fait, le système d'alimentation doit être dimensionné pour couvrir la configuration la plus pénalisante (heures de pointes).

La fréquence (ou intervalle) en heure de pointe est donc un paramètre très important pour le système d'alimentation.

Les hypothèses principales prises pour cette étude faisabilité du système d'alimentation électrique du tramway sont listées ci-après.

Fréquence maximale à long terme sur chacune des branches du tracé du tramway :

- branche sud Charest/Grand Théâtre : 2 minutes entre rames par sens;
- branche nord Charest/41<sup>e</sup> Rue : 3 minutes entre rames par sens;
- branche est Dorchester/Estimauville : 3 minutes entre rames par sens;
- branche ouest Dorchester/Pont de Québec : 3 minutes entre rames par sens;
- branche ouest Lévis : 3 minutes entre rames par sens.

Matériel roulant :

- court et moyen terme : rames de 33 m de long avec un taux de motorisation de 100 %;
- long terme : rames allongées à 43 m de long sans rajout de motorisation (taux de motorisation de 75 %);
- vitesse maximale de circulation en exploitation de 70 km/h.

#### 2.1.2 Caractéristiques physiques du matériel roulant

Pour les caractéristiques physiques du matériel roulant, le lecteur est invité à lire :

- le 2<sup>e</sup> sous-livrable 1.2 : note technique sur le matériel roulant;
- la section 5 du 2<sup>e</sup> sous-livrable 1.3 : note technique avec les hypothèses pour le pré-dimensionnement traction.

#### 2.1.3 Alimentation en énergie électrique

Elle est réalisée à partir d'une ligne aérienne de contact avec captage par pantographe fixé sur le toit du matériel roulant et le retour de courant par les rails de roulement.

Pour de plus amples information sur la ligne aérienne de contact, le lecteur est invité à lire le 3<sup>e</sup> sous-livrable 1.3 : note technique ligne aérienne de contact.

#### 2.1.4 Autres hypothèses

Pour les autres hypothèses prises (tracé en plan, profil en long, stations, etc.), le lecteur est invité à lire le 2<sup>e</sup> sous-livrable 1.3 Note technique avec les hypothèses le pré-dimensionnement traction, document regroupant les informations et hypothèses prises.

### 2.2 RÉFÉRENTIEL TECHNIQUE PRINCIPAL

Le référentiel technique principal à prendre en compte pour l'alimentation du système tramway est constitué des textes :

- normes canadiennes;
- normes Hydro-Québec;
- des normes européennes pour ce qui relève des installations de traction.

Le lecteur est invité à lire la 4<sup>e</sup> section du 1<sup>er</sup> sous-livrable 1.3 « Critères de conception » présentant la liste des normes du référentiel technique principal.

### 2.3 ENVIRONNEMENT CLIMATIQUE

Le lecteur est invité à lire la 5<sup>e</sup> section du 1<sup>er</sup> sous-livrable 1.3 « Critères de conception », présentant les données et contraintes climatiques.

### 2.4 IDENTIFICATION DES INSTALLATIONS ÉLECTRIQUE DU SYSTÈME TRAMWAY

Les installations du système tramway, ainsi que celles nécessaires à l'exploitation sont réparties géographiquement. Les principales localisations sont :

- le Centre d'Exploitation et d'Entretien;
- les stations et aménagements associés (pôles d'échange, parc relais, bâtiments d'exploitation, etc.);
- les sous-stations de traction;
- les installations techniques le long des lignes de tramway, avec notamment :
  - les zones de manœuvres tramway (motorisation des appareils de voies, signalisation ferroviaire associée, réchauffage des aiguilles des appareils de voies, etc.);
  - les armoires techniques traction (armoires de sous sectionnement par exemple);
  - les armoires techniques courants faibles (vidéosurveillance, transmission, etc.).

D'autres types d'installation sont également présents le long de la ligne de tramway, mais ils ne sont pas spécifiques au tramway. Cela concerne principalement l'éclairage des zones publiques, les armoires contrôleurs des feux de circulations. Pour de plus amples informations sur ces installations, le lecteur est invité à lire respectivement le livrable 1.2 pour l'éclairage et le 4<sup>e</sup> sous-livrable 1.4 pour les armoires contrôleurs.

### 3 VARIANTES AU PROJET DE RÉFÉRENCE

#### 3.1 TENSION D'ALIMENTATION TRACTION

Le choix de la tension d'alimentation traction concerne à la fois les installations fixes de traction (sous-stations traction, ligne aérienne, etc.), et le matériel roulant.

Les tensions d'alimentation traction standardisées dans les transports urbains et ferroviaires au niveau international sont les suivantes (norme EN 50163 notamment) : 750 Vcc, 1 500 Vcc, 3 000 Vcc, 15 000 Vac et 25 000 Vac.

##### 3.1.1 Les tensions en courants alternatifs

Les tensions en courants alternatifs sont classées dans la catégorie Haute Tension et sont principalement utilisées pour les lignes ferroviaires, les métros de fortes capacités, les réseaux express et les lignes tram-train.

Ces tensions de courant alternatif sont principalement adaptées pour les lignes ou réseaux exploités avec un matériel roulant de forte puissance ou très étendu.

Leurs inconvénients principaux sont :

- l'augmentation de la masse à vide du matériel roulant et la réduction de la capacité qui en découle;
- une classification dans la catégorie Haute Tension;
- la production de rayonnement électromagnétique;
- des distances importantes d'isolement à respecter;
- des montages LAC volumineux (isolateurs de fortes dimensions);
- la disponibilité des installations traction dépend directement de celle du réseau amont.

Pour ces raisons, leur utilisation pour les lignes urbaines insérées en surface est déconseillée.

##### 3.1.2 Les tensions en courant continu

Les tensions en courant continu de 750 et 1 500 V sont classées en Base Tension (norme européenne), alors que la tension en 3 000 V est classée en Haute tension.

Ces tensions de courant continu sont principalement adaptées pour les réseaux urbains, les lignes ferroviaires et réseaux express régionaux.

Leurs inconvénients principaux sont :

- La production de courant vagabond. Les rails (circuit de retour de courant traction) doivent être isolés du sol afin de réduire les influences sur les installations tiers;
- Dans le cas de matériel roulant de forte puissance, la lourdeur des montages caténaires;
- Le nombre de sous-stations, du fait du niveau de tension distribué.

Les standards internationaux sont de référence 750 V et 1 500 V. Le 3 000 V est essentiellement utilisé dans quelques pays. Pour les nouveaux projets, ce niveau de tension est peu/pas utilisé en dehors des pays possédant déjà un parc de matériel avec cette tension.

##### 3.1.3 1<sup>er</sup> niveau de tri pour le choix de la tension d'alimentation traction

Le tableau ci-après présente sous forme de synthèse les aspects abordés et propose une évaluation qualitative suivant trois niveaux : adapté (vert), peu adapté (orange) et non adapté (rouge).

	Urbain insertion en surface	Urbain en tunnel	Péri urbain	Inter urbain
750 V=	Vert	Vert	Orange	Rouge
1500 V=	Vert	Vert	Vert	Vert
3000 V=	Rouge	Orange	Orange	Orange
15kV~	Rouge	Orange	Orange	Orange
25 kV~	Rouge	Vert	Vert	Vert

Tableau 1 : Tableau de synthèse domaine d'application des tensions

Le projet du tramway de Québec et de Lévis étant majoritairement en zone urbaine avec une insertion en surface, il en découle que le choix de tension se réduit au 750 Vcc ou 1 500 Vcc.

##### 3.1.4 2<sup>e</sup> niveau de tri pour le choix de la tension d'alimentation traction

Une comparaison plus fine entre le 750 Vcc et 1 500 Vcc fait ressortir que :

- au point de vue technique :
  - il y a plus de sous-station avec le 750 Vcc que le 1 500 Vcc;
  - avec le 750 Vcc, une perte d'une sous-station traction peut être facilement compensée par les sous-stations adjacentes;
- au point de vue industriel :
  - le 750 Vcc est la tension la plus courante pour le matériel roulant tramway et est adaptée aux différents type de captation;
  - de nombreux fournisseurs proposent du matériel de ces deux tensions pour les sous-stations;
- Aspect financier :
  - marché plus concurrentiel côté matériel roulant pour le 750 Vcc et similaire pour les deux tensions au point de vue installations fixes.

L'analyse des normes en vigueur au Québec, notamment la norme CSA C22.3 n°1 fait ressortir des contraintes beaucoup plus importantes pour le 1500V= que pour le 750V=.

Le tableau 10 de cette norme définit les dégagements minimaux de calcul entre les conducteurs d'alimentation et les ponts :

- pour une tension  $\leq 750V$ , le dégagement minimal spécifié est de 0,3 m entre les conducteurs et le dessous du pont;
- pour une tension comprise entre 750V et 22 kV, cette valeur minimale est portée à 0,9 m.

Le tracé du tramway s'insère en milieu urbain et passe sous plusieurs ouvrages d'art existants. Le gabarit existant sous ces ouvrages est faible, et notamment le pont de Québec.

Il en résulte que le 1500V ne peut pas être retenu pour le tramway des villes de Québec et Lévis. Il impliquerait des reprises d'ouvrages d'art conséquentes et très onéreuses afin de respecter les normes en vigueur.

Le lecteur est invité à lire la section 6.4 du 1<sup>er</sup> sous-livrable 1.3 « Critères de conception » pour de plus amples informations sur l'analyse normative.

