

ANNEXE A : NOTE D'HYPOTHÈSES D'INSERTION GÉNÉRALES



Étude de faisabilité technique du tramway de Québec et de Lévis

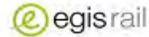


Dossier P-12-600-04

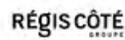
Consortium Tramway Québec-Lévis



SNC-LAVALIN



et ses partenaires



Intitulé du document

NOTE D'HYPOTHESES GENERALES

PRINCIPAUX COLLABORATEURS :

GAGNÉ, Sylvie
GENDREAU, André
JOLY, Olivier
MORAIS, Philippe

RÉDIGÉ PAR : André Gendreau

VÉRIFIÉ PAR : Olivier Joly et Philippe Morais

NUMÉRO DU DOCUMENT :		610879-0010-4REN-0001
REV.	DATE	TYPE DE RELÂCHE
PA	18 juillet 2012	Émission préliminaire pour commentaire
PB	8 août 2012	Émission pour commentaires
PC	4 septembre 2012	Édition préliminaire pour commentaires RTC

INDEX DES RÉVISIONS

RÉSERVÉ AU CONTRÔLEUR DE LA DOCUMENTATION

S O M M A I R E

1.	INTRODUCTION	7
2.	GLOSSAIRE ET DEFINITION	8
2.1	GLOSSAIRE	8
2.2	DEFINITION.....	9
3.	REFERENTIEL NORMATIF.....	10
3.1	ACCESSIBILITE DES PMR.....	10
3.2	LISTE DES REFERENCES NORMATIVES PRINCIPALES	12
4.	ELEMENTS LIES AU TRAMWAY	14
4.1	GABARIT HORIZONTAL, ENTRAXE DES VOIES ET LARGEUR DE LA PLATEFORME	14
4.1.1	Les différents gabarits	14
4.1.2	Coupe en section courante.....	15
4.1.2.1	<i>Sans poteau axial</i>	15
4.1.2.2	<i>Avec poteau axial</i>	17
4.1.2.3	<i>Site propre en position axial</i>	19
4.1.2.4	<i>Site propre en position latérale</i>	22
4.1.2.5	<i>Site banal</i>	24
4.1.2.6	<i>Site mixte</i>	24
4.1.3	Coupe en station.....	28
4.2	HYPOTHESES RELATIVES A LA VOIRIE, AUX TROTTOIRS ET PISTES CYCLABLES	29
4.3	GABARIT VERTICAL SOUS OUVRAGE	30
4.4	CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU TRACE DE VOIES	32
4.4.1	Rayon minimal en courbe sans dévers	33
4.4.2	La clothoïde	34
4.4.3	Dévers en courbe	35
4.4.3.1	<i>Valeur maximale du dévers</i>	35
4.4.3.2	<i>Calcul du dévers sur le cercle</i>	35
4.4.3.3	<i>Mise en oeuvre du dévers</i>	36
4.4.4	Définition des types de dévers	37
4.4.4.1	<i>Dévers voie par voie</i>	37
4.4.4.2	<i>Dévers coplanaire</i>	38
4.4.5	Profil en long de la voie	39
4.4.6	Relation entre tracé en plan et tracé en profil	40
4.4.7	Dispositions particulières.....	40
4.4.7.1	<i>Stations</i>	40
4.4.7.2	<i>Voies de manœuvre et terminus</i>	41
4.4.7.3	<i>Courbe et contre courbe</i>	41
4.4.8	Les surlargeurs	41
4.4.9	Les surhauteurs	42
4.4.10	Surlargeurs et surhauteurs dues au dévers	42
4.4.11	Ouvrages d'art	42
4.4.12	Synthèse des caractéristiques du tracé.....	42
4.4.12.1	<i>Gabarits</i>	42

4.4.12.2	Conditions de confort.....	43
4.4.12.3	Caractéristiques en plan.....	43
4.4.12.4	Caractéristiques en profil en long.....	43
4.5	STATIONS.....	43
4.5.1	Dimensions des quais.....	43
4.5.2	Traitement des quais.....	44
4.5.3	Interface entre les quais et le matériel roulant.....	45
4.5.4	Synthèse des caractéristiques en station :.....	46
4.6	MULTITUBULAIRE.....	47
4.6.1	Dimensionnement de la multitubulaire.....	47
4.6.2	Caractéristiques des fourreaux.....	48
4.6.3	Justification du positionnement de la multitubulaire.....	48
4.6.4	Traversées de voie.....	50
4.6.5	Franchissement des ouvrages d'art.....	51
5.	SEPARATEUR TRAMWAY/VOIRIE.....	53
5.1	SEPARATEURS TRAMWAY/VOIRIE URBAINE.....	53
5.1.1	Généralités.....	53
5.1.2	Uniquement visuels.....	53
5.1.3	Franchissables.....	53
5.1.4	Semi-franchissables.....	54
5.1.5	Infranchissables.....	54

FIGURES :

Figure 1 : Planche 1 de 8 – Voie unique en alignement droit & Voie double en alignement droit sans poteau axial.....	16
Figure 2 : Planche 2 de 8 – Voie double en alignement droit avec poteau axial de 35 cm de largeur.....	18
Figure 3 : Planche 3 de 8 – Site propre axial double sens, dans une emprise de 20 m.....	20
Figure 4 : Planche 4 de 8 – Circulation axiale double sens, dans une emprise de 70 m.....	21
Figure 5 : Planche 5 de 8 – Site propre en position latérale avec circulation automobile adjacent à contre sens du tramway dans une emprise de 20 m.....	23
Figure 6 : Planche 6 de 8 – Site banal dans une emprise de 20 m.....	25
Figure 7 : Planche 7 de 8 – Site banal dans une emprise de 15 m.....	26
Figure 8 : Planche 8 de 8 – Site mixte dans une emprise de 20 m.....	27
Figure 9 : Coupe de principe du gabarit vertical sous ouvrage.....	31
Figure 10 : Schéma de principe de mise en dévers.....	36
Figure 11 : Dévers voie par voie.....	37
Figure 12 : Dévers coplanaire.....	38
Figure 13 : Principe des surlargeurs en courbe.....	41
Figure 14 : Largeur piétonne utile en quai en mètre (N.B. : Sera revue en cours d'étude).....	45
Figure 15 : Alignement droit au delà des quais.....	46

Figure 16 : Coupe de principe d'une multitubulaire courants forts et faibles	50
Figure 17 : Schéma de principe de mise en place des fourreaux transversaux	51
Figure 18 : Principe d'étalement de la multitubulaire	52
Figure 19 : Exemples de séparateurs franchissables	54
Figure 20 : Exemples de séparateurs semi-franchissables.....	54

ANNEXE A : OBSERVATIONS SUR LES ABRIS DES STATIONS

1. INTRODUCTION

La présente note d'hypothèses générales a pour objectif de définir les hypothèses d'insertions des deux lignes de tramway de Québec et de Lévis, à utiliser dans le cadre du livrable 1.1 du lot 1 intitulé projet de référence, variantes et enjeux du tramway.

Ce document sera revu et mis à jour pendant l'étude de faisabilité technique du tramway pour tenir compte des commentaires reçus par les différents intervenants (villes, RTC, MTQ, représentants des PMR, ...) et des normes et standards applicables au Canada et en Amérique.

2. GLOSSAIRE ET DEFINITION

2.1 GLOSSAIRE

ABREVIATIONS	DEFINITIONS
AD	Alignement droit
BT	Basse tension
CERTU	Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques
CIRRIIS	Centre interdisciplinaire de recherche en réadaptation et intégration sociale
COLIAC	Comité de liaison pour l'accessibilité des transports et du cadre bâti
COLITRAH	Comité de liaison pour le transport des personnes handicapées
D	Dévers
D_p	Dévers pratique
D_{TH}	Dévers théorique
E	Excès de dévers
G	Gauche
GD	Gabarit dynamique
GLO	Gabarit limite d'obstacles
GS	Gabarit statique
G_v	Gabarit vertical du plus grand véhicule
G_0	Accélération transversale
G_1	Accélération transversale compensée par dévers
G_2	Accélération non compensée
HT	Haute tension
I	Insuffisance de dévers
LAC	Ligne aérienne de contact
MR	Matériel roulant

ABREVIATIONS	DEFINITIONS
PL	Poids lourd
PMR	Personne à mobilité réduite
SLT	Signalisation lumineuse tricolore
STRMTG	Service technique des remontées mécaniques et des transports guidés
VP	Véhicule particulier

2.2 DEFINITION

Site propre : Les voies du tramway sont exclusivement utilisées par le tramway.

Site mixte : Une des deux voies du tramway est utilisée par les véhicules particuliers (VL, PL, BUS).

Site banal : Les deux voies du tramway sont utilisées par les véhicules particuliers.

3. REFERENTIEL NORMATIF

3.1 ACCESSIBILITE DES PMR

Au-delà de la stricte application des normes, des règlements et des recommandations des organismes spécialisés (par exemple le COLIAC, anciennement dénommé COLITRAH), la démarche conceptuelle consiste à exploiter l'esprit et les principes des normes et règlements pour améliorer la qualité des aménagements (en termes de confort, de convivialité, de fonctionnalité).

TEXTES GENERAUX		
Arrêté	Art. 1 15/01/07	Portant application du décret n°2006-1658 du 21 décembre 2006 relatif aux prescriptions techniques pour l'accessibilité de la voirie et des espaces publics
Décret	N°95-260 08/03/1995	Commission consultative départementale de sécurité et d'accessibilité (CCDSA)
COLITRA H	14/06/1996	Prescriptions pour une meilleure accessibilité de tous les distributeurs automatiques de titre de transport
COLITRA H	30/01/1996	Prescriptions pour les PMR
Loi	2005-102 11/02/05	Egalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées
Décret	2006-138 9/02/06	Accessibilité du matériel roulant affecté aux services de transport public terrestre de voyageurs
Décret	2006-1657 21/12/06	Accessibilité de la voirie et des espaces publics
Décret	2006-1658 21/12/06	Prescriptions techniques pour l'accessibilité de voiries et des espaces publics et son décret d'application du 15 janvier 2007
Décret	N° 99-756 31 août 1999	Prescriptions techniques concernant l'accessibilité aux personnes handicapées de la voirie publique ou privée ouverte à la circulation publique

TEXTES GENERAUX

Décret	N° 99-757 31 août 1999	Accessibilité aux personnes handicapées de la voirie publique ou privée ouverte à la circulation publique, devant faire l'objet des aménagements prévus par la loi n°91-663 du 13 juillet 1991
Circulaire	23/06/00	Relative à l'accessibilité aux voies publiques par les personnes handicapées (Décrets et arrêté du 31 août 1999)
Guide	CERTU 1999	Guide Carrefours urbains
Guide	CERTU 1998	Guide
Guide	CERTU 1997	Mise à conformité des carrefours à feux
Guide	CERTU 1979	Aménagements de voirie en faveur des PMR
Guide	CERTU Décembre 2005	Usage des surfaces podo-tactiles par les personnes aveugles ou malvoyantes
Arrêté	13/07/09	Arrêté du 13 juillet 2009 relatif à la mise en accessibilité des véhicules de transport public guidé urbain aux personnes handicapées et à mobilité réduite

NORMES

NF S 32002	Dispositifs répéteurs de feux de circulation à l'usage des personnes aveugles ou malvoyant
NF P 98350	Cheminements – Insertion des handicapés – Cheminement piétonnier urbain – Conditions de conception et d'aménagement des cheminements pour l'insertion des personnes handicapés
NF P 98351	Cheminements – Insertion des handicapés – Éveil de vigilance – Caractéristiques et essais des dispositifs

NORMES		
Guide	Ville de Québec	Guide de conception géométrique des rues de la ville de Québec – 1 ^e édition – Janvier 2008
Guide	CIRRIS, Institut de réadaptation en déficience physique de Québec, ville de Québec	Guide pratique d'accessibilité universelle
Guide	RTC	Améliorer l'accessibilité du transport en commun régulier à Québec

3.2 LISTE DES REFERENCES NORMATIVES PRINCIPALES

TEXTES GENERAUX		
Guide	CERTU 2000	Relative à l'implantation, l'aménagement, au fonctionnement, à l'utilisation des voies de circulation en site propre des tramways urbains
Guide technique du STRMTG	GT3-DTW 04/04/2007	Préconisations sur l'implantation des obstacles fixes à proximité des intersections entre tramway et voirie routière
Circulaire	N° 2000-51 23/06/2000	Accessibilité à la voirie
Guide	CERTU réf. 5	Carrefours urbains
Guide	CERTU réf. 11	Aménagement de voirie pour les transports collectifs
Loi	5/07/1985	Amélioration de la situation des victimes d'accidents de la circulation
Guide	CERTU réf. 13 Avril 2000	Recommandations pour les aménagements cyclables

TEXTES GENERAUX		
Guide	CERTU réf 46 2004	Signalisation des aménagements et des itinéraires cyclables
Code	L 141-7 et L 131-2	Code de la voirie routière
NORMES		
NF EN 14811		Normes des rails à gorge destinés à l'usage des voies de tramways
UIC 864-4/0		Spécification technique pour la fourniture des éclisses isolantes de la voie
UIC 864.5.0		Semelles sous rail
NORMES		
CEI 913		Règles applicables aux lignes aériennes de contact électrique
NF EN 10034		Poutrelles I et H en acier de construction - Tolérances de forme et de dimensions (Indice de classement : A45-211)
NFEN 14752		Applications ferroviaires - Systèmes d'accès latéraux [partiellement suivie]
NFEN 50119		Applications ferroviaires – Pantographes : caractéristiques et essais Partie 2 : pantographes pour métros et tramways
NF EN 50163		Tensions d'alimentation des réseaux de traction
UIC 505-1		Matériel de transport ferroviaire - Gabarit de construction du matériel roulant
UIC 510-2		Matériel de transport ferroviaire - Gabarit cinématique des voitures et fourgons utilisés en service international (Bogies)

4. ELEMENTS LIES AU TRAMWAY

4.1 GABARIT HORIZONTAL, ENTRAXE DES VOIES ET LARGEUR DE LA PLATEFORME

4.1.1 Les différents gabarits

GABARIT STATIQUE (GS) :

Le gabarit statique en alignement droit est égal au gabarit nominal du véhicule 2,65 mètres pour le tramway de Québec et de Lévis. (N.B. Cette caractéristique sera, si requis, revue au cours de l'étude de faisabilité.)

Le gabarit statique en courbe est calculé à partir des données géométriques de la voie et en considérant que les axes des essieux des bogies sont sur l'axe de la voie. Ces valeurs ne prennent pas en compte les différents jeux et usures du matériel roulant et les jeux entre les roues et les rails.

Le gabarit statique ainsi défini caractérise l'influence des rayons des courbes sur les gabarits en général, et sur le gabarit limite d'obstacle (GLO) en particulier.

Gabarit Dynamique (GD) :

Les valeurs de gabarit dynamique dépendent uniquement du type de matériel et des conditions dans lesquelles il est utilisé (caractéristiques géométriques de la voie essentiellement sur un plan théorique, hors défauts d'infrastructure). Elles sont élaborées sur la base des données des constructeurs de matériel à partir d'hypothèses de tracé et de modalités d'exploitation prédéfinies (rayons, vitesses, dévers éventuel, etc.).

Le gabarit dynamique est déduit du gabarit statique (gabarit nominal du matériel posé à vide sur la voie) en ajoutant les jeux, les usures et les déplacements dynamiques :

- Déplacements de la caisse par rapport aux bogies
- Déplacements du bogie par rapport à la voie
- Usures des organes de liaison : suspensions, roues, etc.

Gabarit Limite d'Obstacle (GLO) :

Le Gabarit Limite d'Obstacle (GLO) d'un véhicule est le volume enveloppe maximal dans lequel s'inscrit le véhicule, tout en tenant compte des divers débattements dynamiques possibles. Il correspond au gabarit dynamique augmenté des lames d'air de sécurité (interfaces de sécurité supplémentaires).

Pour une pose béton, les lames d'air sont fixées à 150 mm en intérieur des courbes, extérieur des courbes, alignement droit et entre deux voies sans poteaux. Ces valeurs tiennent compte :

- De toutes les tolérances d'exécution, comme par exemple les tolérances de positionnement de l'axe des voies généralement situées dans un fuseau de ± 4 mm
- Des usures de rail (usure latérale maximale : 5 mm)
- Des déplacements/affaissements de la voie en exploitation engendrés par les efforts roue/rail
- Des risques de mouvement des installations fixes : supports de ligne, des candélabres, poteaux de signalisation, etc.

Le GLO définit l'espace à l'intérieur duquel aucun obstacle fixe ne doit être implanté, à l'exception toutefois du bord du quai, où l'on prend une valeur particulière compte tenu de la vitesse réduite du véhicule en station, de la bonne fondation et bonne liaison du quai avec la voie, limitant les déformations différentielles possibles.

Le GLO se développe ainsi au long du tracé de la ligne de tramway et il est intrinsèquement lié au véhicule concerné.

Toutes les coupes sont présentées en Alignement Droit (AD) et prennent en compte la circulation d'un tramway standard d'une largeur de 2,65 mètres avec un gabarit dynamique de 2,95 mètres.

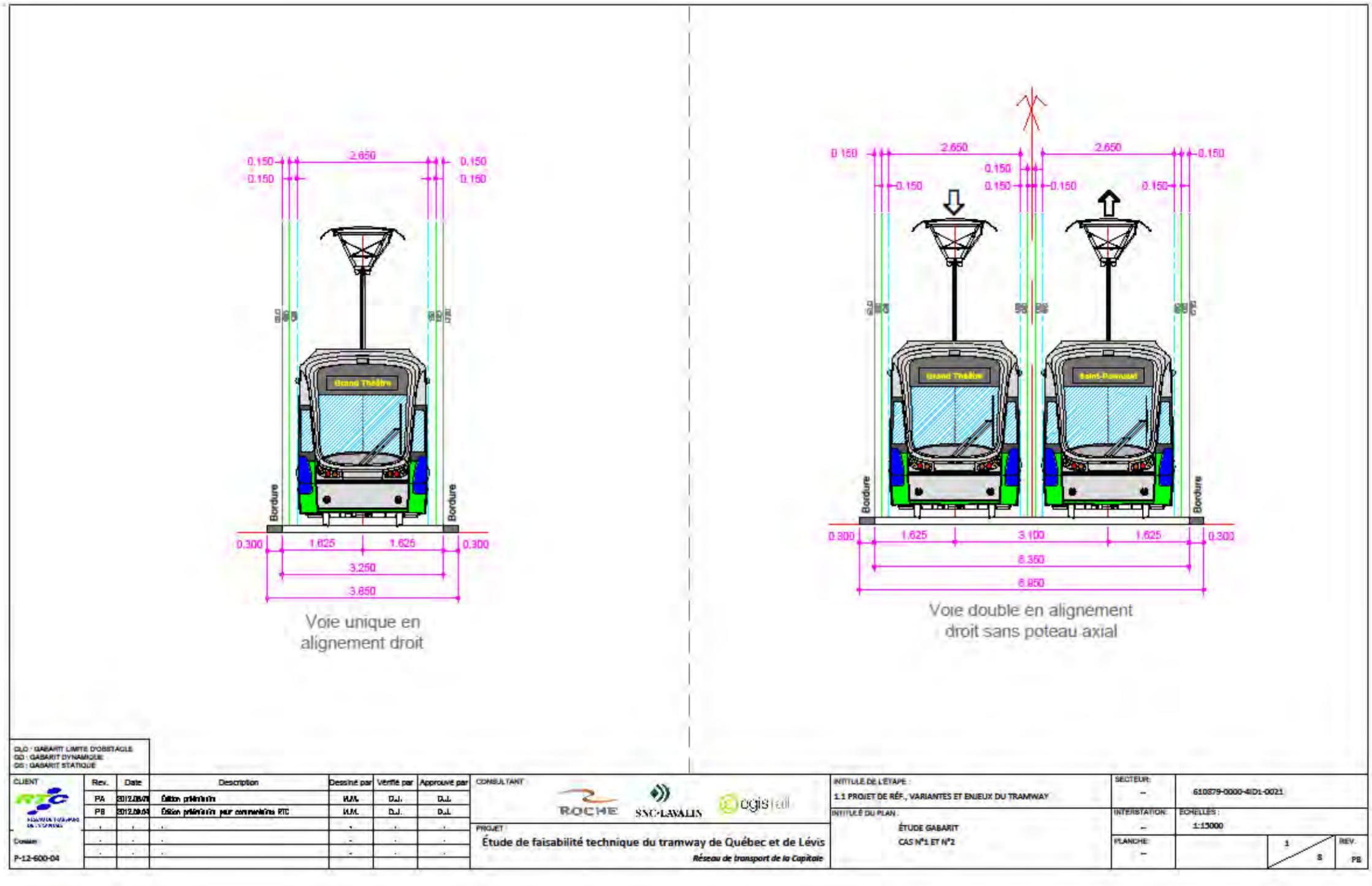
Lorsque le matériel roulant du tramway de Québec et de Lévis sera connu, les coupes seront, si requis, revues.

4.1.2 Coupe en section courante

4.1.2.1 Sans poteau axial

Dans le cas où il n'y a pas de poteau en position axiale, les GLO extérieurs sont à une distance de 3,25 mètres (en voie simple) et de 6,35 mètres en voie double (voir planche 1 de 8 ci-après). Ces distances définissent la largeur de la plateforme du tramway auxquelles il faut ajouter des bordures (séparateurs) qui servent à délimiter physiquement le GLO et/ou à protéger le GLO contre l'intrusion de véhicules routiers.

Figure 1 : Planche 1 de 8 – Voie unique en alignement droit & Voie double en alignement droit sans poteau axial



4.1.2.2 Avec poteau axial

Dans le cas où il y a des poteaux en position axiale, le GLO varie selon la largeur des poteaux.

La largeur des poteaux n'est pas unique. Elle dépend notamment des efforts qui sont appliqués à la structure et du type de profil utilisé (H, Carré ou Cylindro-conique). Ci-après, un tableau indiquant les extremums pouvant être rencontrés pour la largeur des poteaux :

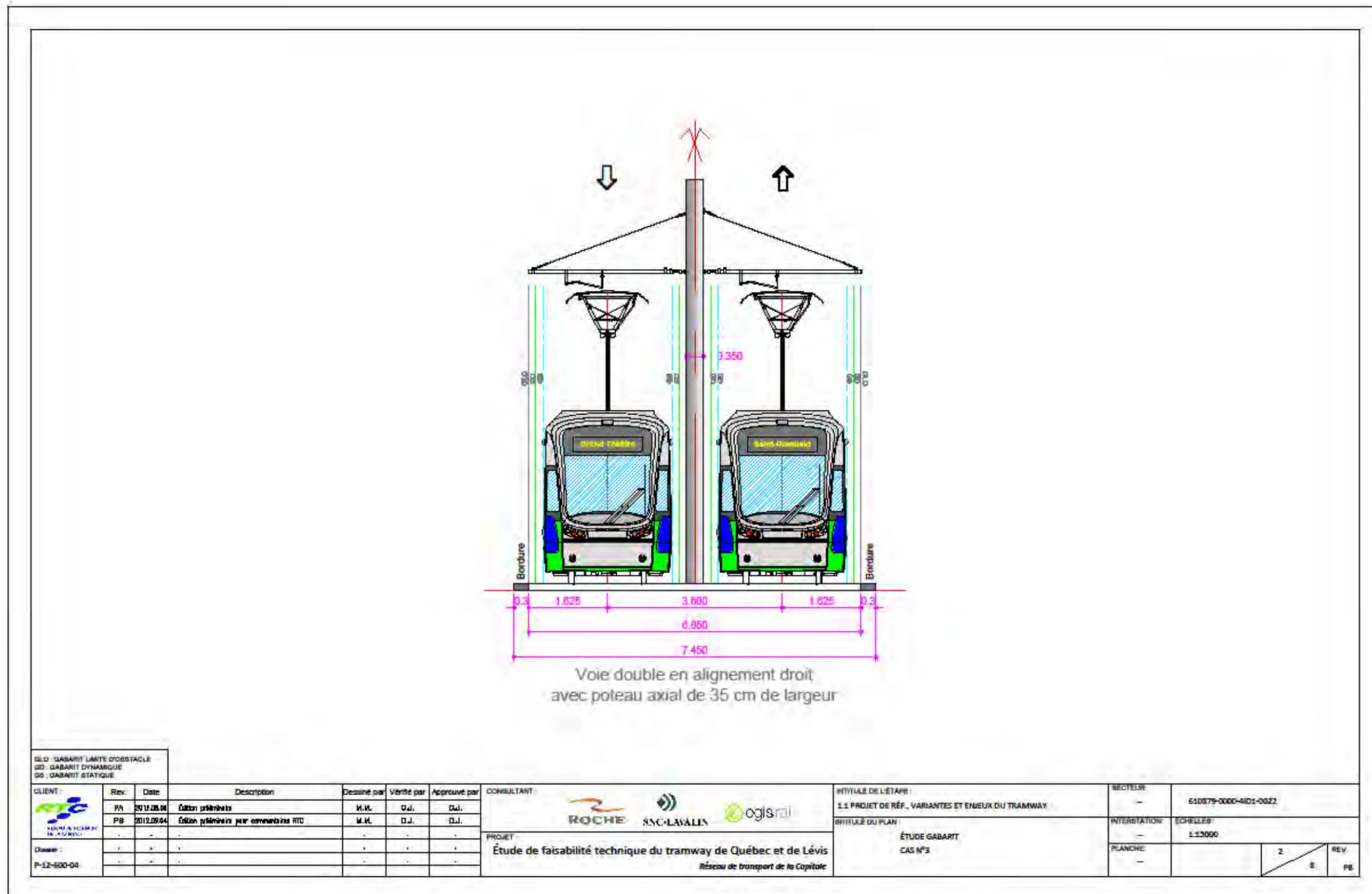
TYPE DE PROFIL	LARGEUR MINIMALE (CM)	LARGEUR MAXIMALE (CM)
H	18	36
CARRE	20	35
CYLINDRO-CONIQUE	30	45

A l'heure actuelle, il est prévu des profils H pour les poteaux LAC de l'ensemble des lignes.

La planche 2 de 8 ci-après présente le schéma d'une voie double en alignement droit avec un poteau axial de 35 cm de largeur ; soit 30 cm \pm 5 cm pour tolérance de construction et contraintes de déneigement.

Les coupes de principes seront mises à jour selon les diamètres des poteaux axiaux retenus pour le tramway de Québec et de Lévis.

Figure 2 : Planche 2 de 8 – Voie double en alignement droit avec poteau axial de 35 cm de largeur



4.1.2.3 Site propre en position axial

Lorsque des voies de circulation automobile sont de part et d'autre de la plateforme avec poteau LAC central et que la circulation automobile adjacente au tramway est dans le même sens que le tramway, les bordures (séparateurs) font 0,30 mètre de largeur ; la plateforme est alors de 7,45 mètres, incluant les bordures.

La planche 3 de 8 ci-après montre que pour une emprise de 20 m et des trottoirs de 3,0 m, l'espace résiduel pour la voirie de part et d'autre du tramway est de 3,275 m. Il n'y a donc pas d'espace dans ce cas de figure pour du stationnement ou bande cyclable.

Pour une emprise de 70 m, la planche 4 de 8 ci-après montre que dans ce cas de figure l'espace résiduel pour la voirie de part et d'autre du tramway est de 28,275 m. On peut donc y prévoir plusieurs voies de circulation et/ou stationnement et/ou des bandes cyclables.

Figure 3 : Planche 3 de 8 – Site propre axial double sens, dans une emprise de 20 m

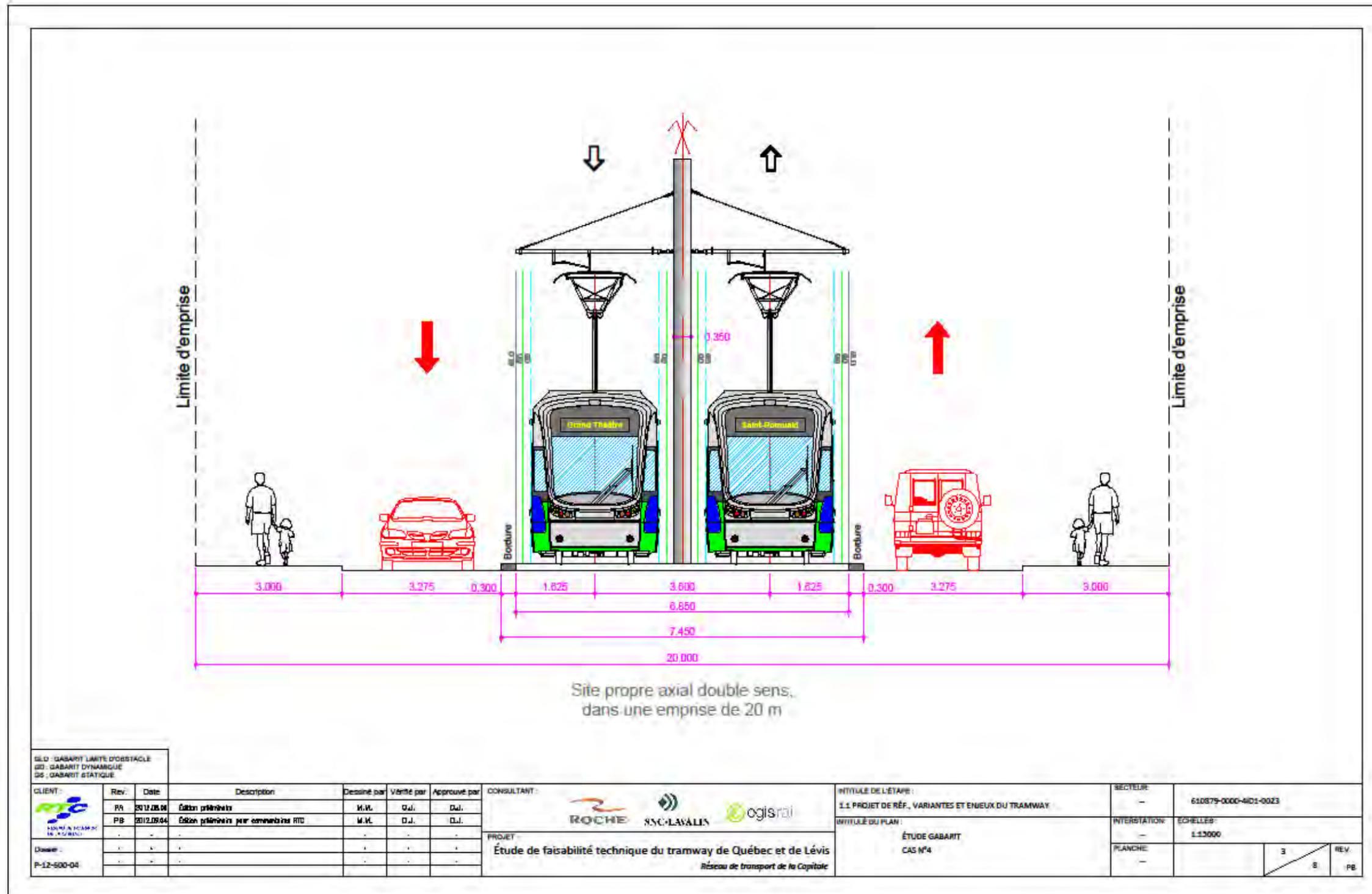
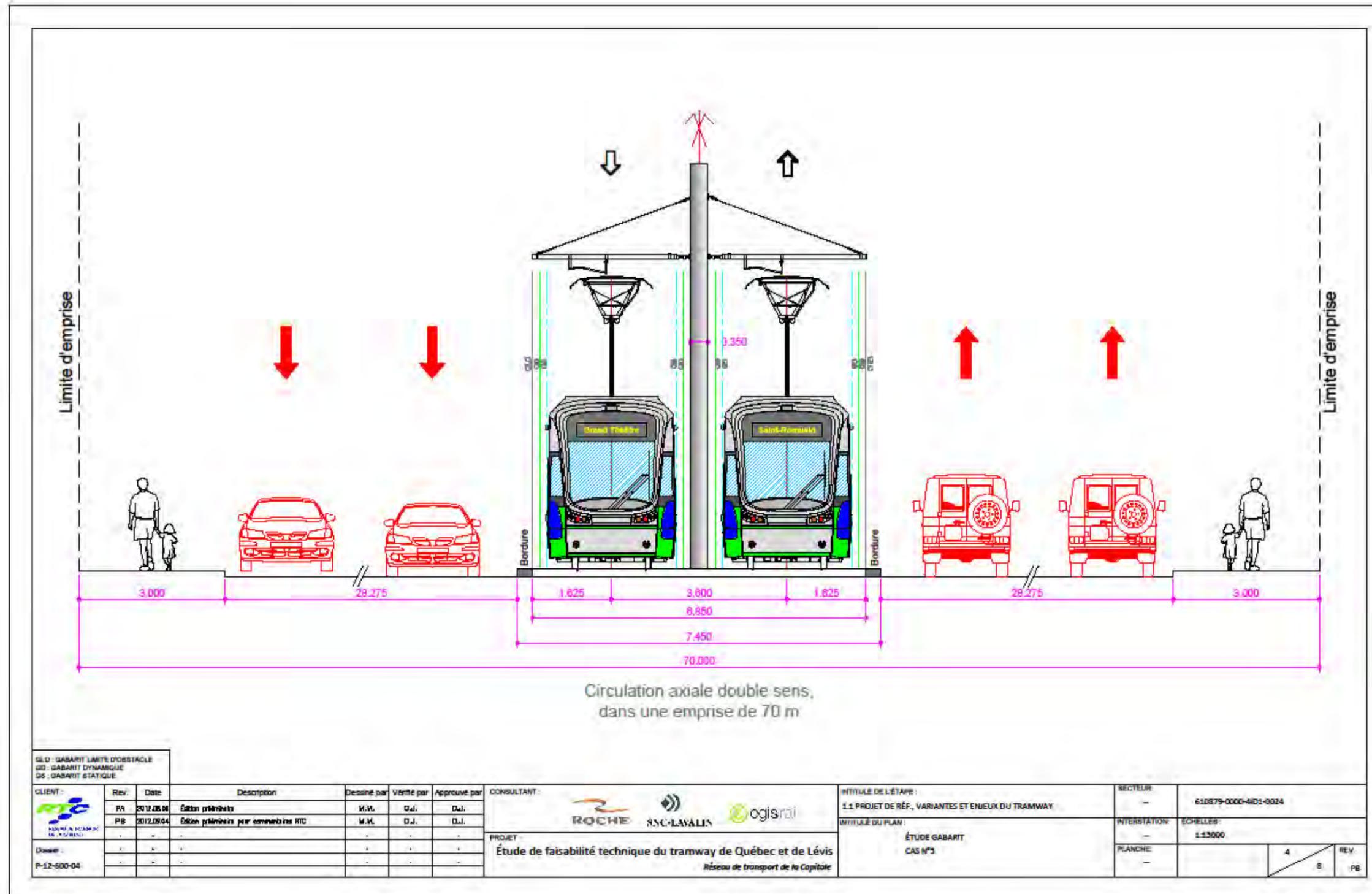


Figure 4 : Planche 4 de 8 – Circulation axiale double sens, dans une emprise de 70 m

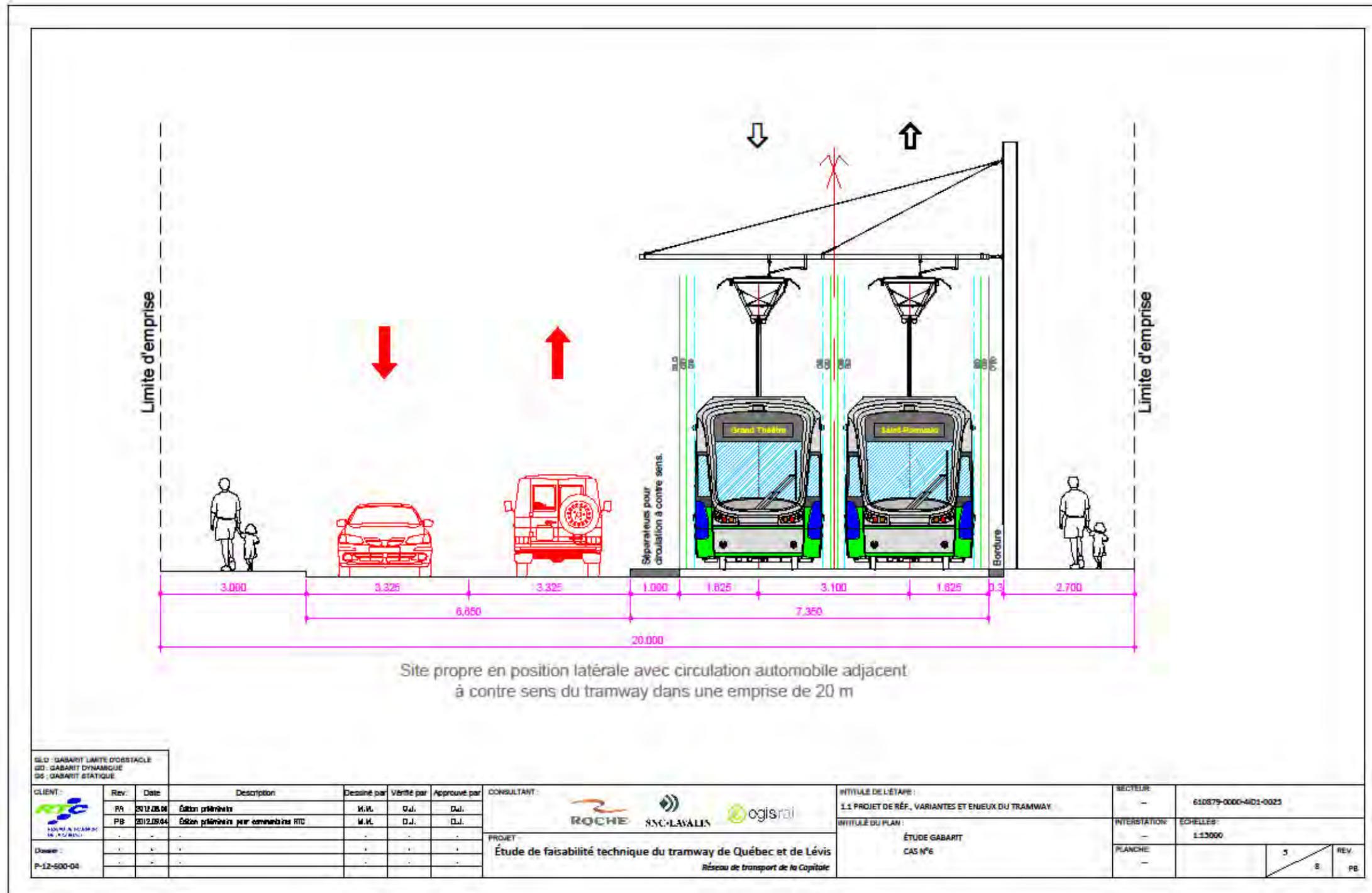


4.1.2.4 Site propre en position latérale

Lorsque la plateforme tramway est en latérale, la circulation automobile peut se trouver en contre sens de la circulation du tramway qui est le plus près de la voirie (voir planche 5 de 8 ci-après). Dans ces cas, il est mis en place un séparateur d'une largeur d'un mètre afin d'écarter les véhicules qui circulent en contre sens du tramway.

La planche 5 de 8 ci-après présente une insertion en site propre en position latérale avec circulation automobile adjacent à contre sens du tramway dans une emprise de 20 m. Dans ce cas de figure, l'espace résiduel pour la voirie est de 6,65 m, soit 2 voies de 3,325 m, ou une bande cyclable de 1,50 m à 2,00 m et une voie de circulation de 4,65 m à 5,15 m de largeur. Il serait aussi possible d'imaginer dans ce cas de figure d'avoir du stationnement sur 2,25 m et une seule voie de circulation de 4,40 m.

Figure 5 : Planche 5 de 8 – Site propre en position latérale avec circulation automobile adjacent à contre sens du tramway dans une emprise de 20 m



4.1.2.5 Site banal

Lorsque les deux sens de circulation du tramway sont partagés avec la circulation routière, le tramway est dit en site banal. Dans ce cas, la plateforme du tramway est donc de ce fait à minima de 7,00 mètres.