### 3.1.5 Conclusion et recommandation pour la tension d'alimentation traction

Le Consortium recommande le choix de la tension d'alimentation traction 750V courant continu pour le tramway des villes de Québec et Lévis.

## 3.2 SOLUTIONS DE CAPTATION

La solution avec ligne aérienne de contact (LAC) est depuis des décennies le système de référence concernant l'alimentation en énergie de traction des tramways. Cependant, depuis plusieurs années, certaines motivations poussent les industriels à développer des systèmes d'alimentation sans LAC en milieu urbain.

Il existe essentiellement quatre systèmes de captations soit :

- la LAC;
- l'alimentation par le sol (APS) avec contact;
- l'alimentation par le sol sans contact;
- le système Wipost de LOHR.

Ces systèmes sont décrits brièvement ci-après.

### 3.2.1 Ligne aérienne de contact (LAC)

Ce système est le plus répandu pour un tramway mais nécessite la mise en œuvre de supports (poteaux latéraux ou axiaux, accrochage en façade avec transversal, fixation sous ouvrage).

L'espacement longitudinal entre les supports varie de l'ordre de 15 m en courbe de faible rayon à environ 50 m en alignement droit. La figure ci-après présente une coupe avec poteau axial.

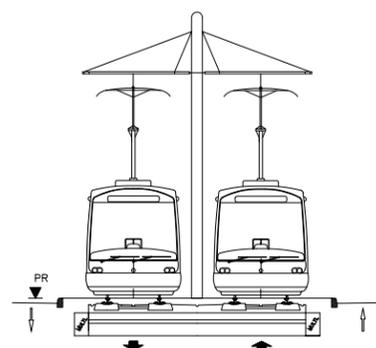


Figure 5 : LAC avec poteau axial

### 3.2.2 Alimentation par le sol (APS)

Le système d'APS a pour but de supprimer la LAC. L'APS permet de libérer la voie publique de l'ensemble des obstacles aériens. Les composants d'alimentation comprennent des éléments au

sol et des composants à bord des véhicules. Le rail d'alimentation est situé au centre de la voie de roulement.

Le système peut aussi être combiné avec un équipement classique d'alimentation par LAC.

### 3.2.3 APS avec contact (système breveté par Alstom)

La figure ci-après présente schématiquement le système d'APS d'Alstom. Ce système a été mis en service en 2003 à Bordeaux en France et est maintenant arrivé à maturité.

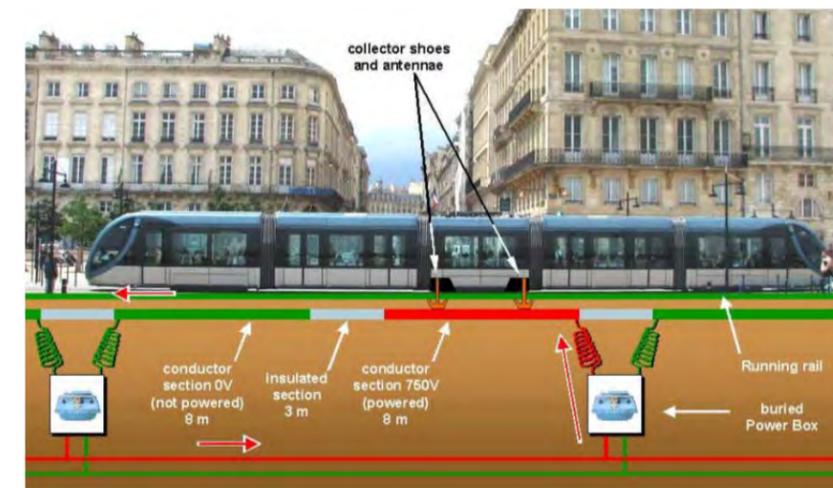


Figure 6 : APS Alstom – Schéma du rail d'alimentation segmenté

### 3.2.4 APS sans contact (système breveté par Bombardier)

La figure ci-après présente schématiquement le système d'APS de Bombardier. Ce système est en cours de développement et l'objectif de Bombardier est de disposer d'un système homologué en septembre 2012.

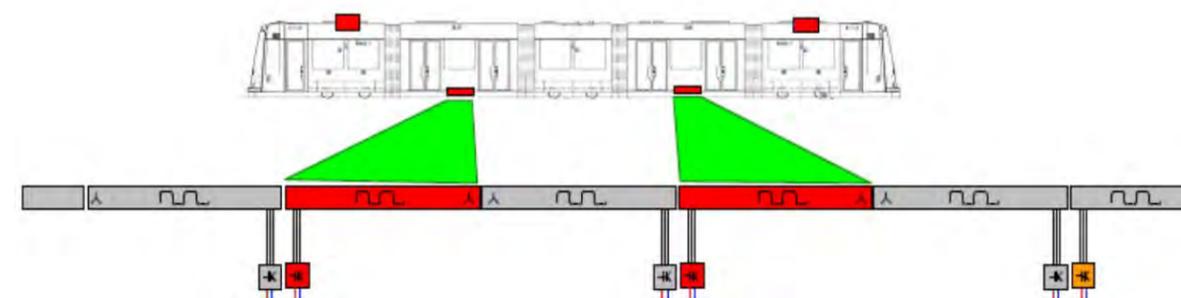


Figure 7 : APS Bombardier - Principe général du système PRIMOVE

### 3.2.5 WIPOST de LOHR

WIPOST est un système d'alimentation aérien sans fil de contact. Ce système propriétaire est en cours de développement par LOHR industrie. Le WIPOST est composé de poteaux placés entre les

2 voies dont le rôle est de distribuer l'énergie 750 V à 3,6 m du sol. Le véhicule récupère cette énergie grâce à deux pistes d'alimentation installées de chaque côté de la toiture. L'espacement entre les poteaux est défini pour que le matériel roulant soit toujours en contact avec au moins un point d'alimentation.



Figure 8 : Principe général du WIPOST2

### 3.2.6 Conclusion et recommandation pour la captation

Le tableau ci-après présente, sous forme de synthèse, une évaluation qualitative des différentes solutions de captation suivant trois niveaux : adapté (vert), peu adapté (orange) et non adapté (rouge).

Solutions de captation	LAC	APS (Alstom)	Primove (Bombardier)	Wipost (Lohr)
Maturité du Système	Solution de référence (utilisée depuis plusieurs décennies)	Correcte (utilisée en exploitation depuis 8 ans)	En cours d'essais (sur un site d'essai)	Pas de visibilité sur l'avancement du développement
Fiabilité/disponibilité	Solution de référence	Correcte si rame avec autonomie embarquée	Pas de retour d'expérience	Pas de retour d'expérience
Autonomie	Aucune	Nécessaire (~ 30 – 50 m) pour s'affranchir de la panne de boîtier(s)	Nécessaire (~ 30 – 50 m) pour s'affranchir de la panne de boîtier(s)	Aucune
Durée de vie	> 30 ans	Annoncé par Alstom similaire à la LAC	Annoncé par Bombardier similaire à la LAC	Pas d'information
Coupe en travers de la plateforme	Hauteur pour la LAC Surlargeur pour les poteaux LAC	Profondeur sous plateforme pour boîtiers	Profondeur sous plateforme pour boîtiers.	Surlargeur de la plateforme pour les poteaux axiaux
Profil en long de la plateforme	Adapté, y compris les zones en pente	Adapté, y compris les zones en pente	Performance à vérifier	Pas d'information. Devrait être similaire à la LAC
Pont de Québec (~1km)	Adapté	Insertion des boîtiers à étudier	Développement en cours (Compatibilité avec les structures métalliques à vérifier)	Pas d'information. Devrait être similaire à la LAC
Eau (présence temporaire d'eau sur la plateforme)	Adapté	Performances à vérifier	Performances à vérifier	Adapté
Neige : fonctionnement	Système compatible	Système non utilisé dans un environnement similaire.	Performances à vérifier	Distances d'isolement en toiture à vérifier
Neige : déneigement plateforme	Les poteaux axiaux peuvent gêner les opérations de déneigement	Très fortes contraintes de déneigement plateforme (le rail d'alimentation doit rester dégager en permanence)	Forte contraintes de déneigement plateforme (faible garde au sol sous véhicule)	Les poteaux axiaux peuvent gêner les opérations de déneigement
Givre/glace	Mesures préventives et curatives à prendre	Non utilisé dans un environnement similaire. Mesures préventives et curatives à prendre	Performances à vérifier. Mesures préventives et curatives à prendre	Pas d'information. Devrait être similaire à la LAC.
Fondant	Adapté (Mise en œuvre de protection contre la corrosion des pieds des poteaux LAC)	Sur les lignes existantes avec APS, cela implique l'utilisation de fondant spécifique. L'efficacité de ces fondants dans les conditions climatique de Québec est à vérifier.	Pas d'information. Cela ne devrait pas être un problème ; les éléments fixes sont enterrés dans le sol et protégés par des couvercles « étanche ». La compatibilité des matériaux des boîtiers sera néanmoins à vérifier.	Pas d'information. Devrait être similaire à la LAC.
Amplitude thermique	Adapté	Non utilisé à ce jour dans un environnement similaire	Non utilisé à ce jour dans un environnement similaire	Pas d'information. Devrait être similaire à la LAC.
Consommation électrique	Solution de référence	Identique à la solution de référence	Identique à la solution de référence	Identique à la solution de référence
Coût d'investissement	Solution de référence	1,5 à 3 fois celui de la LAC	Devrait être similaire à l'APS	Pas d'information.
Coût d'exploitation	Solution de référence	Similaire à la solution LAC	Devrait être similaire à la LAC	Pas d'information
Coût de maintenance	Solution de référence	3 à 5 celui de la LAC	Devrait être similaire à l'APS	Pas d'information

Tableau 2 : Évaluation des différentes solutions de captation suivant trois niveaux

L'analyse de ce tableau fait clairement ressortir que le système LAC est la solution la mieux adaptée pour le tramway de Québec et de Lévis.