Les sites banals ont des impacts négatifs sur la vitesse commerciale du tramway (congestion, temps de manœuvre pour stationner). Ce type d'insertion est à éviter dans la mesure du possible.

En site banal, le tramway circule au milieu de la circulation automobile, le stationnement longitudinal limitrophe à la plateforme tramway est d'au moins 3,25 mètres de large afin de permettre l'ouverture de la portière sans gêner la circulation du tramway.

La planche 6 de 8 ci-après présente ce cas de figure dans une emprise de 20 m. Cette insertion en site banal permet de conserver du stationnement de part et d'autre de la plateforme du tramway. La planche 7 de 8 ci-après présente le même cas de figure mais avec une emprise de 15 m. Dans ce cas de figure il ne peut pas y avoir de stationnement. Il reste toutefois 2 espaces résiduels de 1.00 m. Ces espaces peuvent être utilisés par exemples pour :

- Élargir les trottoirs
- Faire des aménagements paysagés
- Créer une bande cyclable si la plateforme tramway est décalée pour avoir les 2,0 m résiduels d'un seul côté
- Etc.

4.1.2.6 Site mixte

En site mixte, la circulation automobile se fait dans un sens sur la même emprise que celle du tramway. La largeur nécessaire au véhicule routier est de 3,50 mètres et la plateforme du tramway a 7,00 mètres.

La planche 8 de 8 ci-après présente ce cas de figure dans une emprise de 20 m. Il est à noter que :

- Le stationnement doit de préférence ne pas être du côté de la voie mixte pour éviter les conflits entre le tramway et les manœuvres d'entrée / sortie des places de stationnement.
- La circulation en site propre devrait dans la mesure du possible être dans le même sens que la circulation de la voie adjacente du tramway pour éviter d'avoir à introduire une bordure de 1,000 m et de réduire en conséquence la largeur de la chaussée.

Figure 6 : Planche 6 de 8 – Site banal dans une emprise de 20 m

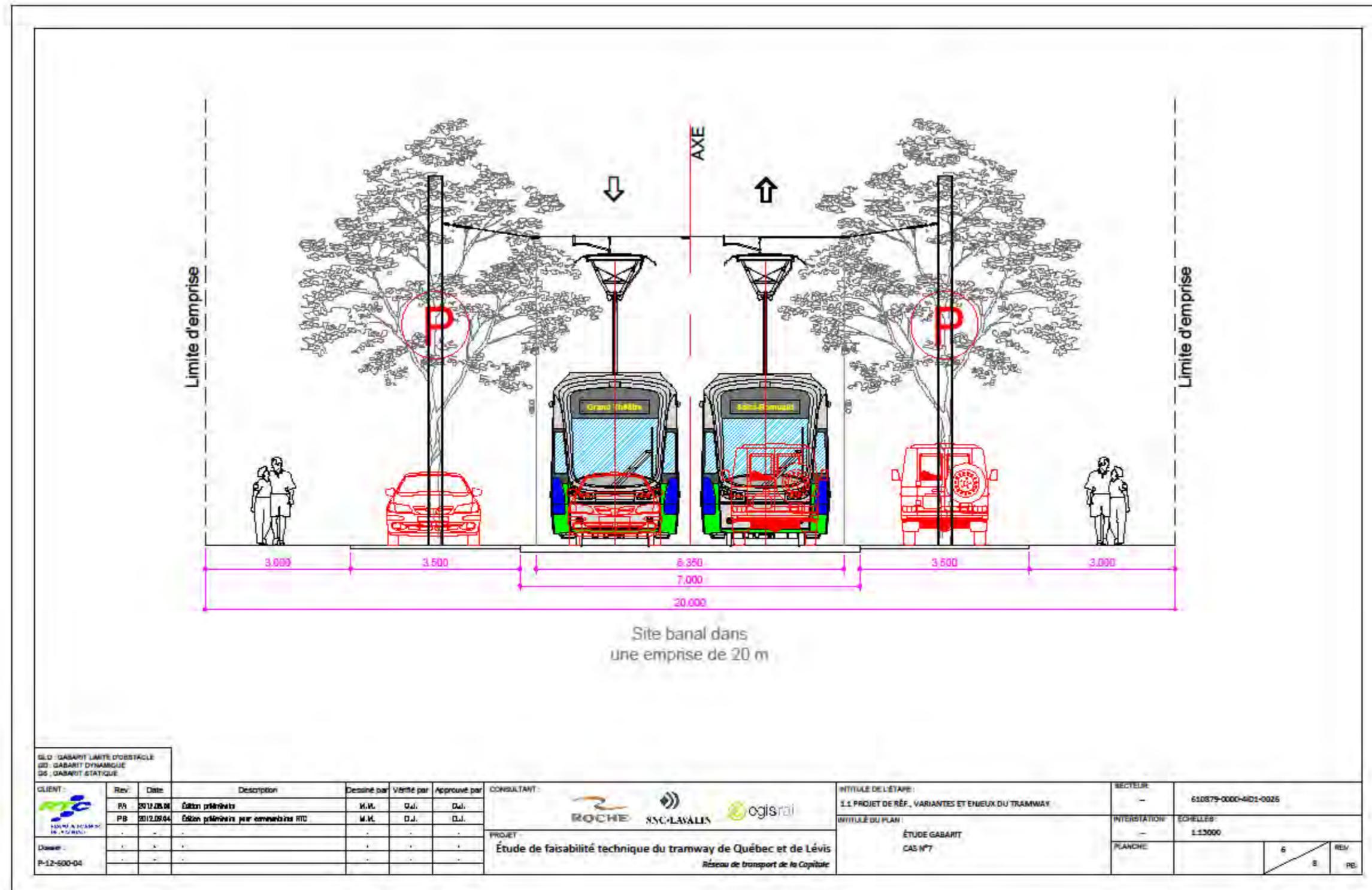


Figure 7 : Planche 7 de 8 – Site banal dans une emprise de 15 m

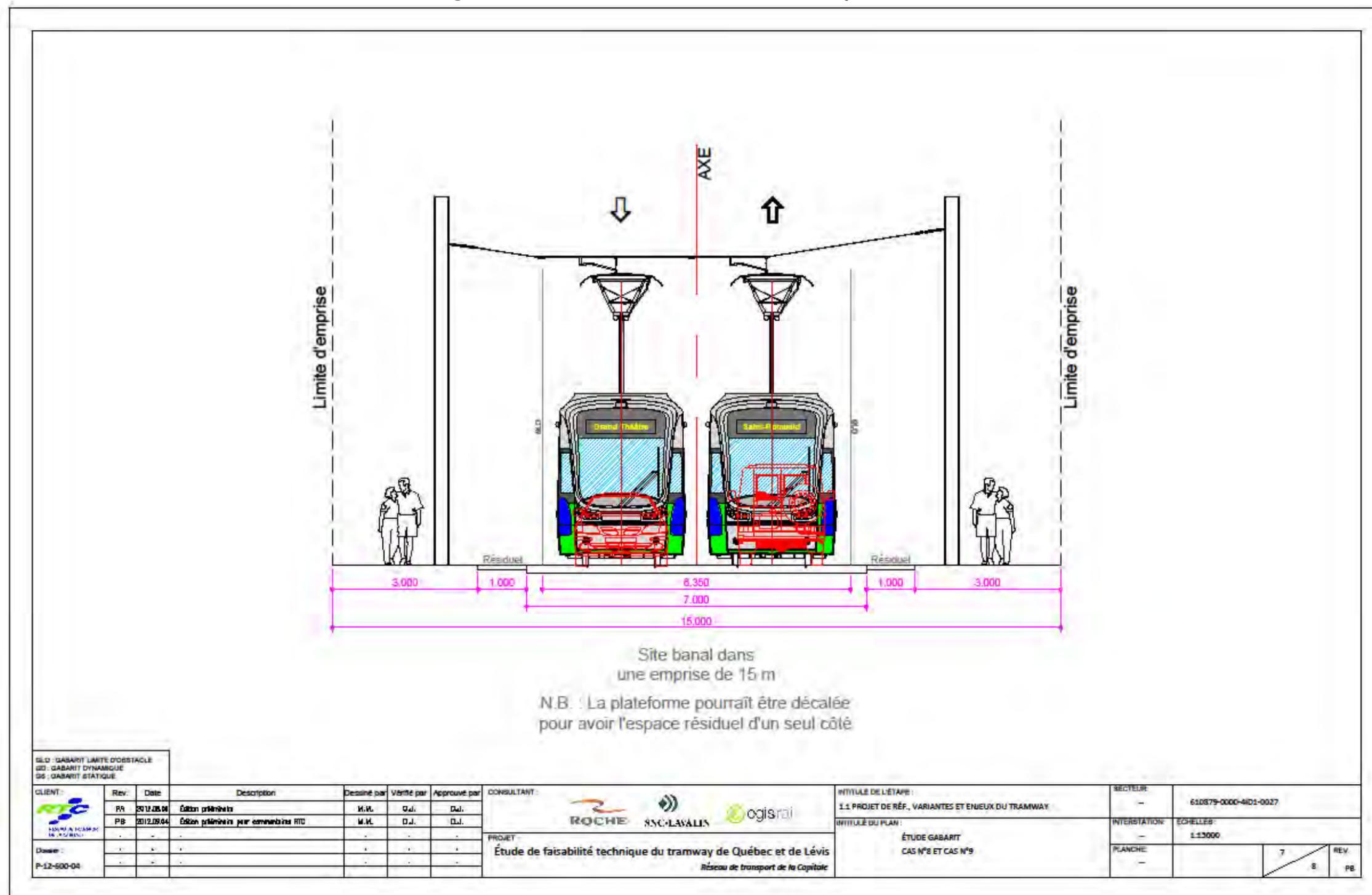
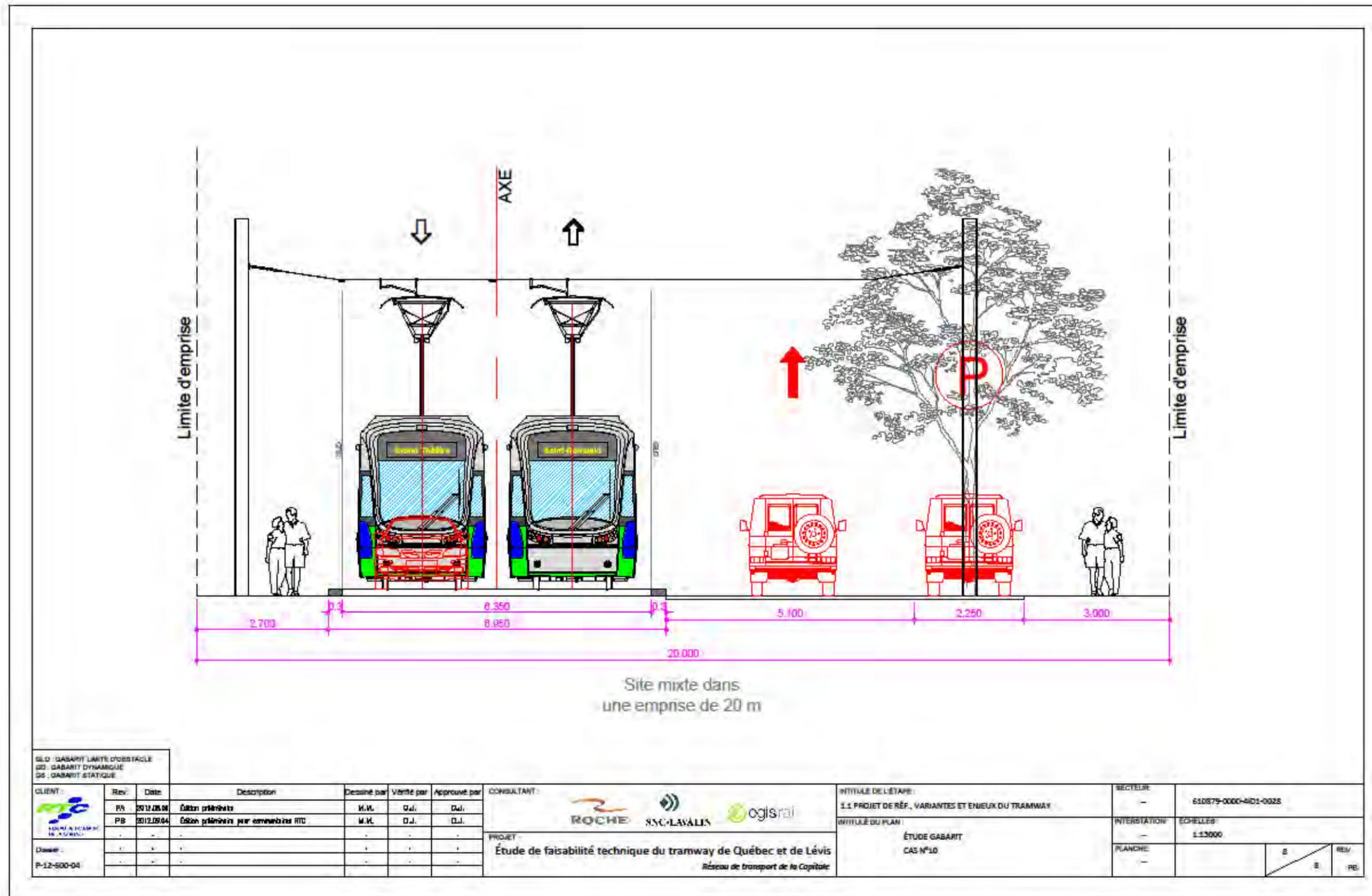


Figure 8 : Planche 8 de 8 – Site mixte dans une emprise de 20 m



4.1.3 Coupe en station

Les coupes en station sont présentées à l'annexe A du présent document. Il est à noter que les coupes sont préliminaires.

Elles devront être ajustées lorsque :

- i) La conception des stations aura été définie par le RTC (quais couverts, voies ferrées couvertes, quais et voies ferrées couverts, ...)
- ii) Le nombre d'usagers par station sera connu (intranant du lot 3).

Ces éléments et en particulier la conception des stations auront un impact sur l'espace requis pour l'insertion du tramway au niveau des stations.

Dans le but de faciliter/accélérer l'établissement des hypothèses à retenir pour la présente étude de faisabilité technique le Consortium présente en annexe A ses premières observations/réflexions sur le sujet.

4.2 HYPOTHESES RELATIVES A LA VOIRIE, AUX TROTTOIRS ET PISTES CYCLABLES

Les principaux paramètres de conception géométrique suivants sont proposés pour définir le projet de référence, les variantes et les enjeux du tramway (livrable 1.1 de la faisabilité technique du tramway).

Ces paramètres seront revus et précisés avec le groupe de travail prévu dans la structure de gouvernance du projet. Ceux-ci respectent les préconisations du Guide de conception géométrique des rues de la ville de Québec.

HYPOTHESE RELATIVES A LA VOIRIE, AUX TROTTOIRS ET PISTES CYCLABLES	
DESCRIPTION	DIMENSIONS (EN METRES)
Trottoir	3,00 ; soit 1,75 + 1,25 pour mobilier urbain et éclairage
Deux voies de circulation dans le même sens	
Artère principale	7,50 (3,50 + 4,00)
Artère secondaire	7,00 (3,35 + 3,65)
Collectrice principale	6,75 (3,25 + 3,50)
Locale principale industrielle	7,50 (3,50 + 4,00)
Deux voies de circulation en sens inverse du même côté de la plateforme tramway	
Collectrice secondaire	7,50 (2 x 3,75)
Locale principale résidentielle	6,50 (2 x 3,25)
Locale secondaire résidentielle	10,00 (2 x 5,00 incluant 2 bandes cyclables)
Locale tertiaire résidentielle	9,00 (2 x 4,50 incluant 2 bandes cyclables)
Locale secondaire industrielle	7,50 (2 x 3,75)
Une voie de circulation de part et d'autre de la plateforme non franchissable du tramway	4,00
Voie de tourne à gauche	3,15
Voie de tourne à droite	3,20
Terre-plein sans émergence	1,00
Terre-plein avec émergence	1,5 pour lampadaire ou feux circulation
Refuge piéton	2,5 (minimum 2,00 exceptionnellement)

HYPOTHESE RELATIVES A LA VOIRIE, AUX TROTTOIRS ET PISTES CYCLABLES	
DESCRIPTION	DIMENSIONS (EN METRES)
Piste cyclable (1 sens) sur voirie	1,50
Piste cyclable (1 sens) hors - rue	2,0
Piste cyclable (2 sens) hors – rue éloignée du pavage	3,00
Piste cyclable + piéton (1 sens)	3,00
Piste cyclable + piéton (2 sens)	4,50

4.3 GABARIT VERTICAL SOUS OUVRAGE

Le gabarit vertical sous ouvrage correspond à la hauteur entre le plan de roulement et le dessous de l'ouvrage.

Il convient de rappeler que la hauteur de captation du matériel roulant (distance entre le plan de roulement et le dessous de la LAC) peut être comprise entre 3,70 mètres et 6,30 mètres. (N.B. Lorsque le matériel roulant du tramway de Québec et de Lévis sera connu, ces valeurs seront, si requis, revues.)

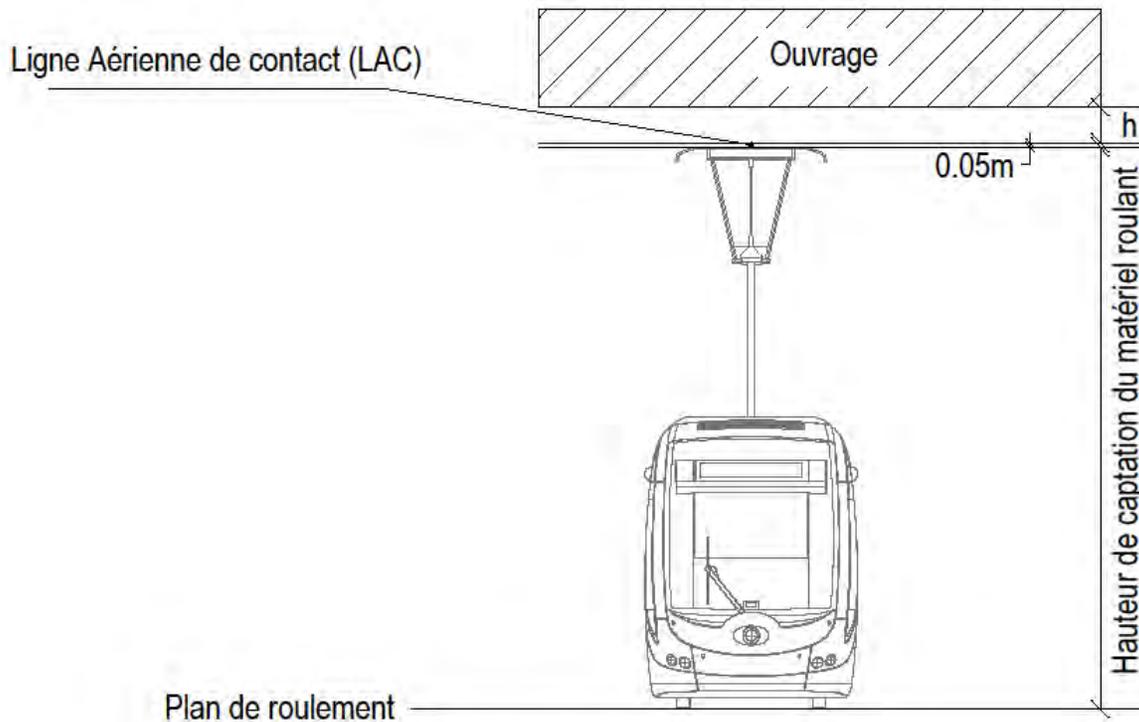
Les deux paramètres principaux à prendre en compte pour déterminer le gabarit vertical minimal sous ouvrage sont :

- La circulation ou pas de véhicules routiers sous la ligne aérienne de contact (LAC)
- Le type d'accrochage de la LAC sous l'ouvrage.

Le gabarit vertical minimal sous ouvrage varie selon si la circulation des véhicules routiers est autorisée ou non sous la LAC. Si la circulation des véhicules est autorisée, il convient de s'assurer que la distance entre le gabarit vertical du plus haut véhicule, noté g_v , et la hauteur de captation de la LAC est supérieure à 1,00 mètre (ceci permet de respecter les règles en termes de limitation du gabarit routier et de sécurité électrique).

Ci-après, la coupe de principe du gabarit vertical sous ouvrage :

Figure 9 : Coupe de principe du gabarit vertical sous ouvrage



La hauteur entre le dessus de la LAC et le dessous de l'ouvrage, notée h , est fonction du type d'accrochage de la LAC sous l'ouvrage :

- Si la longueur de l'ouvrage est supérieure à la portée entre deux points de suspension de la LAC (environ 20 mètres) alors la LAC est accrochée à l'ouvrage par l'intermédiaire de suspentes et $h = 0,40$ mètre
- Sinon, la LAC n'est pas accrochée à l'ouvrage et $h = 0,15$ mètre.

On en déduit le tableau de synthèse pour déterminer le gabarit vertical minimal sous ouvrage :

		Gabarit minimal sous ouvrage (en mètres)
Cas 1	Circulation autorisée	Max ($g_v + 1,00 ; 3,70$) + 0,05 + 0,4
	Accrochage de la LAC par l'intermédiaire de suspentes	
Cas 2	Circulation non autorisée	3,70 + 0,05 + 0,4 soit 4,15 mètres
	Accrochage de la LAC par l'intermédiaire de suspentes	
Cas 3	Circulation autorisée	Max ($g_v + 1,00 ; 3,70$) + 0,05 + 0,15
	Pas de suspentes	
Cas 4	Circulation non autorisée	3,70 + 0,05 + 0,15 soit 3,90 mètres
	Pas de suspentes	

Exemple :

Si la circulation de poids lourds, dont la hauteur maximale peut atteindre 4 mètres, est autorisée, alors on prend $g_v = 4$ mètres.

Dans le cas, où la LAC doit être accrochée à l'ouvrage par l'intermédiaire de suspentes (cas 1), on a :

- $\text{Max} (g_v + 1,00 ; 3,70) + 0,05 + 0,4 = \text{Max} (5,00 ; 3,70) + 0,05 + 0,4 = 5,00 + 0,05 + 0,4$ soit un gabarit minimal sous ouvrage de 5,45 mètres.

4.4 CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU TRACE DE VOIES

Le tracé des voies sera conçu suivant les normes et règles en vigueur afin de permettre une circulation normale des véhicules dans les deux sens.

En effet, un véhicule animé d'une vitesse « v » sur une trajectoire circulaire de rayon « r », subit en tout point une accélération perpendiculaire à sa trajectoire de valeur : $G_0 = \frac{v^2}{r}$.

Une partie de cette accélération G_1 peut être compensée par l'inclinaison de la surface de roulement. Le complément, $G_2 = G_0 - G_1$, constitue l'accélération non compensée ressentie par le voyageur.

Les contraintes de limitation d'accélération ont pour objectif :

- D'assurer un confort suffisant aux voyageurs
- De limiter l'inclinaison des voitures et les oscillations des suspensions sous l'effet de la variation de G_2
- De limiter la poussée latérale sur la voie qui nuit à sa stabilité et provoque une usure accélérée des rails.

Les valeurs considérées généralement comme satisfaisantes sont les suivantes :

- $G_2 \leq 0,68m/s^2$ (accélération transversale maximale non compensée)
- $\frac{dG_2}{dt} \leq 0,4m/s^3$ (jerk maximum).

4.4.1 Rayon minimal en courbe sans dévers

En l'absence de dévers $G_2 = G_0$ de ce fait, limiter l'accélération revient à limiter le rayon de courbure puisque a_{n2} dépend de la vitesse et du rayon de courbure « r ».

Alors $G_2 \leq 0,68m/s^2$ revient à vérifier $0,68 = \frac{v^2}{r}$.

Il est à noter que plus le rayon de courbure est petit, plus l'accélération non compensée est élevée.

Pour des raisons d'usures prématurées des rails et de bruit engendré, il convient de limiter le rayon de courbure en plan à 50 mètres au minimum.

En certains points d'insertions difficiles, il sera accordé la réalisation d'un tracé avec un rayon de courbure en plan de 25 mètres.

Pour ces valeurs, nous obtenons donc les vitesses « v » suivantes :

Rayon de courbure « r » en mètres	Vitesse « v » en km/h
25	15
50	21

Réciproquement pour des vitesses imposées, nous obtenons les rayons de courbures « r » suivants :

Vitesse « v » en km/h	Rayon de courbure « r » en mètres
30	102
50	284
70	556

4.4.2 La clothoïde

Le tracé des voies est composé de courbes et d'alignement droit, aussi pour passer de l'une à l'autre des configurations, il faut réaliser une augmentation progressive du rayon de courbure pour ne pas subir une trop forte force centrifuge d'un même coup.

La limitation de l'accélération transversale « G_0 » sur l'ensemble du tracé impose une variation progressive de la courbure entre un alignement droit et un arc de cercle. Cette variation continue et progressive est possible grâce à la clothoïde qui croît linéairement de 0 à l'infini, proportionnel à la valeur du rayon de courbure.

L'équation de la clothoïde est : $Y = \sqrt{r * l}$, « r » étant le rayon de la courbe circulaire, et « l » la longueur de la clothoïde.

Dans les limites de confort, on doit avoir : $Y^2 = 2,5 * v^3$, avec v en m/s.

De ce fait pour raccorder un alignement droit à un cercle de rayon « r » avec une vitesse « v », nous obtenons la longueur nécessaire de clothoïde de : $l = \frac{2,5 * v^3}{r}$.

Pour des raisons de confort et afin de limiter le report des sur largeurs dues au rayon dans l'alignement droit, la longueur minimale de la clothoïde est fixée à 12 m.

Pour des cas exceptionnels (rayon de courbure de 25 m) la longueur de la clothoïde sera de 7 m.

Tableau des longueurs de clothoïde :

Rayon de courbure en mètre	Longueur de clothoïde en mètre
25	7,00
50	9,91
102	14,00
284	23,62
556	33,00

4.4.3 Dévers en courbe

4.4.3.1 Valeur maximale du dévers

Pour compenser l'accélération transversale G_0 en courbe, les voies peuvent intégrer un dévers au niveau de la pose des rails. Ce dévers permet d'introduire une accélération compensatoire G_1 .

Plusieurs considérations conduisent à limiter le dévers :

- La stabilité de la voie
- La stabilité des véhicules en cas d'arrêt ou de ralentissement en pleine voie, et le confort des voyageurs dans les mêmes conditions
- L'intégration du dévers dans la voirie environnante.

Le dévers est limité à : $d_{\max} = 120$ mm.

4.4.3.2 Calcul du dévers sur le cercle

Pour une vitesse constante « v » et le rayon de courbure « r », le dévers calculé pour avoir une insuffisance de dévers nulle est tel que :

$$d = 11,8 * \frac{v^2}{r} \quad (d \text{ en mm, } r \text{ en m, } v \text{ en km/h}).$$

Lorsque le dévers installé est inférieur au dévers théorique nécessaire pour compenser exactement l'accélération centrifuge, on dit qu'il y a insuffisance de dévers, notée « i ».

Les conditions de confort énoncées précédemment conduisent à limiter l'insuffisance de dévers à 100 mm.

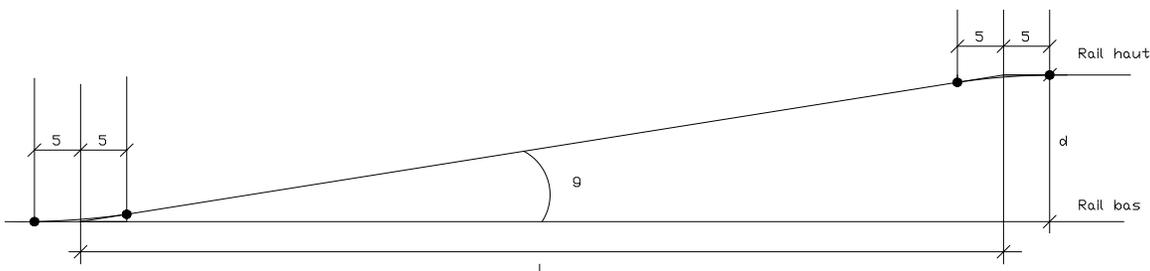
La vitesse maximale sur une courbe de rayon « r » est celle pour laquelle le dévers théorique est égal à la somme du dévers maximal et de l'insuffisance de dévers maximale, soit :

$$v = 4,3 * \sqrt{r} \quad (v \text{ en km/h et } r \text{ en m}).$$

4.4.3.3 Mise en oeuvre du dévers

La figure ci-après représente le profil en long de deux rails d'une voie lors d'une mise en dévers.

Figure 10 : Schéma de principe de mise en dévers



Les deux files de rails forment un angle constant dont la tangente est appelée gauche de la voie. Le gauche est défini par la formule : $g = d/L$ avec :

- L = longueur de la clothoïde en m
- d = dévers en mm
- g = gauche en mm/m.

Pour tenir compte de la raideur des suspensions dans la courbe de mise en dévers où les bogies sont inclinés par rapport à la caisse du véhicule, et où les deux essieux d'un même bogie ne sont plus parallèles entre eux, on limite le gauche à $g_{max} = 4$ mm/m.

Afin de conserver un confort suffisant, on limite le gauche en fonction de la vitesse à la valeur :

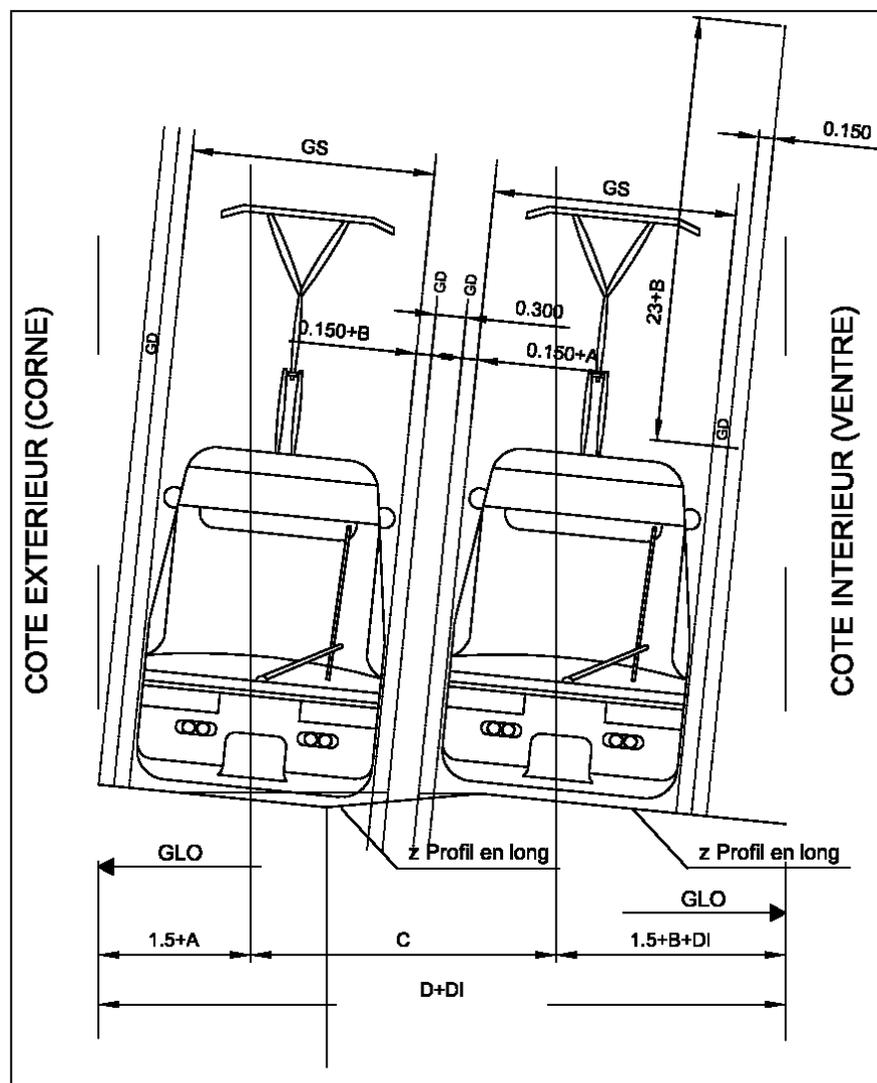
$$g < \frac{180}{v} \quad (g \text{ en mm/m, } v \text{ en km/h}).$$

Le gauche ne passe pas instantanément de zéro à la valeur choisie, mais il y passe progressivement dans une zone dont le milieu est l'origine de la clothoïde. Cette zone est appelée « doucine », sa longueur est fixée à 10 m pour des raisons pratiques.

4.4.4 Définition des types de dévers

4.4.4.1 Dévers voie par voie

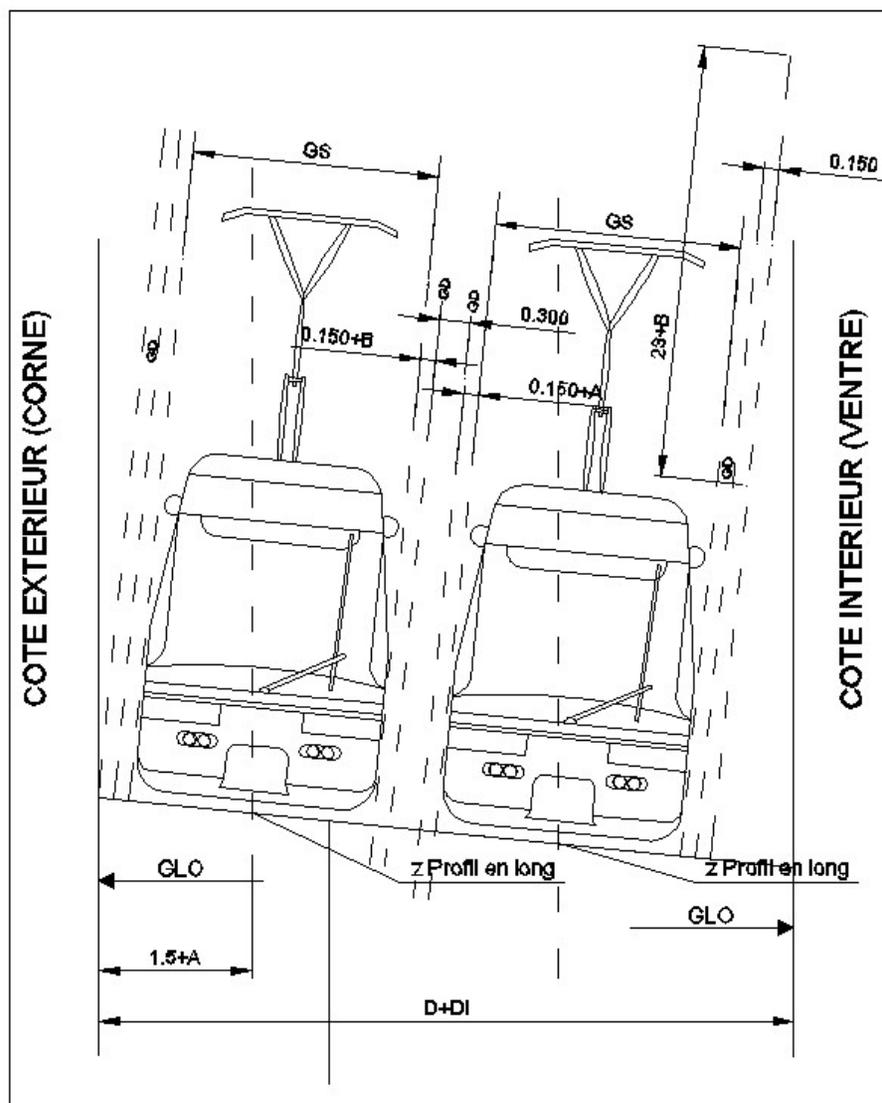
Figure 11 : Dévers voie par voie



Dans le dévers voie par voie, le rail bas de la voie 1 est à la même cote que le rail bas de la voie 2 (cote du profil en long). Ce type de mise en dévers est usuellement utilisé en site propre intégral, hors zones circulables.

4.4.4.2 Dévers coplanaire

Figure 12 : Dévers coplanaire



Dans le cas d'un dévers coplanaire, les 4 rails sont dans un même plan. Le profil en long est donné sur le rail le plus bas. Ce type de mise en dévers peut être utilisé en zones circulables, car il est plus facile à insérer dans l'environnement urbain et est donc priorisé dans le projet.

4.4.5 Profil en long de la voie

Pour raccorder deux déclivités, il faut considérer la vitesse du véhicule et la différence « p » des déclivités.

Si r est le rayon de raccordement de deux pentes, l'accélération centrifuge verticale sur cette courbe est : $a = \frac{v^2}{r}$.

Cette accélération s'ajoute dans un creux où se retranche dans une bosse à l'accélération de la pesanteur, il est donc logique de la limiter : $a \leq 0.2 \text{ m/s}^2$.

De ce fait, nous obtenons les contraintes suivantes : $r \geq 5 * v^2$ (r en m, v en m/s).

Le tableau suivant donne la vitesse maximale en fonction du rayon parabolique en profil en long :

r (m)	v (km/h)
350	30
400	32
450	34
500	36
550	38
600	39
650	41
700	43
750	44
800	46
850	47
900	48
950	50
1000	51
1050	52

r (m)	v (km/h)
1200	56
1250	57
1300	58
1350	59
1400	60
1450	61
1500	62
1550	63
1600	64
1650	65
1700	66
1750	67
1800	68
1850	69
1900	70

r (m)	v (km/h)
1100	53
1150	55

r (m)	v (km/h)
1950	71
2000	72

Les rayons minimaux en profil en long sont :

- En creux (raccordement concave) : $r_{\min} = 500$ m
- En bosse (raccordement convexe) : $r_{\max} = 700$ m.

La pente maximale en ligne en alignement droit est fixée à 8% avec un matériel roulant de ± 30 m motorisé à 100 % (3 bogies sur 3 motorisés) et un matériel roulant de ± 40 motorisé à 75 % (3 bogies sur 4).

En cas de combinaison d'une pente et d'une courbe en plan, la relation entre la déclivité p et le rayon r est telle que : $p + \frac{500}{r} \leq 70$ pour 7%.

Pour assurer un bon drainage de la plateforme tramway, la pente minimale est fixée à 1%. Toutefois cette pente pourra être réduite à 0.5% exceptionnellement, dans ce cas des dispositions particulières devront alors être mises en œuvre pour assurer le bon assainissement de la plateforme.

4.4.6 Relation entre tracé en plan et tracé en profil

Dans la mesure du possible, on évitera d'implanter un rayon parabolique en correspondance avec un rayon circulaire en plan.

4.4.7 Dispositions particulières

4.4.7.1 Stations

Les stations sont implantées, autant que possible, en alignement droit.

Dans certains cas et en fonction de l'insertion urbaine, les stations seront en courbe, dont le rayon minimal est fixé à 1 000 mètres.

En profil en long, les stations sont implantées sur une pente constante, limitée à 2% ou en rayon parabolique de 2 000 m au minimum.

Exceptionnellement cette pente pourra être augmentée à 4%. Aucun dévers n'est toléré en station.

4.4.7.2 Voies de manœuvre et terminus

La pente maximale dans les zones en terminus doit être inférieure ou égale à 0,5%, pour éviter la dérive d'un véhicule dont les freins ne sont pas bloqués.

Les zones de manœuvres pourront éventuellement être en pente de 2% maximum sous certaines conditions de sécurité d'exploitation.