### 3.3 ENERGIE EMBARQUÉS

Le lecteur est invité à lire la section 6 de l'annexe D du livrable 1.1 présentant les différentes technologies existantes pour emmagasiner de l'énergie dans des accumulateurs implantés à bord du matériel roulant.

Des simulations traction ont été réalisées pour identifier l'énergie nécessaire pour une rame de 43 m de long, pour parcourir chaque interstation, en circulant en marche-tendue, avec les équipements auxiliaires à pleine puissance. Cela correspond typiquement à la circulation d'une rame à la période de pointe en hiver avec le chauffage à pleine puissance.

Sur chaque graphique ci-dessous, les barres en bleu correspondent au sens de circulation aller, et les barres en rouge au sens de circulation retour.

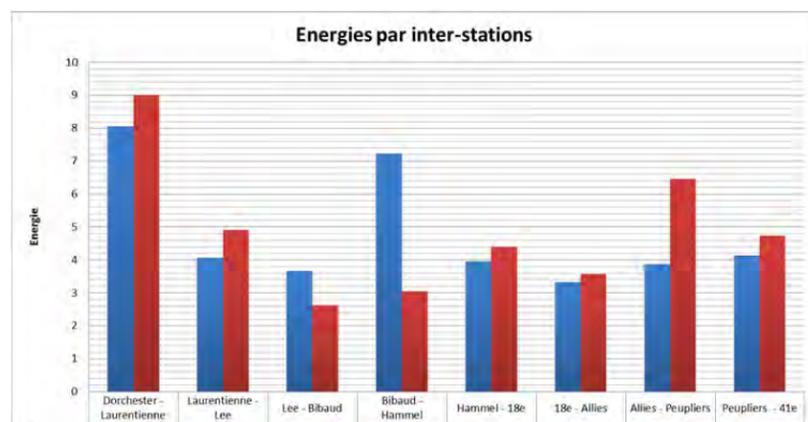
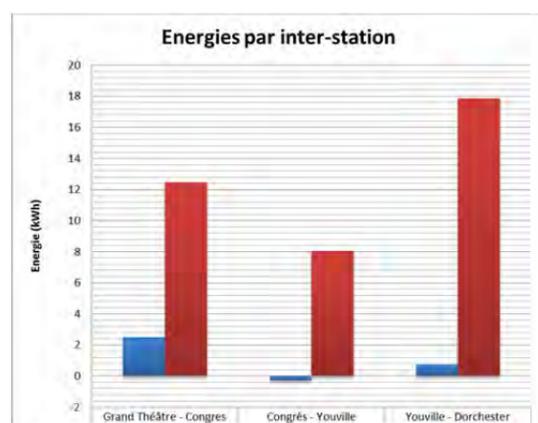


Figure 9 : Énergie par interstation tracé Nord-Sud

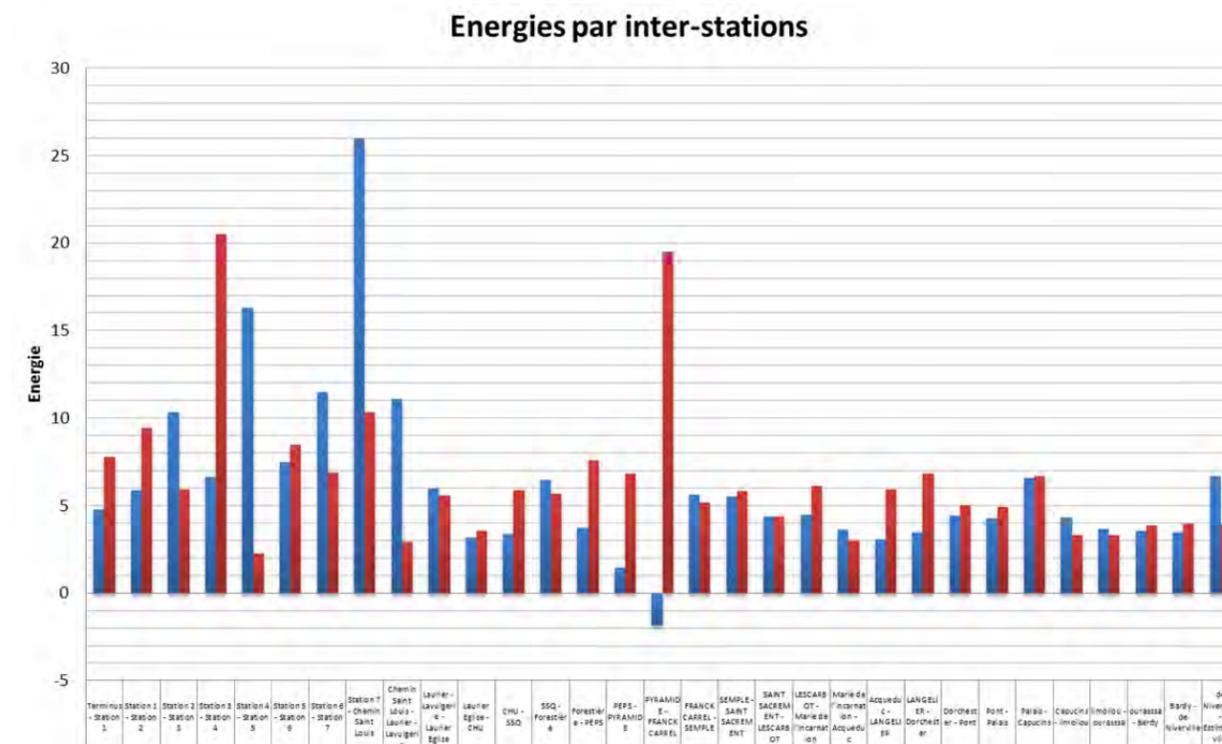


Figure 10 : Énergie par interstation tracé Ouest-Est

L'analyse des résultats fait apparaître les besoins suivants en termes d'énergie consommée entre 2 stations :

- branche sud : 18 kWh pour l'interstation Dorchester-Youville;
- branche nord : 9 kWh pour l'interstation Dorchester-Laurentienne;
- branche ouest : 26 kWh pour l'interstation sur le pont de Québec;
- branche est : 7 kWh sur plusieurs interstations.

Ces valeurs importantes résultent de plusieurs paramètres :

- du profil en long des lignes de tramway envisagées;
- de longueur de certaines interstations (temps de parcours élevé d'où une part importante due à l'énergie absorbée par les auxiliaires de la rame);
- de la vitesse élevée de circulation du tramway (pour avoir un système de transport attractif).

En l'état actuel des technologies, les réserves d'énergie embarquée sur un tramway d'une longueur de 43 m sont insuffisantes pour couvrir le besoin maximum identifié (26 kWh). Il en résulte qu'une solution alternative à l'alimentation des véhicules par ligne aérienne de contact, basée sur une réserve d'énergie embarquée n'est pas adaptée au projet de tramway des villes de Québec et de Lévis.

### 3.4 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS POUR LE SYSTÈME D'ALIMENTATION

Les préconisations pour l'alimentation des rames de tramway (système d'alimentation) sont :

- traction 750V courant continu;
- alimentation par ligne aérienne de contact.

## 4 ÉTUDES TECHNIQUES DU PROJET DE BASE

### 4.1 LIGNE AÉRIENNE DE CONTACT

L'insertion de la ligne aérienne de contact (LAC) consiste à déterminer les différents modes de supportages possibles et le mieux adapté au site traversé.

Les grandes familles d'insertion possible pour la LAC sont les suivantes :

- supports (poteau ou ancrage en façade) bilatéraux avec suspension sous transversal;
- poteaux latéraux avec suspension sous consoles couvrant ou 1 ou 2 voies tramway;
- poteaux axiaux (entre les 2 voies tramway), avec suspension sous 2 consoles couvrant chacune 1 voie;
- fixations sous ouvrage.

Les figures ci-dessous présentent ces différentes grandes familles d'insertion.



Figure 11 : Exemple poteaux latéraux avec suspension sous transversal (Tramway de Dijon)



Figure 12 : Exemple ancrages en façade latéraux avec suspension sous transversal (Tramway de Valenciennes)



Figure 13 : à gauche, photo d'un ancrage en façade avec tige scellée – (Tramway de Strasbourg), à droite photo d'un ancrage avec plaque de répartition (Tramway de Montpellier)



Figure 14 : Exemple poteau latéral avec consoles couvrants les 2 voies tramway (Tramway de Dijon)



Figure 15 : Exemple poteau axial avec 2 consoles couvrant chacune 1 voie tramway (Tramway de Valenciennes)

Nota : en arrière-plan sur la photo, est visible une transition poteau axial/poteau latéral pour franchir une courbe.



Figure 16 : Exemple d'accrochage sous ouvrage avec bras de rappel compensé (Tramway d'Orléans)

Afin d'obtenir la meilleur insertion de la LAC dans le site traversée, différents types d'insertion sont utilisés.

L'insertion des lignes aériennes de contact est également fonction de la position d'insertion de la plateforme tramway. Les coupes d'insertion de la LAC par séquence homogène du tracé sont représentées dans le rapport d'étape livrable 1.2 Insertion – Annexe A.

Les types principaux d'insertion préconisés par séquence homogène pour le tracé Est-Ouest sont les suivants :

- terminus Estimauville : poteau latéral avec 1 console 2 voies;
- boulevard Saint-Anne : poteau central avec 2 consoles 1 voie;
- chemin de la Canardière :
  - poteau latéral avec 1 console 2 voies;
  - poteau central avec 2 consoles 1 voie (à partir du boulevard Henri-Bourassa);
- boulevard des Capucins : poteau latéral avec 1 console 2 voies;
- boulevard Jean-Lesage : poteau latéral avec 1 console 2 voies;
- rue Saint-Paul : supports bilatéraux (Ancrages façades/poteaux) avec transversal;
- boulevard Charest est : supports bilatéraux (Ancrages façades/poteaux) avec transversal ;
- boulevard Charest ouest :
  - supports bilatéraux (Ancrages façades et/ou poteaux) avec transversal;
  - poteau central avec 2 consoles 1 voie;
- autoroute/boulevard Charest :
  - poteaux latéraux avec 2 consoles 1 voie (à partir de la rue Marie-de-l'Incarnation);
  - puis poteau central avec 2 consoles 1 voie (à partir de l'avenue Saint-Sacrement);

- rue Frank-Carrel : poteau latéral avec console 2 voies;
- tracé entre les rues Frank-Carrel et la rue Jean-Durand : poteau latéral avec console 2 voies;
- rue Jean-Durand et rue Nicolas-Pinel : poteau latéral avec console 2 voies;
- chemin des Quatre-Bourgeois : poteau latéral avec console 2 voies;
- PEPS : poteau latéral avec console 2 voies;
- rue de la Médecine : poteau latéral avec console 2 voies;
- rue de la Foresterie : poteau latéral avec console 2 voies;
- autoroute Robert-Bourassa : poteau latéral avec console 2 voies;
- boulevard Laurier : poteaux latéraux avec 2 consoles 1 voie;
- avenue des Hôtels : poteau latéral avec 1 console 2 voies;
- route 132 :
  - poteau central avec 2 consoles 1 voie;
  - puis poteaux latéraux avec 2 consoles 1 voie, avant d'accéder au pont de Québec.
- pont de Québec : accrochage sous ouvrage ;
- route 132 : rédaction réservée. Sera complété à partir des plans d'insertion en cours;
- boulevard Rive-Sud : poteau central avec 2 consoles 1 voie..

Les types principaux d'insertion préconisés par séquence homogène pour le tracé Nord-Sud sont les suivants :

- terminus 41<sup>e</sup> Rue : poteau LAC latéral avec console 2 voies;
- 1<sup>re</sup> Avenue : poteau LAC central avec 2 consoles 1 voie;
- 18<sup>e</sup> Rue – avenue Eugène-Lamontagne : poteau LAC central avec 2 consoles 1 voie ou poteau LAC latéral avec 1 console 2 voies suivant la variante d'insertion;
- boulevard Wilfrid-Hamel : poteau LAC latéral avec console 2 voies;
- rue de la Pointe-aux-Lièvres : poteau LAC central avec 2 consoles 1 voie;
- rue Dorchester (1 voie tramway, sens de circulation Nord - Sud) : poteau avec 1 console 1 voie;
- rue de la Couronne (1 voie tramway, sens de circulation Sud - Nord) : poteau avec 1 console 1 voie;
- pour la variante avec les 2 voies tramway rue Dorchester : poteau LAC latéral avec console 2 voies;
- côte d'Abraham :
  - poteau LAC latéral avec console 2 voies;
  - puis dans le tunnel, LAC de type profil aérien de contact (PAC) fixé en sous face du tunnel.
- tunnel : LAC de type profil aérien de contact (PAC) fixé en sous face du tunnel;
- terminus Grand Théâtre:
  - si en tunnel, LAC de type PAC;
  - si en surface, poteaux avec consoles.

Ponctuellement, l'insertion de la LAC sera adaptée pour franchir les points singuliers et contraignants; intersection routière par exemple.

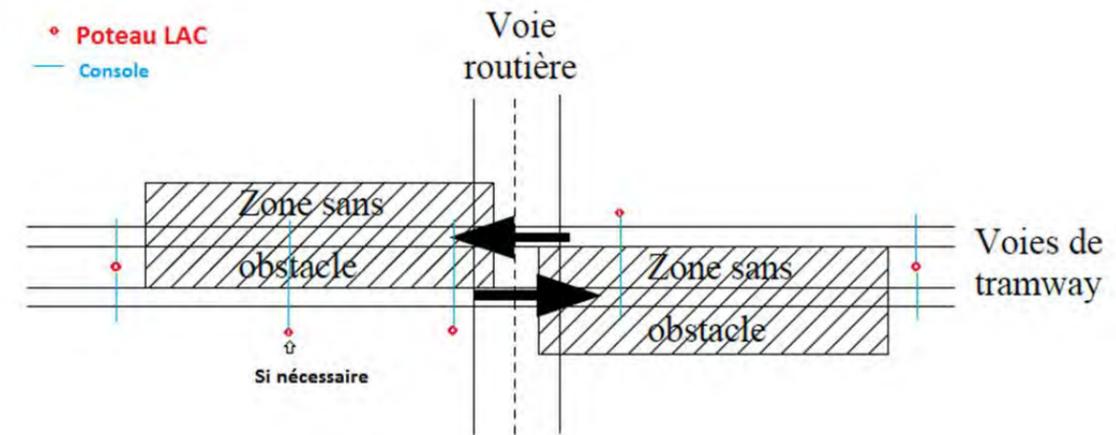


Figure 17 : Exemple de positionnement des poteaux LAC aux intersections

Pour le passage sous certains ouvrages d'art existants, il sera nécessaire d'abaisser la hauteur de la ligne aérienne de contact.

Les points singuliers principaux sont :

- chemin de la Canardière – passage sous les voies CN : la limitation de hauteur du gabarit des véhicules routiers chemin de la Canardière ne sera pas modifiée par rapport à l'existant.
- boulevard des Capucins – Passage sous la 2<sup>e</sup> bretelle de l'autoroute Dufferin-Montmorency : il sera nécessaire de mettre en place une limitation de hauteur du gabarit routier pour la traversée de la plateforme tramway sur l'accès au droit de la voie de service PAPIERS WHITE BIRCH (au Sud de l'ouvrage d'art).

En appliquant la norme EN 50122-1, le gabarit en hauteur maximal autorisé pour les véhicules routiers sera de l'ordre de 5,3 – 5,4 m.

- route 132 – pont Chemin Saint-Louis : la hauteur libre sous ouvrage est faible (4,90 m). Cet ouvrage doit être refait. Il est conseillé que le nouvel ouvrage dégage un tirant d'air sous ouvrage plus important, similaire à celui du pont de la bretelle avenue des Hôtels (ouvrage situé sur le même axe) qui est 6,95 m.
- pont de Québec : le scénario à 3 voies (2 voies banales et 1 voie centrale réversible) impliquera un fort abaissement de la hauteur de la LAC pour la voie est due aux poutres inclinées de la structure du pont. Il en découlera une limitation de hauteur pour les véhicules routiers autorisés sur la voie est tramway à ~3,20 m
- rue de la Pointe-aux-lièvres – passerelle Adrien-Pouliot : l'hypothèse est que cette passerelle sera démolie avant la venue du tramway, et qu'elle ne sera pas reconstruite).

En lien avec l'insertion et le pré-dimensionnement traction, les principales préconisations techniques pour la ligne aérienne de contact (LAC) sont les suivantes :

- utilisation de trois types de LAC :
  - LAC unifilaire avec 1 fil de contact cuivre de 150 mm<sup>2</sup> pour le tracé Nord/Sud hors tunnel, et pour le tracé Est/Ouest de la rue de l'Aqueduc au terminus est,



Figure 18 : Exemple LAC unifilaire

- profil aérien de contact (PAC) pour le tronçon en tunnel sur la branche sud;

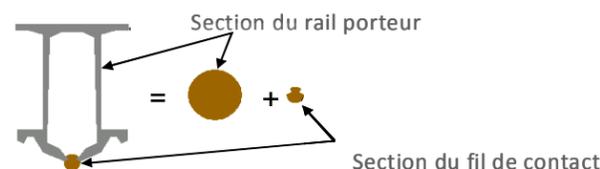


Figure 19 : Coupe d'un profil aérien de contact (PAC)

- Caténaire légère avec 1 fil de contact cuivre de 150 mm<sup>2</sup> associé à un câble porteur de 150 mm<sup>2</sup> cuivre, pour le tracé Est/Ouest de la rue de l'Aqueduc au terminus Lévis Desjardins.



Figure 20 : Exemple d'une caténaire légère (Tramway rapide de desserte de l'aéroport de Lyon Saint Exupéry)

La caténaire légère offre une très bonne qualité de captation pour les vitesses de circulations élevées (≥ 50 km/h).

La LAC bifilaire (avec 2 fils de contact) n'a pas été retenue car elle favorise l'accumulation de la neige sur les fils de contact (2 câbles situés en parallèle à une faible distance).