4.4.7.3 Courbe et contre courbe

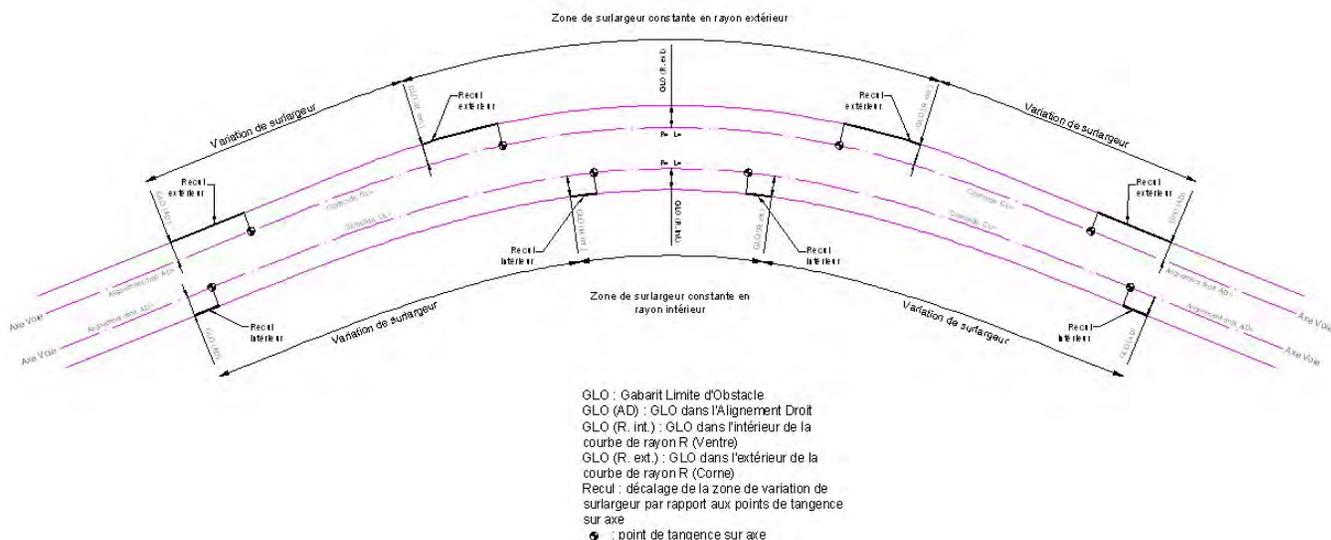
Un alignement droit de 10 m minimum sera introduit entre les deux clothoïdes d'un raccordement courbe et contre courbe.

4.4.8 Les surlargeurs

Les sur largeurs dues aux courbes (tracé en plan) sont introduites par les flèches dues aux déplacements côté intérieur (TV, ventre) et côté extérieur (TC, corne) de l'axe du véhicule par rapport à l'axe de la voie.

Le principe de mise en place des surlargeurs dans les courbes est le suivant :

Figure 13 : Principe des surlargeurs en courbe



4.4.9 Les surhauteurs

La surhauteur due au profil en long, dans les raccordements de déclivités convexes ou concaves, est calculée en fonction du rayon de la parabole et des caractéristiques du matériel roulant.

Ces surhauteurs seront définies lorsque le matériel roulant sera connu.

4.4.10 Surlargeurs et surhauteurs dues au dévers

Les surlargeurs et surhauteurs dues à la mise en dévers sont calculées en fonction de l'inclinaison due au dévers du gabarit dynamique du matériel roulant.

Ces surlargeurs et surhauteurs seront définies lorsque le matériel roulant sera connu.

4.4.11 Ouvrages d'art

Au droit des ouvrages d'art, il doit être privilégié, en termes de tracé, la mise en place d'alignement droit, notamment de part et d'autre des culées pour permettre la pose éventuelle d'appareils de dilatation de rails (10 m minimum nécessaire). Pour les mêmes raisons, le profil en long doit être de déclivité constante au droit des culées.

Dans la mesure du possible, le point haut sera mis en place en axe de l'ouvrage pour minimiser les canalisations d'assainissement.

4.4.12 Synthèse des caractéristiques du tracé

4.4.12.1 Gabarits

- Largeur GLO voie simple : 3,25 mètres
- Lame d'air voie double en AD sans poteaux centraux : 0,15 mètre
- Largeur du GLO voie double en AD sans poteaux centraux : 6,35 mètres
- Largeur de la plateforme en AD et circulation automobile de part et d'autre, sans poteaux centraux : 6,95 m
- Hauteur GS hors pantographe : 3,30 mètres environ
- Hauteur GS avec pantographe replié : 3,52 mètres environ
- Hauteur captation minimale : 3,70 mètres
- Hauteur captation maximale : 6,30 mètres.

4.4.12.2 Conditions de confort

- Gauche maximum : 4 mm/m
- Gauche en fonction de la vitesse : $g \leq 180 / V$
- Accélération horizontale maximale non compensée : 0,68 m/s²
- Insuffisance de dévers maximale : 100 mm
- Vitesse maximale : 70 km/h
- Jerk maximum : 0,4 m/s³
- Accélération verticale maximale : 0,2 m/s²
- Dévers maximal : 120 mm
- Type de mise en dévers coplanaire ou voie par voie.

4.4.12.3 Caractéristiques en plan

- Rayon minimum en ligne : 50 mètres et exceptionnellement 25 mètres
- Rayon minimum en dépôt : 25 mètres
- Longueur minimale de clothoïde : 12 mètres.

4.4.12.4 Caractéristiques en profil en long

- Rayon parabolique mini en creux (concave) : 500 mètres
- Rayon parabolique mini en bosse (convexe) : 700 mètres
- Pente maximale en ligne en alignement droit: 8%
- Pente minimale en ligne 1% et exceptionnellement : 0,5%
- Pente maximale en terminus et en voie de manœuvre : 0,5% et exceptionnellement 2%
- Pente maximale dans les appareils de voie : 4%.

4.5 STATIONS

Les stations seront définies au cours de l'étude de faisabilité. La largeur des stations mentionnées ci-après sera donc revue en cours d'étude.

4.5.1 Dimensions des quais

Les stations peuvent être à quais latéraux ou centraux. Chaque quai se constitue d'un plateau et deux rampes d'accès, de pentes inférieures à 5%, situées à chaque extrémité.

Les dimensions des quais à prendre en compte sont en général :

- Longueur de 40 mètres hors rampe
- Longueur des rampes d'accès de 6 mètres pour une station en pente 0%
- Longueur totale avec rampes de 52 mètres pour une station en pente 0%

- Largeur de 3,20 mètres minimum pour des quais latéraux (du côté où la station est longée par une chaussée, il est prévu, en plus de la largeur minimum ainsi fixée, une bande séparatrice de l'ordre de 50 cm de largeur et de hauteur équivalente à celle d'un trottoir)
- Largeur de 4,5 mètres minimum pour un quai axial
- Hauteur des quais de 0,29 m par rapport au-dessus du rail.

Ces valeurs seront ajustées, si requis, lorsque le matériel roulant sera connu.

Ci-après, les dimensions des quais de station prises en compte dans le cadre du tramway de Québec et Lévis :

	Longueurs hors rampes	Largeurs*
Quais latéraux	40 mètres	3,20 mètres
Quais axiaux	40 mètres	4,50 mètres

* Sans tenir compte d'un abri éventuel.

La largeur des quais pourra être ajustée en fonction du flux de voyageurs sur la base d'une densité définie et des équipements placés sur les quais. Le dimensionnement des quais est établi selon les règles suivantes :

- La surface utile du quai doit être calculée de façon à ce que la densité maximale ne dépasse pas 2 voyageurs/m² (1,5 si possible).
- La largeur utile exclut 50 cm pour la zone de sécurité en bord de quai et 30 cm de barrière lorsqu'une voirie est située directement derrière le quai.
- Le nombre de personnes à prendre en compte est la somme des voyageurs montant et descendant à l'heure de pointe dans l'intervalle entre deux rames. Cet intervalle doit tenir compte des perturbations (glissement d'une rame par rapport aux horaires de telle façon que son écart avec la rame suivante soit égal au parcours d'une interstation).

Le système de transport se veut évolutif (le projet considère qu'à terme il doit être possible de faire circuler des rames d'une longueur de 44 mètres).

4.5.2 Traitement des quais

La pente longitudinale de la station et des quais sera constante et ne dépassera pas 2% et exceptionnellement 4%. Les quais auront une pente en travers de 1 à 2% vers l'arrière.

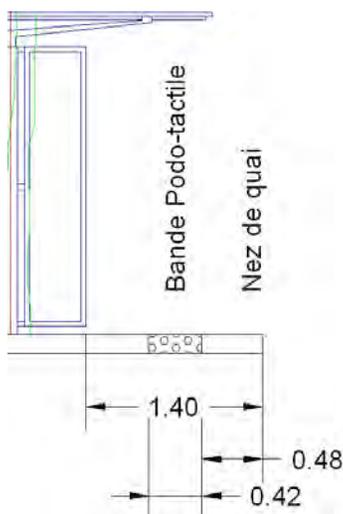
Sur les quais, un ensemble de matériels prendra place (à préciser au cours de l'étude faisabilité) :

- Un abri couvrant l'espace d'attente et une partie du mobilier de station
- Le mobilier de station composé de bancs, distributeur de titre de transport, plan de quartier, nom de station, corbeille, mâts d'éclairage, panneaux publicitaires, éléments techniques, etc.

Les quais seront traités de façon similaire avec des bordures longitudinales qui encadrent le quai et les rampes (appelées « nez de quai » et « fond de quai ») et une bande de vigilance continue (sur le quai) qui suit le nez de quai : « bande podo-tactile ».

La largeur utile de passage sur le quai est en tout point supérieure à 1,40 mètres (la distance entre le nez de bordure et le bord du dispositif est prise en compte dans la largeur utile de cheminement de 1,40 mètres).

Figure 14 : Largeur piétonne utile en quai en mètre (N.B. : Sera revue en cours d'étude)

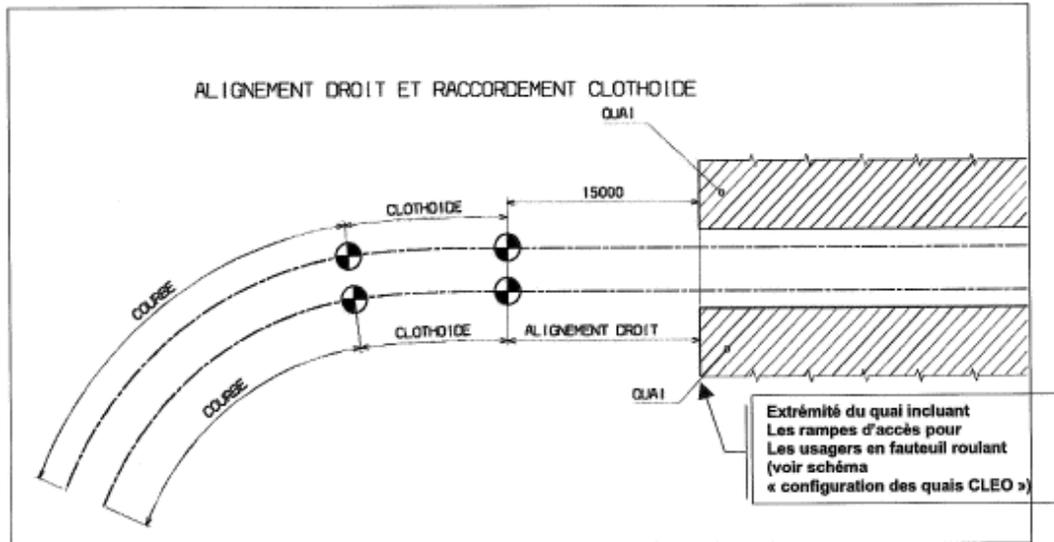


Les revêtements des quais seront étudiés pour minimiser les risques de glissade.

4.5.3 Interface entre les quais et le matériel roulant

Un alignement droit de 15 m minimum de part et d'autre des quais sera réservé, dans la mesure du possible, afin d'éviter les rescindements de quai qui augmentent la lacune horizontale entre nez de quai et matériel.

Figure 15 : Alignement droit au delà des quais



L'accès des PMR au matériel roulant est réalisé de plain-pied. Les lacunes horizontales et verticales entre le nez de quai et le seuil des portes accessibles identifiées par le symbole international seront au maximum de 50 mm pour la lacune verticale et de 50 mm pour la lacune horizontale, pour un matériel neuf, à vide, positionné en ligne droite, centré dans l'axe de la voie et par rapport à un nez de quai théorique défini pour le système de transport. En aucun cas la hauteur du plancher du véhicule ne doit être en deçà du quai.

4.5.4 Synthèse des caractéristiques en station :

- Station en AD : 40 mètres hors rampes d'accès
- Rayon minimum en plan en station : en AD et exceptionnellement 1 000 mètres
- Hauteur des quais par rapport au-dessus du rail : 29 cm
- Longueur AD au-delà du quai : 15 mètres hors rampe d'accès
- Rayon minimum en profil en long en station : 2 000 mètres
- Pente maximale en station : 2% et exceptionnellement 4%
- Lacune horizontale maximum : 50 mm
- Lacune verticale maximum : 50 mm.

4.6 MULTITUBULAIRE

4.6.1 Dimensionnement de la multitubulaire

Le cheminement des câbles nécessaires au fonctionnement de la ligne de tramway raccordant les différents équipements est assuré par la mise en place de fourreaux le long de la ligne (ces fourreaux sont dimensionnés en fonction du nombre et de la section des câbles). Les besoins spécifiques de la ligne de tramway en courant fort et courant faible sont définis par les équipements électriques placés tout au long de la ligne.

Les résultats d'une première étude sur les besoins en fourreaux de la multitubulaire est donné ci-après :

Nombre de fourreaux selon le diamètre intérieur	160 MM	100 MM	80 MM	63 MM	42 MM	Total
	Utilisation					
Feeder alimentation	1					1
Distribution BT 230/400V	1					1
Alimentation LAC		2				2
Signalisation ferroviaire et BT station		4				4
Fibre optique		1		2	4	7
Système transmission et vidéo surveillance				5		5
Arrêt d'urgence				1		1
Signalisation carrefour				3		3
Communauté d'agglomération			2			2
Opérateurs privés					6	6
Fourreaux de réserve			2	4		6
Total	2	7	4	15	10	38

Les nombres de fourreaux de chaque nature seront optimisés par la suite pour correspondre aux besoins réels du tramway de Québec et Lévis.

4.6.2 Caractéristiques des fourreaux

Les fourreaux sont en PVC lisses, aiguillés et noyés dans du béton.

Le dimensionnement des fourreaux dépend de la nature des câbles et de l'implantation et la forme de la multitubulaire tout au long du tracé.

En divers endroits les rayons de courbures devront être inférieurs à 25 mètres ; dans ces cas là, les fourreaux seront préformés comme indiqué ci-après :

Diamètre des fourreaux en mm	42/45	56/60	77/80	75/80	96/100	155/160
Rayon en m	4	6	10	12	14	25

Ces fourreaux seront posés et calés dans un enrobage béton spécifique de 5 cm autour des fourreaux en limite de la multitubulaire et d'un minimum de 3 cm entre les différents fourreaux.

4.6.3 Justification du positionnement de la multitubulaire

Sur de nombreuses rues, les zones disponibles pour mettre en place la multitubulaire sont réduites. La présence, sur ces zones, de nombreux réseaux existants et l'exiguïté des rues imposent de réduire au maximum l'emprise de la multitubulaire. Cette contrainte technique trouve une solution dans la mise en place d'une multitubulaire unique regroupant les courants faibles et courants forts. La mise en commun des courants faibles et forts dans la même multitubulaire est techniquement possible au regard des différents types de courants sous réserve de mettre en place des écarts normés entre les courants les plus forts et les courants faibles. Ce rapprochement des différents courants est possible grâce au progrès réalisé par les fabricants de câbles en matière d'isolation.

La solution de la multitubulaire unique présente également l'avantage de coûter moins cher que deux multitubulaires distinctes courants forts et faibles.

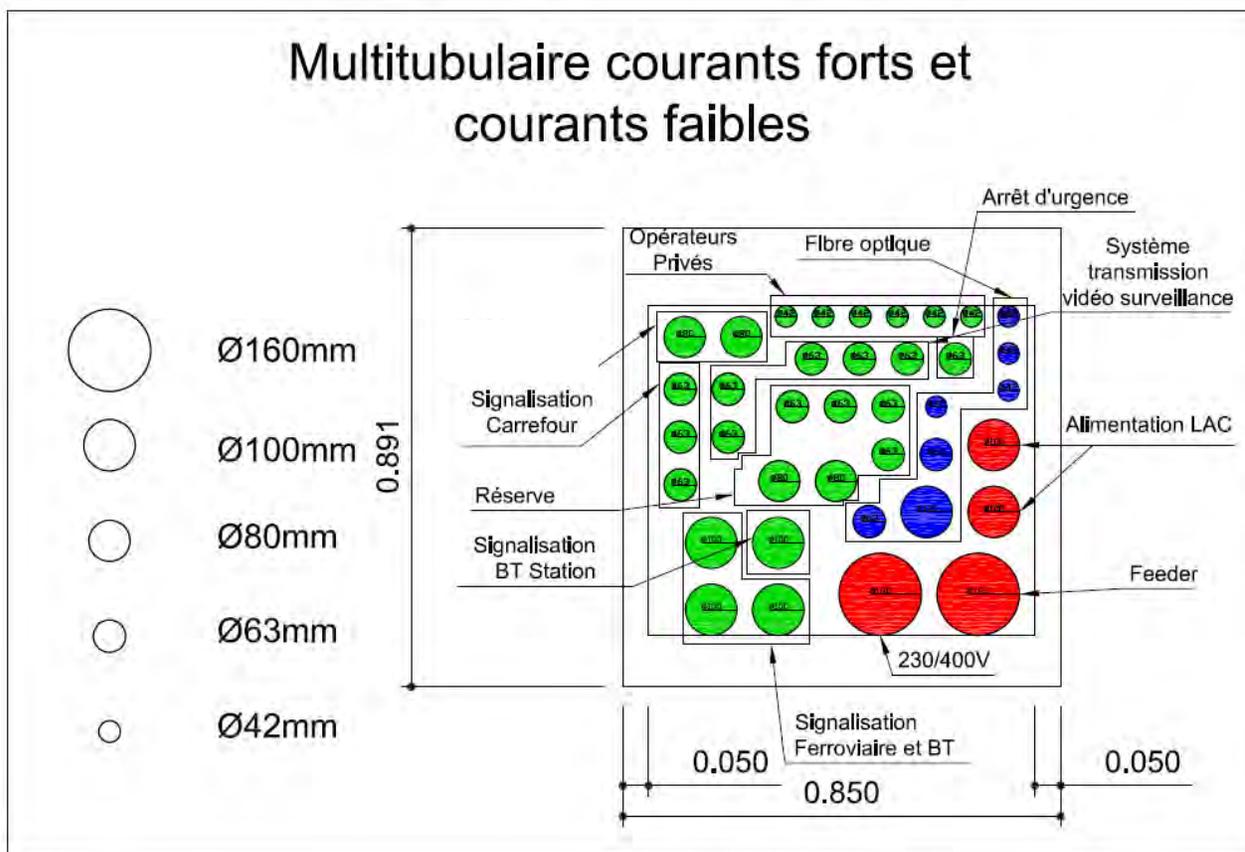
Les chambres de tirage mises en œuvre sur le tracé pourront être communes aux deux types de courant. Néanmoins, la mise en commun des courants forts et faibles est possible si la séparation des fourreaux dans la chambre de tirage est claire. A ce sujet, toutes les précautions de mise en œuvre seront prises lors des travaux.

Au niveau des carrefours, les câbles d'alimentation de la SLT seront écartés de la multitubulaire pour alimenter le carrefour. Ces mêmes câbles rejoindront la multitubulaire après le carrefour. Pour cela il sera mis en place avant et après le carrefour une chambre de tirage pour les câbles d'alimentation de la SLT. Au niveau des zones de manœuvre les câbles de la signalisation ferroviaire et basse tension seront eux aussi écartés de la multitubulaire.

La multitubulaire sera positionnée sur le côté ou sous la plateforme selon les contraintes géométriques du tracé à une profondeur minimum de 0,90 mètre (à revoir en cours d'étude). Cette épaisseur est suffisante pour effectuer un compactage régulier de la couche d'arase et obtenir une surface de contact avec le béton. La multitubulaire reviendra en extérieur de la plateforme dès qu'il y aura une chambre de visite et dès l'arrivée en quai de station de tramway. Il n'est pas prévu de noyer la multitubulaire dans la plateforme du fait de la quasi impossibilité d'effectuer la maintenance (excepté pour le franchissement des ouvrages d'art où les fourreaux pourront être disposés dans la couche de revêtement).

Les chambres de visite seront totalement accessibles sans perturbation de l'exploitation de la ligne. Les rayons en plan et en profil en long seront limités à 25 mètres pour permettre le tirage des câbles.