- technologie LAC régularisée (avec compensation de la dilation), avec des portées maximales (espacement longitudinal entre les supports) limitées à 48-50 mètres, compte tenu des conditions climatiques locales;
- type de poteaux LAC : préconisation de poteau acier type « H » (profilé HE du commerce) offrant le meilleur ratio coût/encombrement à la base.

Le lecteur est invité à consulter le 1<sup>er</sup> sous-livrable 1.3 Critères de conception et le 3<sup>e</sup> sous-livrable 1.3 Ligne aérienne de contact pour de plus amples informations sur la ligne aérienne de contact.

#### 4.2 PREDIMENSIONNEMENT TRACTION

Un pré-dimensionnement des installations traction a été réalisé afin d'identifier le nombre de sous-stations nécessaires pour alimenter le tramway. Il a été effectué pour l'horizon d'exploitation des rames en version allongées à 43 mètres.

	Moyennes			
	Simple	Quad.	1mn	10mn
SST Terminus Estimauville	500	600	800	600
SST Bardy	800	800	1000	800
SST Capucins	900	900	1000	900
SST Aqueduc	900	900	1000	900
SST Lescarbot	1000	1100	1300	1100
SST PEPS	1300	1400	1800	1400
SST Carrel	1200	1300	1700	1300
SST CHU	1300	1400	1600	1400
SST Nord Pont de Québec	1100	1200	1400	1100
SST Sud Pont de Québec	600	700	900	600
SST Lévis 7	700	800	1000	700
SST Lévis 5	800	900	1200	900
SST Lévis 4	900	1000	1300	1000
SST Lévis 3	800	900	1300	900
SST Lévis 2	800	900	1200	900
SST Lévis 1	800	800	1200	800
SST Terminus Lévis	600	700	1000	700
SST Terminus 41 <sup>e</sup> rue	500	600	800	600
SST 1st Avenue	700	800	900	700
SST Pointe-aux-Lievres	900	1000	1100	900
SST Dorchester N-S	1700	1700	2000	1800
SST Youville	1600	1600	1800	1600
SST Grand Théâtre	800	800	900	800
Légende :	1200	Supérieur à In		
	800	Supérieur à 2 / 3 In		
	400	Inférieur à In		

Figure 21 : Mode nominal – Rames de 43 m – Courants (en A) débités par les sous-stations en heure de pointe

Il résulte de ces résultats que pour les sous-stations PEPS, Carrel, CHU, Dorchester et Youville, il sera nécessaire d'installer 2 groupes redresseurs dans chacune de ces sous-stations.

En activant sur le matériel roulant, le freinage par réinjection sur la ligne aérienne de contact, on observe une nette réduction de la consommation des sous-stations. Ce phénomène est particulièrement intéressant dans les zones à fortes déclivités. En effet l'activation de la fonction permet à un matériel roulant de réinjecter une partie variable de sa puissance de freinage à des rames voisines en phases de traction ; l'énergie est ainsi échangée entre les rames et ne sera pas consommée sur le réseau Moyenne Tension. Ce phénomène est très efficace en période de pointes d'exploitation du tramway avec un nombre élevé de rames en ligne.

Sous-station	Gain (%kW)
SST Terminus Estimauville	10%
SST Bardy	20%
SST Capucins	20%
SST Aqueduc	20%
SST Lescarbot	10%
SST PEPS	20%
SST Carrel	20%
SST CHU	20%
SST Nord Pont de Québec	10%
SST Sud Pont de Québec	20%
SST Levis 7	10%
SST Levis 5	20%
SST Levis 4	20%
SST Levis 3	20%
SST Levis 2	10%
SST Levis 1	10%
SST Terminus Levis	0%
SST Terminus 41 <sup>e</sup> rue	0%
SST 1st Avenue	10%
SST Pointe-aux-Lievres	10%
SST Dorchester N-S	20%
SST Youville	30%
SST Grand Théâtre	20%

Figure 22 : Mode nominal – Rames de 43 m – Gain par sous-stations avec la réinjection MR

En période de pointe, le gain le plus important est obtenu pour la sous-station Youville.

Les modes dégradés d'alimentation traction ont également été simulés. Les résultats obtenus conduisent à préconiser des alimentations MT fiabilisées pour :

- toutes les sous-stations qui sont en bi-groupe;
- ainsi que pour les sous-stations encadrant le pont de Québec.

En synthèse, les préconisations découlant du pré-dimensionnement traction sont les suivantes :

- sous-stations et alimentations amont

SST	Puissance redresseurs	Fiabilisation HT
SST Terminus Estimauville	900 kW	✗
SST Bardy	900 kW	✗
SST Capucins	900 kW	✗
SST Aqueduc	900 kW	✗
SST Lescarbot	900 kW	✗
SST PEPS	<b>2*900 kW</b>	✓
SST Carrel	<b>2*900 kW</b>	✓
SST CHU	<b>2*900 kW</b>	✓
SST Nord Pont de Québec	900 kW	✓
SST Sud Pont de Québec	900 kW	✓
SST Levis 7	900 kW	✗
SST Levis 5	900 kW	✗
SST Levis 4	900 kW	✗
SST Levis 3	900 kW	✗
SST Levis 2	900 kW	✗
SST Levis 1	900 kW	✗
SST Terminus Levis	900 kW	✗
SST Terminus 41 <sup>e</sup> rue	900 kW	✗
SST 1st Avenue	900 kW	✗
SST Pointe-aux-Lievres	900 kW	✗
SST Dorchester N-S	<b>2*900 kW</b>	✓
SST Youville	<b>2*900 kW</b>	✓
SST Grand Théâtre	900 kW	✗

Figure 23 : Rames de 43 m – Tableau de synthèse des préconisations sous-stations

- configurations LAC et feeders

- tracé Est-Ouest : terminus Estimauville à la station Aqueduc : LAC de type unifilaire (1 fil de contact cuivre 150 mm<sup>2</sup>) + câble feeder enterré (base 2\*400 mm<sup>2</sup> alu);

- tracé Est-Ouest : de la station Aqueduc au terminus Desjardins à Lévis : caténaire légère (1 fil de contact cuivre 150 mm<sup>2</sup> et 1 câble porteur cuivre 150 mm<sup>2</sup>), ou autre configuration présentant la même section équivalente de cuivre étalon;
- tracé Nord-Sud : pour le tronçon hors tunnel, LAC de type unifilaire (1 fil de contact cuivre 150 mm<sup>2</sup>) + câble feeder enterré (base 2\*400 mm<sup>2</sup> alu);
- tracé Nord-Sud : pour le tronçon en tunnel : LAC de type Profil Aérien de Contact (profilé aluminium + 1 fil de contact cuivre de 150 mm<sup>2</sup>).

Un travail d'optimisation a été mené pour identifier les installations de traction qui pourraient être différées pour l'exploitation à court et moyen terme avec des rames de 33 mètres de long.

Il en résulte la possibilité de différer la mise en œuvre des installations suivantes :

- la sous-station au sud du pont de Québec,
- le feeder enterré qui ne se révèle pas indispensable (sans feeder, les niveaux de tension restent à des niveaux corrects, même en mode dégradé).

Le fait de différer l'installation du feeder facilitera de surcroît les opérations de dégivrage de la LAC (simplifie le dégivrage des fils de contact par circulation de courant de traction). Cette configuration court-moyen terme permettra d'identifier si les conditions météorologiques locales nécessitent l'utilisation de ce système de dégivrage en complément des mesures de prévention classiques (poursuite de la circulation des rames mêmes en dehors des horaires d'exploitation). Si cela est le cas, lors du rajout du feeder pour la passer à la configuration long terme, les connexions feeder / fils de contact devront être effectuées au travers de coffret de sectionnement commandable à distance depuis le PCE.

Pour les sous-stations identifiées en bi-groupe dans la configuration long terme, il est conseillé d'installer les 2 groupes redresseurs dès la construction initiale de la sous-station pour :

- faciliter la couverture des modes dégradés dans la configuration moyen terme. Cela permet d'avoir une sous-station fiabilisée et donc de gagner sur les feeders (voir ci-dessous).
- éviter de devoir réaliser des travaux de modification de la sous-station sous exploitation.

Le lecteur est invité à consulter le 2<sup>e</sup> sous-livrable 1.3 - Hypothèses pour le pré-dimensionnement traction et l'annexe associée Résultats simulations traction.

### 4.3 LOCAUX SOUS-STATIONS DE TRACTION

Les équipements de sous-stations de traction sont implantés dans des locaux techniques. Les caractéristiques techniques principales pour ces locaux techniques sont :

- pour un local en surface, dimensions type d'environ 8 m \* 13 m (~ 100 m<sup>2</sup>);
- pour un local en enterré, dimensions type d'environ 8 m \* 18 m (~150 m<sup>2</sup>), intégrant les trémies d'accès (personnel et matériel) et de ventilation du local. En cas de contraintes d'emprise, ces locaux enterrés peuvent être positionnés sous la plateforme tramway, avec les trémies d'accès positionnés dans les séparateurs de part et d'autre de la plateforme tramway.
- hauteur intérieure du local de 3 m, auquel il convient d'ajouter environ 1 m pour les caniveaux ou faux plancher;

- porte principale du local accessible pour la livraison des équipements, puis pour l'entretien des équipements de la sous-station.

La livraison des équipements est effectuée à l'aide de camion, avec :

- soit 1 seul véhicule (1 camion de transport avec bras de manutention), si le véhicule a la possibilité de venir jusqu'à la porte pour un déchargement direct;
- soit avec 2 véhicules (1 camion de transport + 1 camion grue), s'il n'est pas possible de s'approcher suffisamment de la porte.

L'insertion du local technique est également envisageable en rez-de-chaussée de bâtiment. Néanmoins, dans le cas où ce type de localisation est envisagé, il convient néanmoins de respecter quelques contraintes :

- profondeur de ~1 mètre pour les caniveaux en dessous du niveau du sol pour permettre l'arrivée de la multitubulaire dans le local;
- plus une hauteur libre de 3 mètres à l'intérieur du local (sans compter les caniveaux);
- structure du local coupe-feu, vis-à-vis des autres tiers du bâtiment. Le local technique devra également être équipé d'un système de sécurité incendie, de clapets coupe-feu sur les ouvrants utilisés pour la ventilation du local technique, etc.

Ces contraintes principales limitent souvent les possibilités d'insertion dans des bâtiments existants. Par contre, l'insertion en rez-de-chaussée de bâtiment est plus facilement envisageable dans le cas de la construction d'un nouveau bâtiment.

Les critères techniques principaux pour la localisation des locaux techniques de sous-stations sont :

- les positions théoriques découlant des simulations de traction présentées au paragraphe précédent,
- en transversal par rapport au tracé tramway : privilégier une implantation à moins de 50 mètres du tracé tramway.
- les liaisons traction entre les sous-stations et la ligne doivent être courtes pour limiter les chutes de tension traction, et par conséquent limiter les pertes d'énergie dans les câbles.
- en longitudinal par rapport au tracé tramway : latitude de l'ordre de 100 mètres;
- dans le cas d'un décalage d'un local de sous-stations plus important, il convient de faire un rattrapage progressif avec les sous-stations encadrantes pour conserver un bon équilibre de puissance entre les sous stations.

Pour pallier les difficultés d'insertion de ces locaux techniques, l'estimation des coûts d'investissement est faite en prévoyant la construction de locaux techniques enterrés dans les zones, les contraintes et la construction de locaux techniques en surface pour les autres zones.

Le lecteur est invité à consulter le livrable 1.6 pour plus d'information sur la répartition locaux enterrés/locaux en surface.

### 4.4 RÉCUPÉRATION DE L'ÉNERGIE DE FREINAGE

Les rames de tramway sont équipées de différents systèmes de freinage :

- un système de freinage mécanique sécuritaire « conventionnel » (généralement de type freins à disques);

- un système de freinage sécuritaire complémentaire permettant de réduire les distances d'arrêt, en cas de freinage d'urgence. Ce système est généralement basé sur la technologie des patins magnétiques embarqués;
- un système de freinage électrique. Lors des freinages ou décélérations, les moteurs sont utilisés en générateur d'énergie électrique, ce qui exerce un effort de freinage.

Le système de freinage électrique est généralement utilisé en priorité pour le matériel roulant de conception récente. Il permet de réduire l'utilisation et donc l'usure du système de freinage mécanique conventionnel. Pour cela tout ou partie de la chaîne de traction embarquée est réversible. Lors des freinages ou décélérations, les moteurs sont utilisés en générateur d'énergie électrique, ce qui exerce un effort de freinage. La réversibilité de la chaîne de traction embarquée est systématiquement proposée par les constructeurs de matériel roulant. Elle permet de réduire l'usage et donc l'usure du système de freinage mécanique.

L'énergie électrique générée peut être :

- dissipée dans les rhéostats embarqués sur le matériel roulant.

Cette solution est proposée par de nombreux constructeurs car elle permet de limiter l'utilisation du freinage mécanique;

- réinjectée sur la ligne aérienne de contact (afin d'être absorbée par un consommateur potentiel se trouvant à proximité).

Une régulation de la réinjection est faite à bord de la rame pour limiter l'élévation de la tension LAC. Cette fonction de régulation devra être optimisée. Lorsque la LAC n'est pas suffisamment « réceptive » par rapport à la puissance de freinage réinjectée, le système de régulation embarqué intervient pour limiter la puissance réinjectée sur la LAC et dissiper le surplus de puissance dans les rhéostats embarqués.

- stockée à bord du matériel roulant, si la rame est équipée d'un tel système de stockage.

En complément, pour améliorer la réceptivité de la LAC, les solutions technologiques disponibles sont :

- la réduction de la résistance linéique de la LAC,
- la récupération d'énergie dans les sous-stations de traction.

Le tableau suivant synthétise les risques des différentes technologies

	Technique	Industriel	Temporel	Contractuel	Administratif (homologation)	Financier
MR : Rhéostats embarqués	0	0	0	0	0	0
MR : Réinjection sur LAC	0	0	0	0	0	0
MR : Réinjection optimisée sur LAC	*	*	0	0	0	*
SST réversible (redresseur + onduleur)	--	--	--	--	--	*
SST réversible (intégrée)	*	*	--	--	--	*
SST avec volant d'inertie	**	**	**	--	*	*
SST avec super-capacité	*	*	*	--	--	*
MR avec volant d'inertie	**	**	**	--	*	**
MR avec super-capacités	**	--	*	--	--	*
MR avec batteries électrochimiques	***	--	*	--	--	*

\*\*\* Risques importants      \*\* Risques moyens      \* Risques faibles  
 -- Neutre      0 Solution de référence

Le tracé retenu pour le projet tramway comporte plusieurs zones avec de forte pente et des dénivelées importantes. Les plus significatives sont localisées sur la branche Sud et dans la zone Nérée-Tremblay.

L'énergie de freinage sur ces zones va être très importante. Pour être efficace les dispositifs de récupération de l'énergie de freinage doivent donc recevoir une quantité d'énergie très importante. Cette particularité rend les solutions technologiques avec stockage de l'énergie à bord du matériel roulant peu compétitives. En embarqué, il est difficile d'obtenir des capacités de stockages élevées compte tenu des problématiques d'encombrement et de masse. Lesquelles masses requièrent un surcoût d'énergie pour être transportées.

Pour les zones avec de forte pente/dénivelée, les solutions technologiques les plus efficaces sont les sous-stations réversibles par onduleur relié au réseau amont. Ces solutions sont basées sur le

principe d'échange de puissance instantané (critère dimensionnant des installations). La notion d'énergie (intégrant la durée) intervient très peu dans le dimensionnement, hormis en cas de surcharge exceptionnelle.

Ce système est donc opérationnel quelle que soit la configuration d'exploitation, même en cas de plusieurs circulations de rames consécutives à la descente (cas quotidien des débuts et fin de service d'exploitation par exemple). La solution onduleur est maîtrisée, peu risquée, infiniment réceptrice et demandant peu de maintenance, contrairement à d'autres solutions fixes comme les super-capacités ou les volants d'inertie.

Sa mise en œuvre sur le projet de tramway des villes de Québec et de Lévis ne sera envisageable qu'avec un changement du cadre réglementaire et tarifaire d'Hydro-Québec. Selon le cadre réglementaire et tarifaire actuel, la réinjection dans le réseau n'est pas permise pour le type de raccordement nécessaire pour une sous-station réversible (La réinjection n'est envisageable que pour les clients résidentiels).

Le lecteur est invité à consulter le 5<sup>e</sup> sous-livrable 1.3 pour de plus amples informations sur la récupération de l'énergie de freinage

#### 4.5 CENTRE DE COMMANDE ÉNERGIE

Pour assurer une très bonne disponibilité du système tramway, il est nécessaire que les installations électriques du tramway soient gérées et supervisées à partir d'un Centre de Commande Énergie électrique tramway.

Cette gestion centralisée permet :

- de réagir très rapidement sur incident ou en fonction des conditions particulières d'exploitation (supervision temps réel);
- de faire de l'analyse approfondie et de l'aide à la maintenance (supervision en temps différé).

L'architecture générale préconisée pour la commande des installations électriques du tramway est représentée sur la figure suivante.

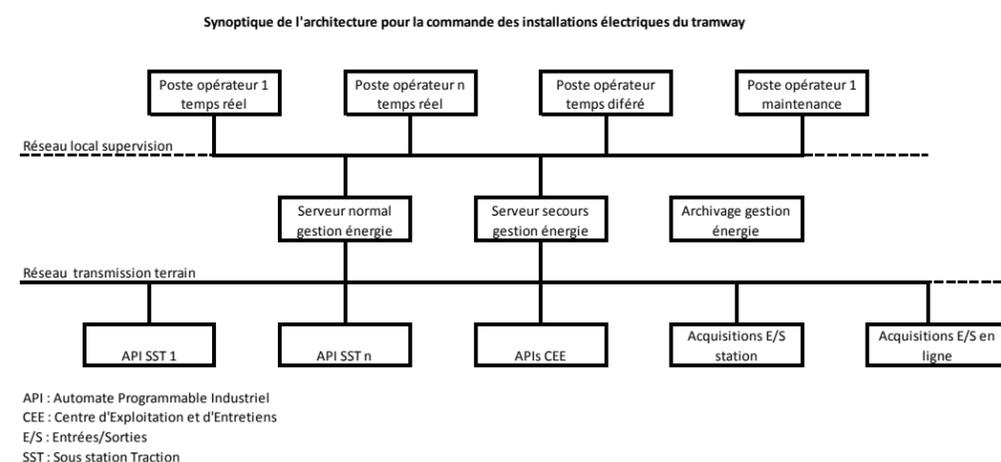


Figure 24 : Synoptique architecture Commande Centralisée des installations électriques du tramway

La partie centrale (serveurs et postes opérateurs) de la commande centralisée énergie électrique peut être mutualisée avec l'architecture de la Gestion Technique Centralisé du tramway.