Figure 16 : Coupe de principe d'une multitubulaire courants forts et faibles



4.6.4 Traversées de voie

Des fourreaux libres seront mis en place sous la voie en traversée afin de servir de fourreaux de réserve. La couverture des traversées sera au minimum de 1,50 mètres (à revoir en cours d'étude) par rapport au plan de roulement.

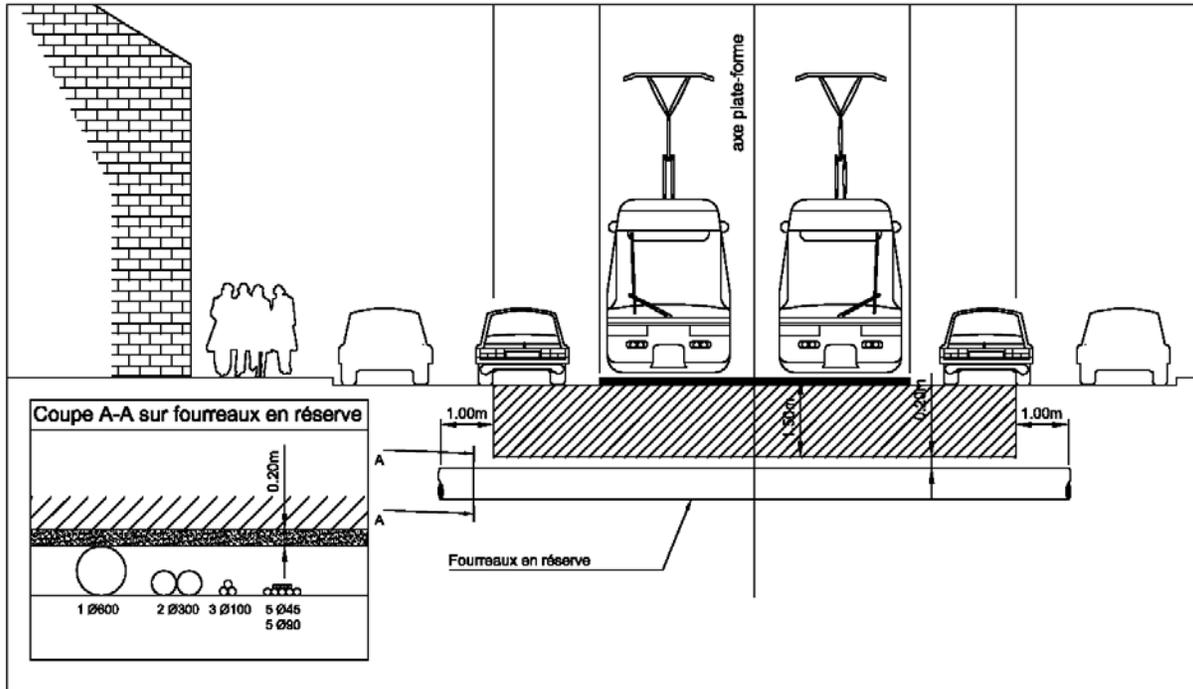
Il est prévu :

- Tous les 50 mètres, 2 fourreaux diamètre 100 mm
- Tous les 100 mètres, 1 fourreau diamètre 200 mm
- Tous les 200 mètres, 1 fourreau diamètre 300 mm.

A chaque carrefour, des fourreaux transversaux seront mis en place entre deux chambres de tirage, il est prévu :

- 5 fourreaux diamètre 45 mm
- 5 fourreaux diamètre 80 mm
- 3 fourreaux diamètre 100 mm
- 2 fourreaux diamètre 300 mm
- 1 fourreau diamètre 500 mm.

Figure 17 : Schéma de principe de mise en place des fourreaux transversaux



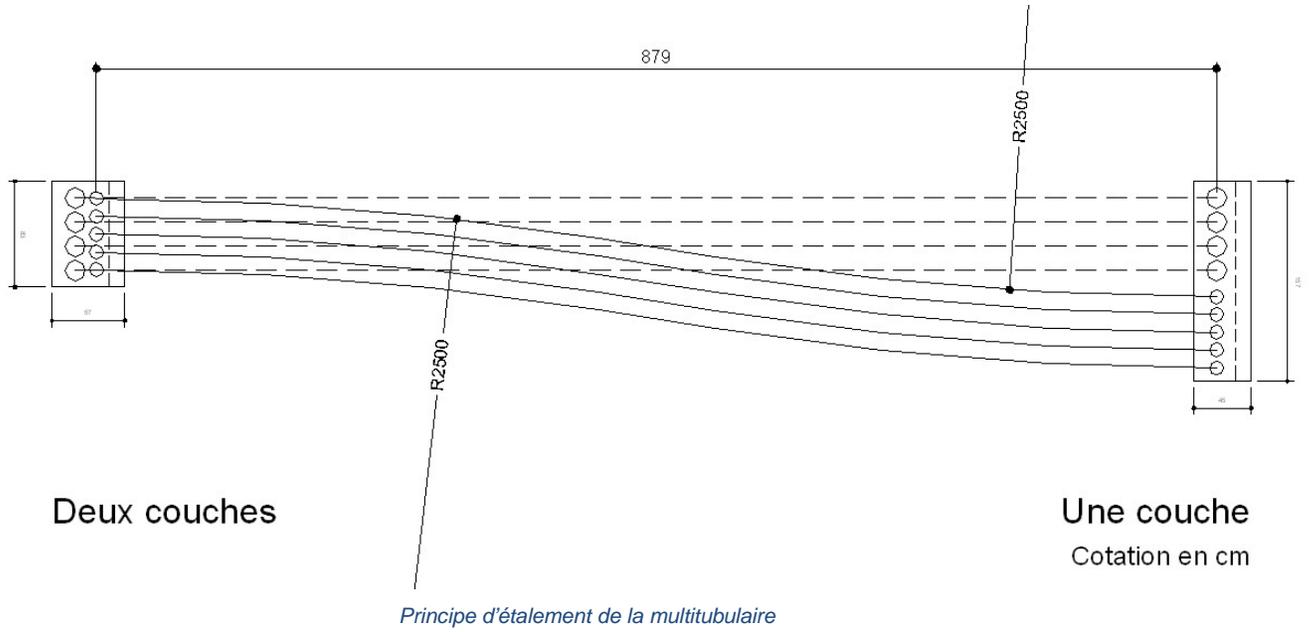
4.6.5 Franchissement des ouvrages d'art

Au passage d'un ouvrage d'art, le projet prévoit l'épanouissement des fourreaux de la multitubulaire et la mise en place d'un système de dilatation des fourreaux.

L'installation des fourreaux se fera dans la couche de revêtement d'épaisseur 20 cm. Pour cette raison les fourreaux de franchissement d'ouvrage ne pourront excéder un diamètre de 90 mm sous voie et 150 mm sous trottoir.

Des chambres de tirage seront implantées sur la multitubulaire en extérieur de la plateforme du tramway.

Figure 18 : Principe d'étalement de la multitubulaire



5. SEPARATEUR TRAMWAY/VOIRIE

5.1 SEPARATEURS TRAMWAY/VOIRIE URBAINE

5.1.1 Généralités

La délimitation de sites propres sera plus ou moins marquée selon les critères suivants :

- Environnement urbains
- Fréquentation piétons
- Deux-roues
- Transports en commun
- Vitesses pratiquées.

Plus généralement, le choix du type de séparateurs devra être un compromis entre la place disponible (et les problèmes fonctionnels engendrés sur la voirie restante pour les autres modes de circulation) et les vitesses commerciales pratiquées.

5.1.2 Uniquement visuels

Le site propre n'est délimité que par un marquage et/ou une différenciation visuelle, (exemple en carrefour).

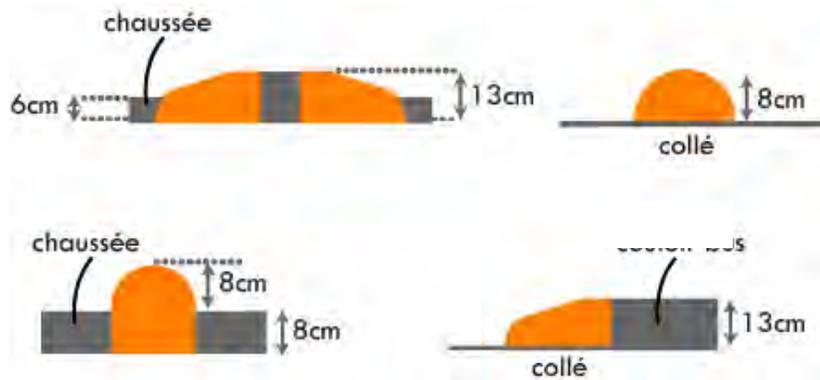
Le site est alors matériellement accessible aux automobilistes, dans les conditions définies par le code de la route, c'est-à-dire, en présence d'une ligne longitudinale discontinue (Norme NF P 98.607). Il s'agit là d'un site réservé accessible non protégé.

5.1.3 Franchissables

Le site propre est délimité par un dispositif matériellement franchissable. Il s'agit d'un site propre protégé accessible.

Les séparateurs franchissables peuvent être par exemple des bourrelets réalisés en matériaux de matières diverses d'une largeur d'environ 30 cm ou des dénivellations du site propre délimité par une bordure franchissable arrondie ou chanfreinée.

Figure 19 : Exemples de séparateurs franchissables



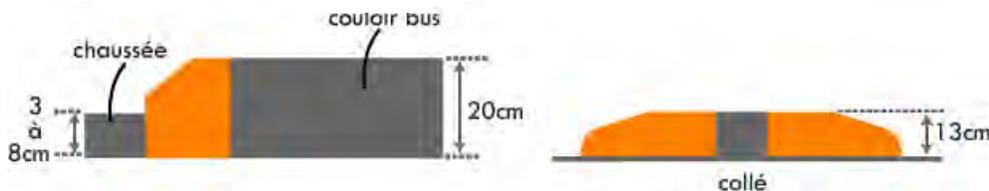
5.1.4 Semi-franchissables

Le site propre est délimité par un séparateur infranchissable par les véhicules automobiles, mais franchissable par les piétons, ainsi que par les deux-roues. Il s'agit d'un site propre protégé inaccessible.

Les séparateurs semi-franchissables peuvent être par exemple des bordures hautes encadrant un terre-plein, ou d'autres dispositifs similaires.

Exemples de séparateurs semi-franchissables :

Figure 20 : Exemples de séparateurs semi-franchissables



5.1.5 Infranchissables

Le site propre est délimité par un séparateur infranchissable pour tous les autres usagers de la voirie (véhicules automobiles, piétons, vélos). Il s'agit d'un site propre intégral.

On s'efforcera dans la mesure du possible d'obtenir un séparateur d'au moins 1,0 m de largeur utile. Toute largeur inférieure ne peut en effet jouer le rôle de refuge pour piétons, et risque malgré tout d'en donner la perception, ce qui peut s'avérer dangereux dans certains cas.

A défaut, on préférera se limiter à un dispositif de largeur nulle ou quasi-nulle (maximum 0,30 m) et qui ne pourra être en aucun cas être perçu par les piétons comme une possibilité de refuge.

Pour un séparateur infranchissable, la largeur ne sera donc jamais comprise entre 0,30 et 1m.

On pourra utiliser des barrières, chaînes, ou encore des clôtures de façon à prévenir les traversées piétonnes sauvages.

ANNEXE A : Observations sur les abris des stations

Cette annexe présente quelques observations / réflexions préliminaires du Consortium sur la mise en place de stations « tempérées ».

Cas des quais latéraux

Trois scénarios sont possibles :

1. Fermer le quai à l'arrière, mettre une toiture sur une partie du quai + sources de chaleurs (voir planche 1 de 5)

L'emprise en station à quais latéraux de 3,20 m est de $\pm 13,45$ m s'il y a de la circulation routière à l'arrière des deux quais (soit 5,85 m de plateforme tramway, 2 quais de 3,20 m et 2 X structure de l'abri de $\pm 0,30$ m et 2 X chasse roue de $\pm 0,30$ m).

Dans ce cas de figure, de la neige s'accumuler sur le quai et il sera nécessaire de déneiger la plateforme du tramway entre les quais.

2. Mettre un abri qui couvre et ferme les deux quais et les deux voies tramway + sources de chaleurs (voir planche 2 de 5)

Dans ce cas de figure, avec des quais de 3,20 m et de la circulation routière à l'arrière des deux quais, l'emprise au niveau du quai serait de $\pm 13,85$ m (soit 5,85 m de plateforme tramway, 2 quais de 3,20 m, 2 X mur en arrière quai de $\pm 0,50$ m et 2 X chasse-roue de $\pm 0,30$ m).

Il est à noter que la couverture de l'abri au-dessus des voies devra être suffisamment haut pour passer par-dessus la ligne aérienne de contact (LAC) qui sera de façon générale à $\pm 6,00$ m au-dessus du plan de roulement du tramway en milieu urbain.

Cet abri, s'il est implanté sur toute la longueur du quai, éliminerait la neige sur le quai et la plateforme du tramway entre les quais sauf possiblement aux extrémités.

3. Mettre en place un abri qui couvre et ferme seulement les quais + sources de chaleurs (voir planche 3 de 5)

Compte tenu de la fermeture de l'abri du côté des voies du tramway, la plateforme du tramway devra être élargie de 2 X 0,25 m dans le présent cas de figure pour respecter le GLO entre le tramway et la face de l'abri coté voie ferrée.

L'emprise au niveau de la station serait donc dans ce cas de 14,55 m (soit 5,85 m de plateforme, + 2 X 0,25 m de GLO, + 2 X quais de 3,20 m + 4X 0,30 m de structures et 2 X 0,30 m de chasse-roue).

Il est de plus à noter que ce scénario requiert des portes palières, nécessite le déneigement du nez de quai en face des portes palières, et oblige la mise en place d'un système de sécurité pour éviter toute intrusion côté voie ferrée entre la façade de l'abri et le tramway.

Il est aussi à noter dans ce cas de figure que la neige s'accumulera sur la plateforme du tramway et qu'il faudra par conséquent la déneiger entre les quais.

Cas du quai central

Deux scénarios sont possibles :

1. Mettre un abri qui couvre et ferme le quai et les deux voies tramway + sources de chaleurs(voir planche 4 de 5)

Dans ce cas de figure, avec un quai de 4,50 m. et une circulation routière en bordure des plateformes du tramway, l'emprise au niveau du quai serait de ± 12,10 m (soit 1 quai de 4,50 m, 2 X plateformes de tramway de 3,00 m, + 2 murs en arrière quai de ± 0,50 m et 2 X chasse-roue de ± 0,30 m.).

Il est à noter que la couverture de l'abri au-dessus des voies devra être suffisamment haut pour passer par-dessus la ligne aérienne de contact (LAC) qui sera de façon générale à ± 6,00 m au-dessus du plan de roulement du tramway en milieu urbain.

Cet abri, s'il est implanté sur toute la longueur du quai, éliminerait la neige sur le quai et la plateforme du tramway sauf possiblement aux extrémités.

Il est à noter qu'un quai central est moins confortable pour les usagers qui sont dans le tramway puisqu'il faut introduire des courbes et contre-courbes dans les voies pour contourner le quai central.

2. Mettre en place un abri qui couvre et ferme seulement les quais + sources de chaleurs (voir planche 5 de 5)

Compte tenu de la fermeture de l'abri du côté des voies du tramway, la plateforme du tramway devra être élargie de 2 X 0,25 m dans le présent cas de figure pour respecter le GLO entre le tramway et la face de l'abri coté voie ferrée.

L'emprise au niveau de la station serait donc dans ce cas de 12,60 m (soit 2 X plateformes de 3,25 m, 1 X quai de 4,50 m, 2 X ± 0,50 m de structures et 2 X ± 0,30 m de bordures entre les plateformes tramway et les voies de circulation routière).

Il est de plus à noter que ce scénario requiert des portes palières, nécessite le déneigement du nez de quai en face des portes palières, et oblige la mise en place d'un système de sécurité pour éviter toute intrusion côté voie ferrée entre la façade de l'abri et le tramway.

Il est aussi à noter dans ce cas de figure que la neige va s'accumuler entre les quais et qu'il faudra par conséquent déneiger la plateforme du tramway entre les quais.

En bref :

i) Les solutions à quais latéraux demandent une plus grande emprise (de 13,85 m à 14,55 m) que les solutions à quai central (de 12,10 m à 12,60 m).

ii) Les solutions où seulement les quais sont couverts, nécessitent un déneigement de la plateforme et du quai en parti. Ces solutions obligent aussi, la mise en place d'un système de sécurité pour éviter toute intrusion côté voie ferrée entre la façade de l'abri et le tramway.

iii) La solution à quai central avec couverture du quai et des voies est une solution qui offre plusieurs avantages puisqu'elle :

- requiert le moins d'espace au niveau de l'insertion 12,10 m,
- protège l'ensemble du quai contre la neige,
- ne requiert pas de portes palières,

- ne pose pas de problèmes de sécurité pour les usagers (pas neige en face des portes palières, pas d'intrusion entre abri et tramway,...)

Elle a toutefois quelques désavantages puisqu'elle :

- génère un certain inconfort pour les usagers qui sont dans le tramway compte tenu des courbes et contre-courbes insérées dans la voie ferrée,
- occasionne des coûts plus élevés au point de vue entretien (voie ferrée et roues) compte tenu des courbes et contre-courbe,
- présente un coût de construction plus élevé que les solutions avec couvertures limités aux quais.

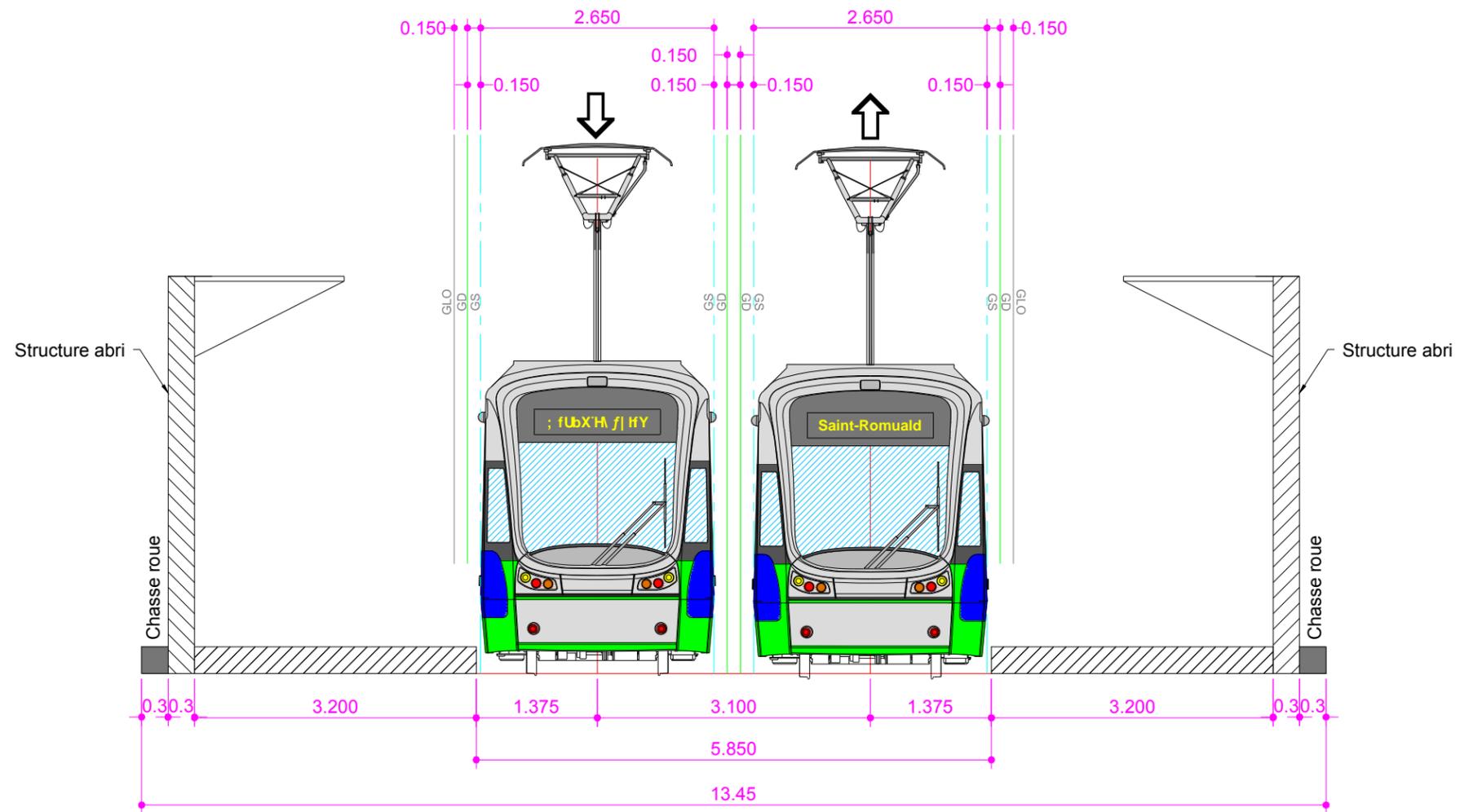
ii) La solution à quais latéraux fermés à l'arrière et toiture à l'avantage :

- d'être peut onéreuse
- de ne pas nécessiter l'introduction de courbes et contre-courbes dans la voie ferrée.