En complément de cette architecture « informatisée », il est préconisé de mettre en œuvre un dispositif filaire de sécurité pour la mise hors tension des lignes aériennes de contact en cas d'urgence.

Le lecteur est invité à consulter le 4<sup>e</sup> sous-livrable 1.3 pour de plus amples informations sur le Centre de Commande Énergie.

#### 4.6 MISE À LA TERRE ET TRAITEMENT DES PERTURBATIONS HARMONIQUES ET DES COURANTS VAGABONDS

Le lecteur est invité à consulter le 6<sup>e</sup> sous-livrable 1.3 analyse mise à la terre et traitement des perturbations harmoniques pour de plus amples informations.

##### 4.6.1 Mise à la terre

Les règles et enjeux essentiels de la mise à la terre sont :

- D'assurer la sécurité des personnes vis-à-vis des risques électriques;
- De protéger les installations.

Le schéma général de principe des connexions des prises de terre et des conducteurs principaux de protection est le suivant :

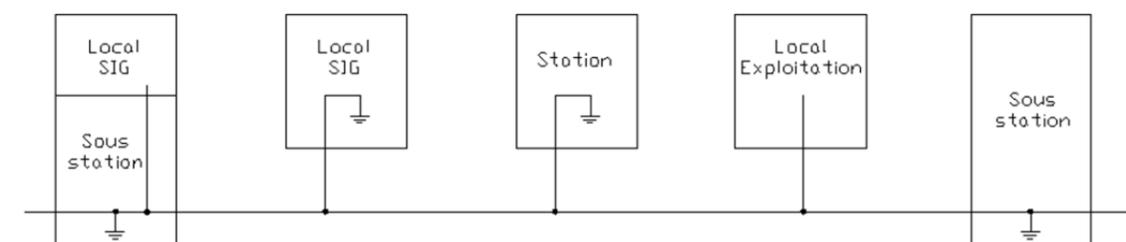


Figure 25 : Schéma général du réseau de terre

##### 4.6.2 Traitement des perturbations harmoniques

Les groupes redresseurs installés dans les sous-stations de traction du tramway convertissent la moyenne tension alternative en courant continu de traction. Ils génèrent des courants harmoniques sur le réseau moyenne tension.

Les taux de courants harmoniques générés dépendent de la technologie utilisée pour le groupe redresseur.

##### Retour d'expérience France

Les types de redresseur majoritairement mis en œuvre dans les sous-stations tramway en France sont :

- redresseurs à diodes;
- avant 2000 : quasi exclusivement des redresseurs hexaphasés;
- 2000 – 2010 : des redresseurs hexaphasés et des redresseurs dodécaphasés;
- depuis 2010 : tendances vers les redresseurs dodécaphasés.

Nous n'avons pas connaissance de problème de perturbation liée aux harmoniques sur les installations tramway, ni sur les installations des clients raccordés sur les mêmes artères HTA que les sous-stations tramway. Néanmoins, cela n'exonère pas pour les nouvelles installations de la mise en place éventuelle de filtre pour respecter les contraintes réglementaires et normatives.

Sur les métros en France, de nombreuses lignes sont également équipées avec des redresseurs hexaphasés (de plus forte puissance que ceux mis en œuvre dans les sous-stations tramways). À notre connaissance, le constat est le même.

Nota : pour les groupes redresseurs de très fortes puissances utilisés dans le ferroviaire (5 à 7 MW de puissance nominale unitaire) alimentés en 20 kV, la technologie double dodécaphasée commence à être mise en œuvre mais est plus onéreuse (double quasiment le prix du groupe redresseur).

### Proposition

Pour le projet de tramway des villes de Québec et de Lévis, il est préconisé de prévoir des redresseurs dodécaphasés afin de limiter les courants harmoniques générés sur la moyenne tension.

Les études détaillées permettront de vérifier que les limites d'émissions d'harmoniques définies dans la norme Hydro-Québec C.25-01 « Exigences techniques relatives à l'émission d'harmoniques par les installations de clients raccordées au réseau de distribution d'Hydro-Québec » sont respectées.

En 1<sup>re</sup> approche, la norme européenne EN 50329 « Installations fixes – Transformateurs de traction » donne les valeurs principales du contenu harmonique du courant (en se basant sur les essais effectués sur des transformateurs couplés aux différents montages de convertisseurs).

Les valeurs mentionnées pour les principaux contenus harmoniques en courant pour un redresseur dodécaphasés sont les suivants :

- rang 11 4,5 %;
- rang 13 2,9 %;
- rang 23 0,9 %;
- rang 25 0,8 %.

Ces valeurs correspondent à des valeurs réduites (pourcentage du courant harmonique rang h par rapport au courant fondamental).

Compte tenu de l'effet réducteur lié aux impédances (impédance du transformateur du groupe redresseur par rapport à l'impédance du réseau moyenne tension au point d'alimentation de la sous-station), les taux d'harmonique de tension générés sur le réseau moyenne tension seront beaucoup plus faibles que les taux d'harmoniques de courant mentionnés ci-dessus.

### 4.6.3 Traitement des courants vagabonds

Le terme « courant vagabond » désigne les courants électriques qui circulent dans le sol et proviennent soit de réseaux de traction électrique à courant continu (chemins de fer, tramway, etc.), soit d'installations électriques individuelles fixes ou mobiles (usine de raffinage électrolytique, de galvanoplastie, postes à soudure, etc.), soit des courants telluriques.

Ces courants sont la plupart du temps variables dans leur intensité, leur direction et le trajet qu'ils parcourent. C'est pour cette raison qu'on les appelle « courants vagabonds ».

L'alimentation des rames de tramways est assurée par les groupes redresseurs qui injectent un courant dans la LAC et qui revient aux postes de redressement par les rails de roulement. Ce retour des courants de traction vers les PR peut générer des courants vagabonds. La figure ci-dessous illustre le phénomène.

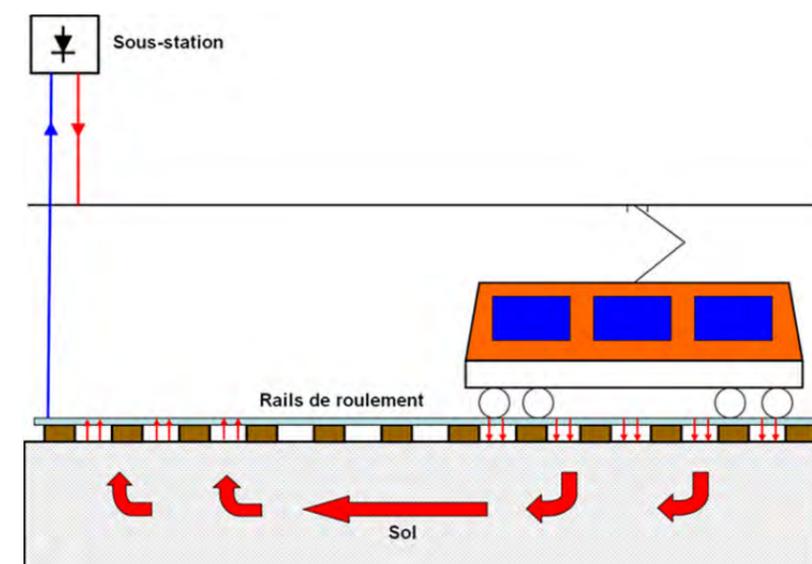


Figure 26 : Phénomène des courants vagabonds

Ce phénomène est issu du caractère non parfaitement isolé des rails de roulement. La localisation et l'intensité des courants vagabonds dépendent de plusieurs facteurs, dont :

- l'isolation entre les rails et le sol;
- la résistance longitudinale de la voie ferrée;
- l'intensité du courant de retour traction;
- la position de la rame.

Nota : la ligne aérienne de contact est installée avec un double isolement. Le courant de fuite traction du positif est donc marginal.

Lors de la construction d'une ligne de transport avec traction électrique en courant continu, il convient donc de prendre des précautions pour limiter l'émission de courants vagabonds. Pour cela,

il est préconisé de réaliser des actions préventives, complétées des actions constructives, et si nécessaire, par des actions curatives en cas de détection de courants vagabonds.

En phase conception (Avant-Projet et phases suivantes), il est conseillé que chaque propriétaire de réseau établisse un état des lieux de ses installations vis-à-vis des courants vagabonds, pour ses installations à proximité du tracé du tramway. Le terme « propriétaire de réseau » est à prendre au sens large.

Pour les installations du tramway, afin de limiter les courants vagabonds émis par le tramway et protéger les installations tramway vis-à-vis des courants vagabonds provenant d'autres sources, des exigences doivent être prises en compte dès la phase conception, dont notamment :

- voies ferrées :
  - rails soudés (réduction de la résistance linéique);
  - liaisons transversales de mise en parallèle des 4 files de rails de roulement (liaisons par câbles isolés). Mise en parallèle tous les 100 mètres.
- voies ferrées/Énergie de traction :
  - câbles isolés posés sous fourreaux pour les liaisons de retour du courant de traction aux sous-stations (liaisons entre les rails de roulement et le négatif des redresseurs);
  - point de mesure « négatif rail tramway » au droit de chaque station.
- voies ferrées/plateforme tramway : haut niveau d'isolation des rails de roulement;
- voies ferrées/signalisation ferroviaire : isolement des installations signalisation ferroviaire en contact avec les rails de roulement;
- plateforme tramway : drainage de la plateforme tramway pour évacuer l'eau;
- sous-station tramway :
  - point de mesure « négatif redresseur tramway » à chaque sous-station;
  - réservation d'un emplacement pour les concessionnaires (pour faciliter l'installation d'appareils de mesure, ou de protections).

Avant le démarrage des travaux, il est conseillé d'effectuer des mesures qui servent à établir un point de référence sur les perturbations par les courants vagabonds. Il peut s'agir de la prise en compte des mesures périodes que chaque propriétaire effectue, ou de nouvelles mesures contradictoires entre les propriétaires et le Maître d'Ouvrage du tramway, mesures effectuées par un organisme spécialisé.

À chaque étape des travaux, les dispositions constructives spécifiées en phase conception doivent être mises en œuvre et vérifiées. Les contrôles et mesures doivent être réalisés à l'avancement des travaux. Sinon par la suite la localisation de défaut sur de grand linéaire devient difficile, et les reprises de travaux qui peuvent en découler importantes. Des vérifications doivent également être faites en fin de chantier.

Avant la mise sous tension des installations traction du tramway, il est conseillé de faire une série de mesures, pour vérifier l'impact éventuel des travaux réalisés (déviations de réseaux, réalisation de la plateforme tramway, etc.). Ces mesures sont à réaliser dans les conditions les plus proches possibles que celles des mesures précédentes (avant le démarrage des travaux), à savoir : unités de lieu, de temps, de conditions météorologiques, de matériel, etc.

En phase essais et mise en service du tramway, des mesures sont faites pour vérifier si les actions préventives sont suffisantes pour ne pas générer de perturbations supplémentaires en configuration exploitation. Si les mesures font apparaître des zones à risque, il convient de mettre en œuvre des protections pour éviter la dégradation des structures susceptibles de subir les conséquences du phénomène.

Avant d'installer des protections définitives, il convient de faire des essais avec des protections provisoires et des mesures afin de vérifier l'efficacité de protection envisagée et que cela n'entraîne pas d'augmentation de courants vagabonds sur d'autres structures.

Plusieurs types de protection peuvent être employés :

- le drainage simple qui accepte la corrosion en la reportant vers une anode sacrificielle appelée « déversoir », qui est réalisée avec une masse métallique enterrée, d'un métal plus électro-négatif que la structure à protéger. Cette anode sacrificielle devra être contrôlée dans le temps et renouvelée si nécessaire. Ce mode de protection est réservé aux structures localisées.
- le drainage peut également être fait par le rajout d'une connexion entre la structure à protéger et le négatif redresseur (liaison avec une diode pour autoriser la circulation de courant que dans un sens).
- les protections actives. La protection peut être réalisée par installation de protection active (avec source d'alimentation auxiliaire) pour forcer la polarisation des structures à protéger.

En phase d'exploitation du tramway, les protections actives/passives éventuelles, ainsi que les structures elles-mêmes doivent être surveillées régulièrement, afin de prévenir de tout changement notable des caractéristiques des courants vagabonds. Ces mesures sont habituellement réalisées par les propriétaires en étroite collaboration avec l'exploitant du tramway.

## 4.7 EXPLOITATION ET ENTRETIEN DES ÉQUIPEMENTS ENERGIE ET LIGNES AÉRIENNES DE CONTACT

Le maintien du niveau de sécurité et de performance du système tramway implique la mise en œuvre d'une organisation rigoureuse pour l'exploitation et l'entretien des installations et équipements énergie et lignes aériennes de contact.

L'organisation mise en œuvre par l'exploitant devrait permettre de couvrir à minima les niveaux 1 à 3. Suivant l'organisation et les moyens mis en œuvre par l'exploitant, cela peut également couvrir le niveau 4 de maintenance. L'exploitant peut également envisager de sous-traiter tout ou partie de ces niveaux de maintenance. Le choix de traiter en interne ou de sous-traiter doit prendre en compte le critère temps d'intervention pour les opérations de maintenance curative.

Les interventions de niveau 5 ne sont généralement pas réalisées en interne par le personnel de l'exploitant, mais sous-traitées à différents intervenants spécialisés (les fabricants des équipements, des prestataires spécialisés, etc.) qui disposent de moyens tant humains que matériels adaptés. L'exploitant peut faire le choix de réaliser ces opérations en interne, mais cela nécessite de multiples compétences techniques et par conséquent, des effectifs importants pour pouvoir couvrir toutes ces compétences.

L'exploitation des installations énergie et lignes aériennes de contact du système tramway impliquent l'intervention de différentes équipes :

- des opérateurs intervenant au Poste de Commande Centralisé (PCC) du tramway pour la supervision énergie temps réel;
- des opérateurs intervenant sur la supervision énergie temps différée, pour l'analyse à froid d'incident, la formation, etc.;
- des opérateurs intervenant sur la supervision énergie d'aide à la maintenance;
- une équipe d'opérateurs d'entretien pour l'énergie;
- une équipe d'opérateurs d'entretien pour la ligne aérienne de contact;
- l'encadrement et les moyens associés.

Sur incident sur les installations énergie/LAC, les actions urgentes sont généralement traitées à partir du PCC. Les postes de supervision temps réel du PCC permettent de passer les commandes urgentes nécessaires :

- à la mise en sécurité des personnes (Exemple : demande des pompiers de mettre hors tension la LAC pour intervenir sur un incendie de bâtiment);
- à des modifications de configuration d'alimentation : commandes d'ouverture et/ou fermeture d'actionneurs énergie (Exemple : pour la mise en place d'un service provisoire);
- au rétablissement de l'exploitation (Exemple : mise sous tension de section électrique de LAC);
- au maintien de l'exploitation (Exemple : sur alarme température des équipements traction, intervention sur la configuration du réseau traction et/ou transmission de consignes particulières aux conducteurs sur les zones géographiques concernées).

L'entretien des équipements traction présente des particularités propres au système tramway (ou à toute installation de traction électrique). Les principes et connaissances électriques/électrotechniques de base sont nécessaires, mais en complément des principes et connaissances particulières doivent être mises en œuvre pour l'entretien du matériel traction.

1<sup>re</sup> particularité : les redresseurs (et sous-stations de traction) sont couplés en parallèle. L'intervention sur les équipements traction nécessite donc la mise en œuvre de procédures de protection particulière avant de pouvoir intervenir sur les équipements.

2<sup>e</sup> particularité : les redresseurs mettent en œuvre de l'électronique de puissance.

3<sup>e</sup> particularité : les disjoncteurs traction. Ceux-ci sont fortement sollicités (Nombre important de coupures avec des courants élevés ou avec de faibles courants). Chaque disjoncteur traction comporte une partie puissance avec déclencheur magnétique, et en complément un relais de protections numériques. Les interventions sur les relais de protections numériques nécessitent des logiciels spécifiques.

4<sup>e</sup> particularité : les asservissements entre sous-stations.

La ligne aérienne de contact du tramway est un assemblage d'éléments mécaniques. Les efforts et tensions mécaniques dans les éléments sont importants. Les interventions d'entretien doivent donc être réalisées en respectant des procédures. Il convient d'être vigilant car une ligne aérienne de contact est différente dans sa conception, son installation et sa maintenance qu'une ligne aérienne de distribution électrique. Néanmoins, entre les 2 types d'installations, certaines règles et procédures d'interventions sont similaires : protection contre les risques électriques avant toute intervention, câbles soumis à des efforts mécaniques importants, dilatation, etc.

L'entretien des installations et équipements de la ligne aérienne de contact du tramway nécessite des moyens et matériels spécifiques avec notamment des véhicules d'interventions.



Figure 27 : Photo d'un camion rail/route avec nacelle de grandes dimensions

Le lecteur est invité à consulter le 7<sup>e</sup> sous-livrable 1.3 – Exploitation et entretien énergie et lignes aériennes.

## 5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les conclusions et recommandations pour le mode d'alimentation du système tramway sont :

- tension traction de 750V courant continu;
- alimentation par ligne aérienne de contact sur la totalité du tracé;
- matériel roulant avec la fonction de réinjection sur la LAC lors des freinages par récupération;
- sous-stations traction dont une partie avec des bi-groupes et avec fiabilisation de l'alimentation amont comme indiqué ci-dessous.

SST	Puissance redresseurs	Fiabilisation HT
SST Terminus Estimauville	900 kW	✗
SST Bardy	900 kW	✗
SST Capucins	900 kW	✗
SST Aqueduc	900 kW	✗
SST Lescarbot	900 kW	✗
SST PEPS	<b>2*900 kW</b>	✓
SST Carrel	<b>2*900 kW</b>	✓
SST CHU	<b>2*900 kW</b>	✓
SST Nord Pont de Québec	900 kW	✓
SST Sud Pont de Québec	900 kW	✓
SST Levis 7	900 kW	✗
SST Levis 5	900 kW	✗
SST Levis 4	900 kW	✗
SST Levis 3	900 kW	✗
SST Levis 2	900 kW	✗
SST Levis 1	900 kW	✗
SST Terminus Levis	900 kW	✗
SST Terminus 41 <sup>e</sup> rue	900 kW	✗
SST 1st Avenue	900 kW	✗
SST Pointe-aux-Lievres	900 kW	✗
SST Dorchester N-S	<b>2*900 kW</b>	✓
SST Youville	<b>2*900 kW</b>	✓
SST Grand Théâtre	900 kW	✗