Cette solution a toutefois des désavantages non négligeables puisqu'elle :

- offre une moins bonne protection à l'utilisateur même si des sources de chaleurs étaient installées,
- ne protège pas les quais des intempéries
- nécessite le déneigement de la plateforme de la voie ferrée entre les quais,
- requiert plus d'espace au point de vue insertion (13,45 m) que la solution à quai central.

NB. Il est à noter que dans tous les cas, l'abri pourrait couvrir qu'une partie de la longueur du quai. Ceci est toutefois sans effet sur la largeur requise pour l'insertion.



Station à quais latéraux et quai fermé à l'arrière avec toiture

GLO : GABARIT LIMITE D'OBSTACLE
 GD : GABARIT DYNAMIQUE
 GS : GABARIT STATIQUE

CLIENT :	Rev.	Date	Description	Dessiné par	Vérifié par	Approuvé par
 RÉSEAU DE TRANSPORT DE LA CAPITALE	PA	2012.07.26	Édition préliminaire	M.M.	O.J.	O.J.
	PB	2012.09.04	Édition préliminaire pour commentaires RTC	M.M.	O.J.	O.J.
Dossier :	.	.	.	.	.	.
P-12-600-04	.	.	.	.	.	.

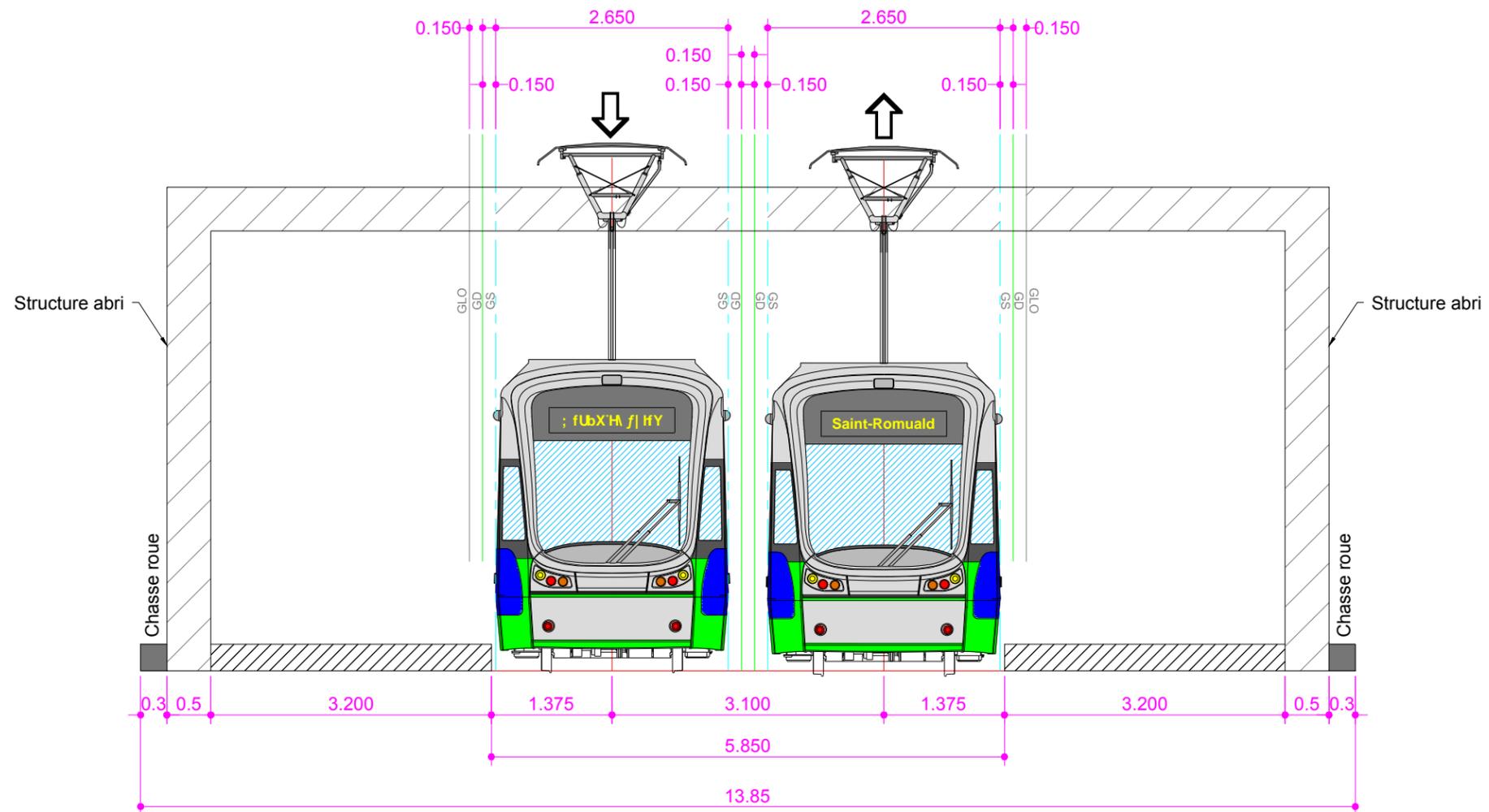
CONSULTANT :



PROJET :

Étude de faisabilité technique du tramway de Québec et de Lévis
Réseau de transport de la Capitale

INTITULÉ DE L'ÉTAPE :	SECTEUR:	610879-0000-4ID1-0041
1.1 PROJET DE RÉF., VARIANTES ET ENJEUX DU TRAMWAY	INTERSTATION:	ÉCHELLES :
INTITULÉ DU PLAN :	1:15000	
ÉTUDE GABARIT-COUPÉ STATION ABRI CAS N°1	PLANCHE:	
		1 / 5 REV. PB



Station à quais latéraux avec abri
des quais et des voies

GLO : GABARIT LIMITE D'OBSTACLE
GD : GABARIT DYNAMIQUE
GS : GABARIT STATIQUE

CLIENT :	Rev.	Date	Description	Dessiné par	Vérifié par	Approuvé par
 RTC <small>RÉSEAU DE TRANSPORT DE LA CAPITALE</small>	PA	2012.07.26	Édition préliminaire	M.M.	O.J.	O.J.
	PB	2012.09.04	Édition préliminaire pour commentaires RTC	M.M.	O.J.	O.J.
Dossier :	.	.	.	.	.	.
P-12-600-04	.	.	.	.	.	.

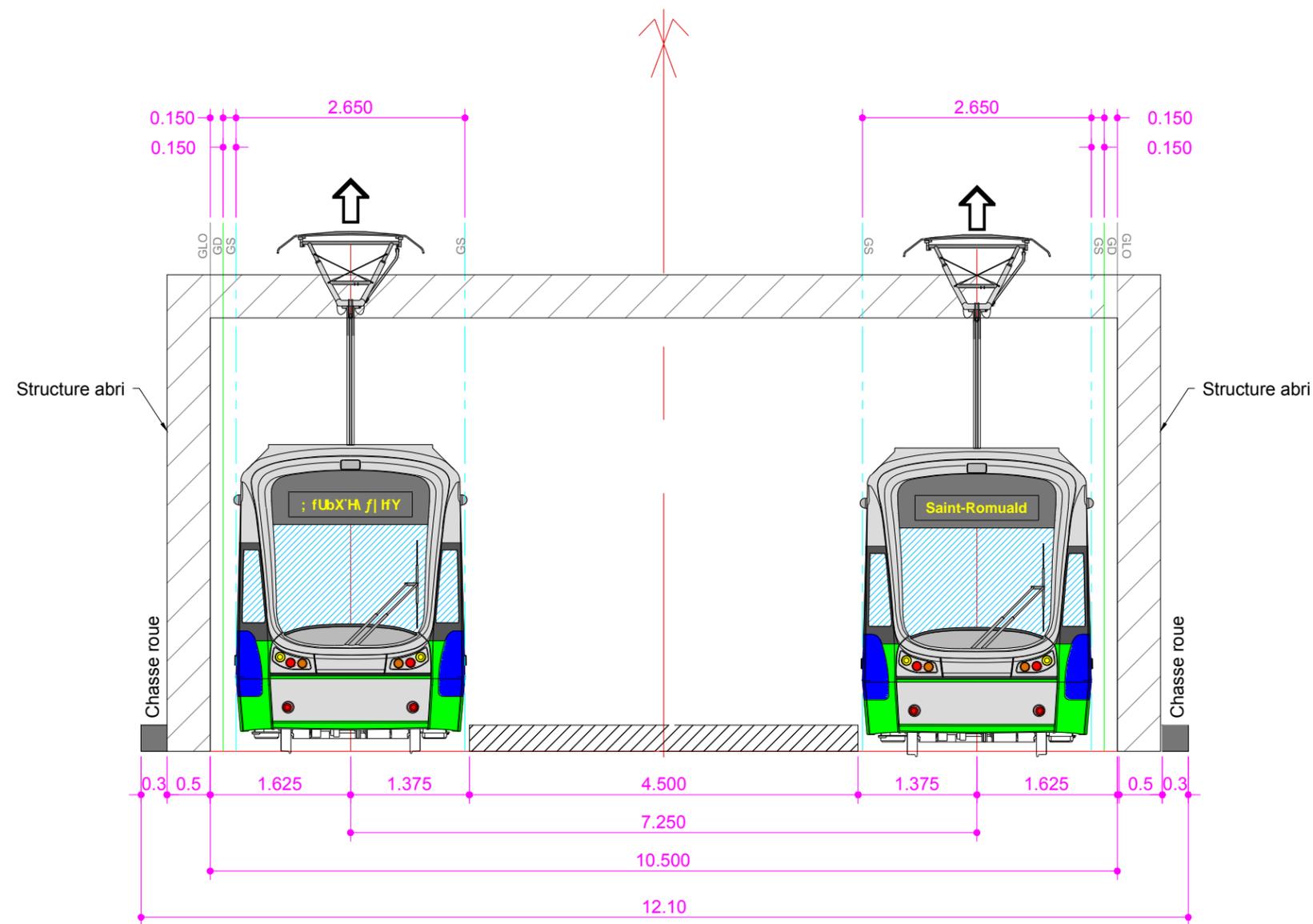
CONSULTANT :



PROJET :

Étude de faisabilité technique du tramway de Québec et de Lévis
Réseau de transport de la Capitale

INTITULÉ DE L'ÉTAPE :	SECTEUR:	610879-0000-4ID1-0042
1.1 PROJET DE RÉF., VARIANTES ET ENJEUX DU TRAMWAY	--	
INTITULÉ DU PLAN :	INTERSTATION:	ÉCHELLES :
ÉTUDE GABARIT-COUPÉ STATION ABRI CAS N°2	--	1:15000
	PLANCHE:	2 / 5
	--	REV. PB



Station à quai axial avec abri pour quai et voies du tramway

GLO : GABARIT LIMITE D'OBSTACLE
 GD : GABARIT DYNAMIQUE
 GS : GABARIT STATIQUE

CLIENT :	Rev.	Date	Description	Dessiné par	Vérifié par	Approuvé par
 RÉSEAU DE TRANSPORT DE LA CAPITALE	PA	2012.07.26	Édition préliminaire	M.M.	O.J.	O.J.
	PB	2012.09.04	Édition préliminaire pour commentaires RTC	M.M.	O.J.	O.J.
Dossier :	.	.	.	.	.	.
P-12-600-04	.	.	.	.	.	.

CONSULTANT :

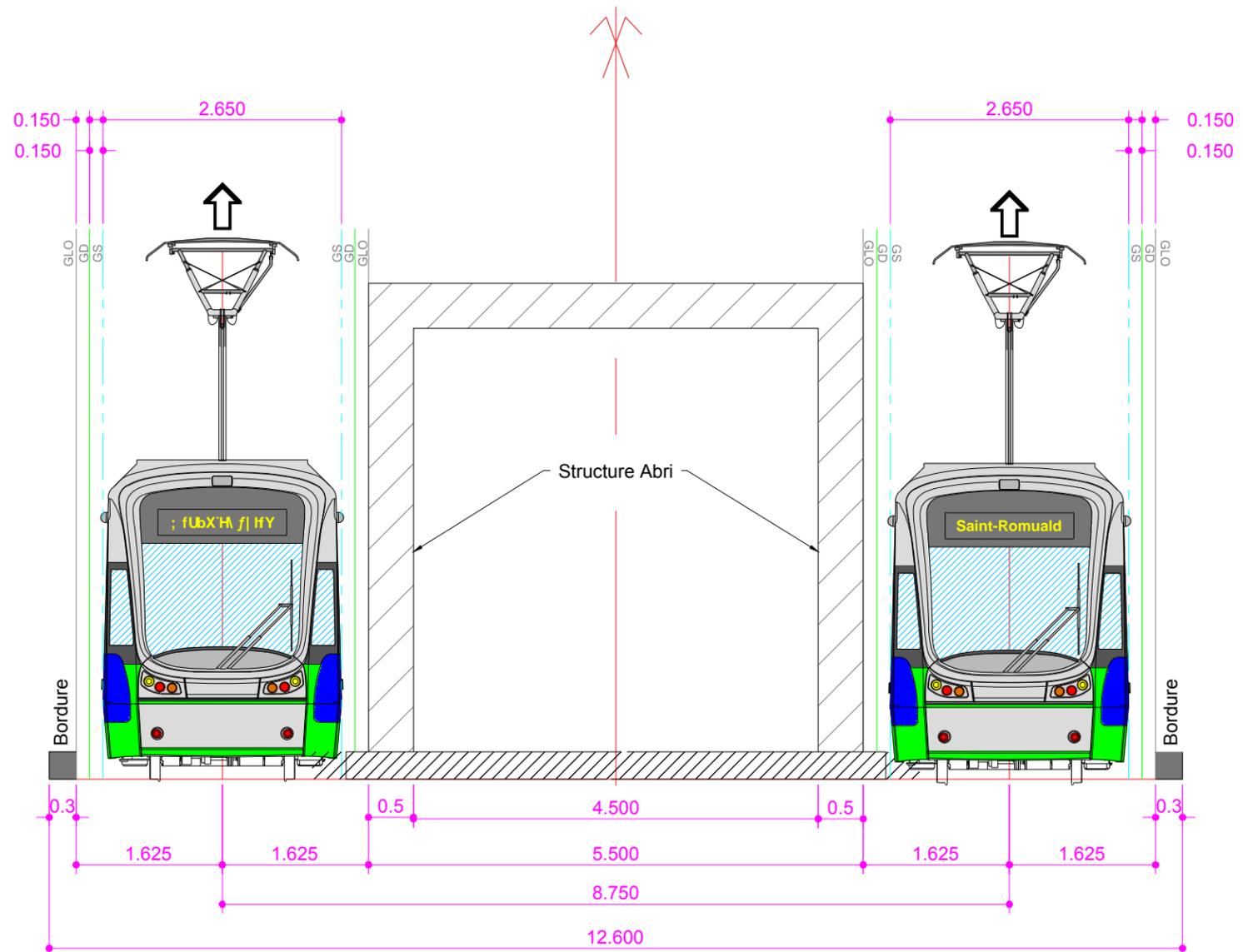


PROJET :

Étude de faisabilité technique du tramway de Québec et de Lévis
Réseau de transport de la Capitale

INTITULÉ DE L'ÉTAPE :	1.1 PROJET DE RÉF., VARIANTES ET ENJEUX DU TRAMWAY
INTITULÉ DU PLAN :	ÉTUDE GABARIT-COUPÉ STATION ABRI CAS N°4

SECTEUR:	--	610879-0000-4ID1-0044
INTERSTATION:	--	ÉCHELLES : 1:15000
PLANCHE:	--	4 / 5 REV. PB



Station à quai axial
avec abri quai

GLO : GABARIT LIMITE D'OBSTACLE
GD : GABARIT DYNAMIQUE
GS : GABARIT STATIQUE

CLIENT :	Rev.	Date	Description	Dessiné par	Vérifié par	Approuvé par
 RÉSEAU DE TRANSPORT DE LA CAPITALE	PA	2012.07.26	Édition préliminaire	M.M.	O.J.	O.J.
	PB	2012.09.04	Édition préliminaire pour commentaires RTC	M.M.	O.J.	O.J.
Dossier :	.	.	.	.	.	.
P-12-600-04	.	.	.	.	.	.

CONSULTANT :



PROJET :

Étude de faisabilité technique du tramway de Québec et de Lévis
Réseau de transport de la Capitale

INTITULÉ DE L'ÉTAPE :	1.1 PROJET DE RÉF., VARIANTES ET ENJEUX DU TRAMWAY
INTITULÉ DU PLAN :	ÉTUDE GABARIT-COUPÉ STATION ABRI CAS N°5

SECTEUR:	--	610879-0000-4ID1-0045
INTERSTATION:	--	ÉCHELLES : 1:15000
PLANCHE:	--	5 / 5 REV. PB

ANNEXE B : NOTE TECHNIQUE SUR LE MATÉRIEL ROULANT



Étude de faisabilité technique du tramway de Québec et de Lévis



Dossier P-12-600-04

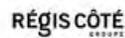
Consortium Tramway Québec-Lévis



SNC-LAVALIN



et ses partenaires



Intitulé du document

NOTE TECHNIQUE MATÉRIEL ROULANT

PRINCIPAUX COLLABORATEURS :

Jean-François Guinet

RÉVISÉ PAR : JÉRÔME VENDASI

APPROUVÉ PAR : Pascal Chovin

NUMÉRO DU DOCUMENT :		610879-0010-4REN-0002
REV.	DATE	TYPE DE RELÂCHE
PA	01/08/2012	Émission préliminaire pour commentaire
PB	08/08/2012	Compléments suite aux commentaires SNC Lavalin
PC	09/08/2012	Compléments suite aux commentaires SNC Lavalin
PD	24/08/2012	Compléments suite aux commentaires RTC

INDEX DES RÉVISIONS**RÉSERVÉ AU CONTRÔLEUR DE LA DOCUMENTATION**

SOMMAIRE

1.	OBJET	4
2.	ENVIRONNEMENT	5
2.1	Parcours	5
2.1.1	Pentes.....	5
2.1.2	Rayons de giration.....	5
2.2	Conditions climatiques	6
2.2.1	Adhérence	6
2.2.2	Précipitations	6
2.2.3	Neige.....	6
3.	CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU MATERIEL ROULANT	7
3.1	Réversibilité	7
3.2	Capacité	7
3.3	Dimensions	Erreur ! Signet non défini.
4.	SOLUTIONS POUR LE MATERIEL ROULANT	9
4.1	Tramway à roulement fer	9
4.1.1	Aspect technique	9
4.1.2	Aspect industriel	9
4.1.3	Aspect financier	9
4.1.4	Exemple d'application.....	10
4.2	Tramway à roulement pneumatique	11
4.2.1	Aspect technique	11
4.2.2	Aspect industriel	11
4.2.3	Aspect financier	12
4.2.4	Exemple d'application.....	12
4.3	Vehicule à cremailiere	13
4.3.1	Aspect technique	13
4.3.2	Aspect industriel	13
4.3.3	Aspect financier	13
4.3.4	Exemple d'application.....	14
5.	CONCLUSION	15
5.1	Bilan de l'analyse	15
5.2	Recommandations	16

1. OBJET

L'objet de cette note est d'analyser les différentes solutions techniques possibles pour des matériels de type tramway adaptés aux contraintes climatiques et de tracé des villes de Québec et de Lévis.

Il s'agit d'une analyse qualitative qui apporte un éclairage général sur les technologies possibles et sur leurs avantages et inconvénients dans le cas particulier des villes de Québec et de Lévis.

2. ENVIRONNEMENT

2.1 PARCOURS

Pour vérifier l'adaptation entre un matériel roulant et un tracé envisagé pour un tramway, il est nécessaire de prendre en compte d'une part les pentes maximales observées ainsi que les rayons de giration minimaux. En effet, ces deux critères contribuent à définir les performances à atteindre, l'architecture voire les technologies utilisées.

2.1.1 Pentes

Les données ci-dessous sont basées sur une analyse simplifiée du tracé proposé. Elle devra être consolidée lors de l'élaboration plus détaillée de celui-ci.

Le réseau est caractérisé par des variations d'altitude importantes dans trois zones :

- Du Boulevard René Lévesque à la Côte d'Abraham (ligne Nord-Sud) : pente moyenne de l'ordre de 8% sur 500 m,
- Sur l'Avenue Nérée-Tremblay entre les boulevards Laurier et Charest (ligne Est-Ouest) : pente moyenne de l'ordre de 6% sur 750 m,
- Autour du Pont de Québec (ligne Est-Ouest) : pente moyenne de l'ordre de 5% sur 1000 m.

Nota : Le cumul d'une pente et d'une courbe génère une pente équivalente supérieure. Par exemple une pente de 6% combinée à une courbe de rayon 80 m sera équivalente pour le matériel roulant au franchissement d'une pente de 7% en alignement droit.

2.1.2 Rayons de giration

Les lignes envisagées présentent assez peu de sinuosité. Il existe cependant des points singuliers qui présentent des virages à environ 90°. Ils sont situés :

- Pour la ligne Est-Ouest du Boulevard Laurier à l'Avenue Nérée-Tremblay,
- Pour la ligne Nord-Sud aux angles Boulevard René Lévesque / Avenue Honoré Mercier, Côte d'Abraham / Rue de la Couronne et Avenue Eugène Lamontagne / 1^{ère} Avenue.

De façon générale, ces virages sont situés sur des artères larges pour la ligne Est-Ouest et sur des artères moyennes pour la ligne Nord-Sud. Les rayons associés seront vraisemblablement proches de ceux acceptables pour des matériels de type tramway à roulement fer.

2.2 CONDITIONS CLIMATIQUES

Les contraintes climatiques font parties des critères qui doivent être pris en compte pour la conception d'un matériel roulant. Dans le cadre de cette première analyse, seules les conditions qui ont une influence sur l'adhérence sont étudiées.

2.2.1 Adhérence

L'adhérence entre un matériel roulant et la plate-forme sur lequel il se déplace permet de garantir d'une part la sécurité des circulations et d'autre part les performances (temps de parcours, franchissement des pentes).

Celle-ci est dépendante :

- Des conditions climatiques (par exemple : pluie)
- De la technologie utilisée (par exemple : roulement fer, roulement sur pneumatiques,...),
- Des éventuels dispositifs permettant de l'améliorer (par exemple : anti-enrayage)

Plusieurs conditions environnementales peuvent dégrader l'adhérence : pluie, neige, verglas, feuilles mortes humides et donc affecter la sécurité et / ou les performances.

2.2.2 Précipitations

En termes de précipitations, les valeurs à prendre en compte pour la ville de Québec sont :

- Pluie : 120 mm/h
- Neige : 200 mm/h

2.2.3 Neige

Outre son action sur la dégradation de l'adhérence, la présence de neige peut générer d'autres problèmes notamment liés à son accumulation sous le matériel. Dans ces cas, le fonctionnement des matériels roulants peut être perturbé, voire la sécurité de la circulation directement affectée (risque de déraillement par exemple). Quelle que soit la technologie retenue, il est donc nécessaire de dégager la voie au-delà d'une épaisseur de neige qui dépend des caractéristiques du matériel.

Nota : Les parties basses des tramways peuvent être localement à moins de 80 mm du plan de roulement.

3. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU MATÉRIEL ROULANT

3.1 RÉVERSIBILITE

Les tracés proposés pour les villes de Québec et Lévis imposent au matériel roulant d'être réversible, c'est-à-dire de posséder une cabine à chaque extrémité. C'est donc ce type d'architecture de matériel roulant très courante qui est retenu pour l'analyse ci-dessous.

3.2 LARGEUR

En ce qui concerne la largeur des véhicules de type tramway elle est en général comprise entre 2,1 et 2,65 m.

Dans le cadre de cette analyse et sauf spécificité d'un matériel, les largeurs prises en compte sont les plus communes pour les matériels récemment mis en service soit entre 2,4 et 2,65 m et permettent de répondre au besoin en capacité.

L'écart capacitaire entre les versions de 2,4 m et 2,65 m de large est faible (de l'ordre de 5%). La largeur de 2,65 m apporte une augmentation de la largeur de circulation centrale dans la rame entre les rangées de sièges, ainsi que de la largeur des sièges.

3.3 LONGUEUR - CAPACITÉ

En ce qui concerne le besoin en capacité, les éléments disponibles indiquent que des véhicules d'une capacité d'environ 200 places (assisés et debout) pourraient convenir. Un véhicule d'une longueur d'environ 30 à 33 m est adapté à ce besoin.

La plupart des constructeurs ont désormais développé des solutions qui permettent d'augmenter la capacité des matériels après leur mise en service. Il s'agit d'allonger ceux-ci d'environ 10 m par l'ajout de modules intermédiaires et d'un bogie. Dans le cas du passage d'une longueur de 30-33 m à 40-43 m, le gain en capacité est de l'ordre de 30%.

Le tableau ci-dessous présente les capacités de matériel roulant en fonction de la largeur et de la longueur de la rame (capacité avec 4 personnes par m² pour les places debout).

Longueur MR	Capacité d'une rame
30 - 33 m	~ 200 – 220 personnes
40 - 43 m	~ 270 – 300 personnes

Les capacités de transport qui en découlent sont de l'ordre de :

- 4000 personnes par heure et par sens avec un intervalle de 3 minutes et des rames de 30-33m,
- 6000 personnes par heure et par sens avec soit un intervalle de 2 minutes et des rames de 30-33m, soit un intervalle de 3 minutes avec des rames de 40-43m,
- 8000 personnes par heure et par sens avec un intervalle de 2 minutes et des rames de 40-43 m

Il est recommandé, en particulier dans le cas d'un nouveau réseau, de s'assurer que ses différents composants sont conçus pour permettre un allongement des rames.

4. SOLUTIONS POUR LE MATERIEL ROULANT

4.1 TRAMWAY À ROULEMENT FER

4.1.1 Aspect technique

Dans la gamme de longueur adaptée au projet, les tramways proposés par les constructeurs possèdent typiquement trois bogies dont deux ou trois peuvent être motorisés.

Le roulement fer présente les moins bonnes performances en ce qui concerne le franchissement des pentes. Cependant, des dispositions techniques complémentaires tels que les fonctions sablage, anti-enrayage et anti-patinage permettent d'assurer des circulations même en conditions d'adhérence dégradée (c'est-à-dire en présence de feuilles mouillées, pluie ou neige) avec des pentes de 6% à 7% (en alignement droit). Il est également possible d'augmenter ces valeurs avec une motorisation plus importante : il s'agit, par exemple pour un tramway d'environ 30 mètres, de passer de deux bogies motorisés sur trois à trois bogies motorisés sur trois. On peut alors franchir dans les mêmes conditions des pentes de 8% à 9% (en alignement droit).

Nota : Une configuration 40 m avec quatre bogies motorisés n'étant à ce jour pas développée (faisabilité technique à vérifier) et afin de garantir la possibilité d'un allongement tel que décrit au §3.2, il est recommandé de limiter les pentes à 8% en alignement droit (soit par exemple 7% avec une courbe de rayon 80 m) qui sont franchissables pour un tramway à trois bogies motorisés sur quatre.

Le rayon de giration minimum de ce matériel est d'environ 25 m.

4.1.2 Aspect industriel

Le marché du tramway à roulement fer est particulièrement concurrentiel. En effet, de nombreux industriels ont développé des plates-formes de matériels modernes qui peuvent être mis en service dans la plupart des villes.

4.1.3 Aspect financier

Compte tenu de la situation concurrentielle, les coûts sont attractifs et le seront d'autant plus que les spécificités sont réduites. A titre d'exemple, une configuration à deux bogies motorisés sur trois garantira une meilleure concurrence.

4.1.4 Exemple d'application

La ville de Bergen en Norvège, s'est dotée en 2010 d'un tramway moderne (voir photo N°1). Les conditions climatiques de cette ville sont particulièrement contraignantes en particulier du fait des fortes chutes de pluie tout au long de l'année. Les pentes maximales sont de 6%.

Le constructeur suisse STADLER a fourni le matériel roulant basé sur sa plate-forme « Variobahn ». Celui-ci mesure environ 32 m de long pour une largeur de 2,65 m. Il possède trois bogies dont deux motorisés.



Photo N°1 : Tramway de Bergen, Norvège

4.2 TRAMWAY À ROULEMENT PNEUMATIQUE

4.2.1 Aspect technique

Le roulement pneumatique permet à un véhicule de type tramway de franchir des pentes qui se rapprochent de valeurs franchissables par un autobus (environ 12% à 13% pour un véhicule de 25 ou 32 m de long). Par contre dans la version allongée à 39 m, la capacité de franchissement de pente est réduite à environ 10 %.

Le matériel roulant possède par ailleurs un dispositif de guidage (constitué de deux galets en « V ») au contact d'un rail central. Celui-ci est protégé afin de ne pas être impacté par la présence éventuelle d'objets.

Le rayon de giration minimum de ce matériel est de 10,5 m.

Le comportement de ce matériel en conditions climatiques hivernales doit être analysé suivant deux aspects : au niveau des pneumatiques d'une part et au niveau du guidage d'autre part.

En ce qui concerne les pneumatiques, des dispositions telles que le montage de pneumatiques « neige » voire de pneumatiques cloutés permet de s'assurer d'une bonne adhérence dans la plupart des circonstances.

Pour ce qui est du guidage, les risques sont principalement liés à l'accumulation de neige ou à la présence de verglas. Les efforts appliqués par les galets de guidage (environ 75 kg par galet) pourraient être insuffisants pour que le comportement du véhicule ne soit pas perturbé. Ce point devra faire l'objet d'un approfondissement.

Nota : Les villes européennes dans lesquelles circulent ces véhicules ne sont pas soumises à des conditions climatiques hivernales comparables à celles de Québec et Lévis.

Pour ce type de véhicule également, l'allongement est possible par pas de 7 m. Par exemple, la capacité d'un véhicule de 39 m est de 26% supérieure à celle d'un véhicule de 32 m.

Ce matériel présente une largeur standard de 2,2 m. A longueur égale, sa capacité est donc légèrement inférieure à un tramway de 2,4 m (écart d'environ 15%).

4.2.2 Aspect industriel

Même si plusieurs villes en France, en Italie et en Chine se sont équipées de tramways à roulement pneumatique, le marché est caractérisé par un monopole de la société LOHR.

Cette situation pose notamment la question du risque associé à un système propriétaire pour les évolutions d'un réseau sur le long terme.

Nota : des villes comme notamment Caen et Nancy se sont équipées de tramway à roulement pneumatique au début des années 2000, avec du matériel roulant et le système de guidage associé construit par Bombardier. Le constructeur a depuis arrêté la fabrication de ce type de matériel roulant. La ville de Caen a lancé en 2012 les études pour le remplacement du tramway pneumatique par un tramway à roulement fer.

4.2.3 Aspect financier

Les tramways à roulement pneumatique se posent en concurrents des tramways à roulement fer. En conséquence, les prix associés à leurs acquisitions sont assez proches.

De plus, les travaux liés à l'aménagement de la plate-forme sur laquelle circule les matériels sont comparables à la partie basse de la fourchette de prix des tramways à roulement fer.

Des économies sont attendues en ce qui concerne le centre de maintenance (emprise moins importante).

4.2.4 Exemple d'application

Le tramway de la ville de Clermont-Ferrand en France est à roulement pneumatique (voir photo N°2). Il a été mis en service en 2006. La longueur des véhicules est de 32 m et leur largeur de 2,2 m.

Le constructeur LOHR a fourni le matériel roulant basé sur sa plate-forme « Translohr ».



Photo N°2 : Tramway de Clermont-Ferrand, France

4.3 VEHICULE À CREMAILLIERE

4.3.1 Aspect technique

Les crémaillères sont utilisées pour permettre à des véhicules ferroviaires de franchir de très fortes pentes (de l'ordre de 15% voire beaucoup plus). Dans le cas du tracé des villes de Québec et Lévis, les parties qui présentent les plus fortes pentes sont localisées en différents secteurs des deux lignes.

Si un système à crémaillère devait être retenu, celui-ci pourrait être :

- Soit continu. L'intérêt de cette configuration est limité puisque les zones qui présentent de fortes pentes ne constituent qu'une faible proportion du tracé (moins de 5%),
- Soit conçu pour une circulation mixte (avec ou sans crémaillère pour les zones à faible déclivité). Cela génère néanmoins de fortes contraintes d'exploitation et réduirait la vitesse commerciale du matériel donc son attractivité.

De plus, les zones pour lesquelles la crémaillère est nécessaire ne doivent pas présenter de rayons aussi faibles que pour un matériel à roulement fer ou pneumatique (environ 60 m). Dans le cas des villes de Québec et de Lévis, ceci pourrait générer des difficultés d'insertion.

4.3.2 Aspect industriel

Le marché des trains à crémaillère ne présente pas de volumes importants et est donc plutôt un marché de « niche ». Seul un constructeur possède des références suffisamment fournies sur ce segment de produits.

Les matériels déjà en service sont, pour la plupart, des matériels à voie métrique ce qui est incompatible avec des tramways à plancher bas intégral beaucoup plus accessibles. Pour une adaptation à un réseau urbain des développements et validations seront nécessaires.

4.3.3 Aspect financier

Les dispositions techniques supplémentaires d'une part du côté de la voie (crémaillère) et d'autre part du matériel roulant lui-même (transmission) ainsi que l'absence d'effet de série en production contribuent à rendre cette technologie plus onéreuse que les deux autres.

Ceci est d'autant plus critique que le nombre de véhicule sera élevé. Ce sera le cas du réseau de Québec et de Lévis compte tenu du kilométrage du tracé proposé. Le surcoût global du matériel roulant sera donc très significatif.

4.3.4 Exemple d'application

Le « Panoramique des Dômes » est un véhicule à crémaillère moderne en service depuis 2012 en Auvergne, France (voir photo N°3). Il effectue toute l'année une desserte à caractère touristique. La pente maximale est de 15,5 %.

Le constructeur STADLER a fourni le matériel roulant.



Photo N°3 : Tramway « Panoramique des Dômes », Auvergne, France

5. CONCLUSION

5.1 BILAN DE L'ANALYSE

Une analyse qualitative de différentes solutions techniques pour le matériel roulant du tramway de Québec et de Lévis a été effectuée. Celle-ci est basée sur une étude macroscopique du tracé proposé. Elle porte sur trois aspects

- Aspect **technique** : il s'agit de la capacité du type de matériel à répondre aux contraintes climatiques et de tracé
- Aspect **industriel** : il s'agit de la situation du marché sur le plan de la concurrence
- Aspect **financier** : il s'agit des conséquences des aspects techniques et industriels sur le coût du matériel et sur sa maintenance

Le tableau N°1 ci-dessous reprend sous forme de synthèse les aspects abordés et propose une évaluation qualitative suivant trois niveaux de risque pour le projet : faible (vert), moyen (orange) et important (rouge).

Critère	Tramway à roulement fer	Tramway à roulement pneumatique	Tramway à crémaillère
Technique			
Industriel			
Financier (Investissement)			
Financier (Maintenance)			

Tableau N°1 : Synthèse de l'analyse qualitative

5.2 RECOMMANDATIONS

A ce niveau d'analyse préliminaire il ressort que :

- La technologie de tramway à roulement fer est la mieux adaptée au projet des villes de Québec et de Lévis sous réserve de confirmation de la possibilité d'un tracé présentant des pentes de préférence de l'ordre de 6% en alignement droit (possibilité de passer à 8% en adaptant la motorisation) et des rayons de giration supérieurs à 25 m. Ces paramètres permettent de rester avec un matériel roulant éprouvé et commun,
- La technologie de tramway à roulement pneumatique présente une inconnue technique (comportement du guidage en conditions hivernales) et, en termes industriels, une situation de monopole d'un constructeur. Elle n'est donc pas conseillée,
- La technologie à crémaillère est mal adaptée à un réseau urbain (rayons de giration) et présente un investissement lourd alors que les zones à fortes pentes restent limitées par rapport à la longueur du réseau. Ce choix n'est pas conseillé.

Dans cette analyse, l'aspect financier n'a été considéré que du point de vue du matériel roulant. Il est clair que le choix du matériel roulant le mieux adapté (type de roulement, motorisation) est également lié aux conséquences techniques et financières de ses caractéristiques sur l'ensemble du projet et en particulier sur l'infrastructure.

ANNEXE C : NOTE TECHNIQUE SUR L'ÉLECTRIFICATION



Étude de faisabilité technique du tramway de Québec et de Lévis

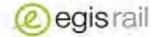


Dossier P-12-600-04

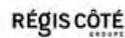
Consortium Tramway Québec-Lévis



SNC-LAVALIN



et ses partenaires



Intitulé du document

NOTE TECHNIQUE SYSTÈMES D'ALIMENTATION TRACTION

PRINCIPAUX COLLABORATEURS :

J VENDASI

P CHOVIN

XXX

RÉVISÉ PAR : P CHOVIN

APPROUVÉ PAR : XXX

NUMÉRO DU DOCUMENT :		610879-0010-4REN-0002
REV.	DATE	TYPE DE RELÂCHE
PA	03 aout 2012	Émission préliminaire pour commentaire
PB	10 août 2012	Compléments suite aux commentaires SNC Lavalin
PC	22 août 2012	Prise en compte des commentaires RTC

INDEX DES RÉVISIONS

RÉSERVÉ AU CONTRÔLEUR DE LA DOCUMENTATION

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	5
2.	ENVIRONNEMENT	6
2.1	PARCOURS	6
2.1.1	Besoins énergétiques	6
2.1.2	Insertion	6
2.2	CONDITIONS CLIMATIQUES	7
2.2.1	Précipitations	7
2.2.2	Amplitude thermique	7
3.	PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES SYSTÈMES D'ALIMENTATION TRACTION.....	8
3.1	MATÉRIEL ROULANT	8
3.2	CIRCUIT(S) DE DISTRIBUTION TRACTION	8
3.3	EQUIPEMENTS DE CONVERSION	8
3.4	ACQUISITION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.....	9
4.	TENSION D'ALIMENTATION TRACTION	10
4.1	TENSIONS TRACTION STANDARD	10
4.2	DOMAINES D'APPLICATION	10
4.2.1	Courant alternatif	10
4.2.2	Courant continu	11
4.2.3	Tableau de synthèse	12
4.3	PROJET DU TRAMWAY DE QUÉBEC	12
4.4	RECOMMANDATION	14
5.	SOLUTIONS AVEC CAPTATION.....	15
5.1	LIGNE AÉRIENNE DE CONTACT (LAC)	15
5.1.1	Présentation.....	15
5.1.2	Insertion – Impact visuel.....	16
5.1.2.1	<i>Supports bilatéraux – Type 1.....</i>	<i>16</i>
5.1.2.2	<i>Poteaux latéraux – Type 2.....</i>	<i>17</i>
5.1.2.3	<i>Poteaux axiaux – Type 3.....</i>	<i>17</i>
5.1.2.4	<i>Fixations sous ouvrages – Type 4.....</i>	<i>17</i>
5.1.3	Technique	18
5.1.4	Financier	18
5.2	SYSTÈME APS D'ALSTOM	19
5.2.1	Présentation.....	19
5.2.2	Description technique	20
5.2.2.1	<i>Principaux éléments au sol du système</i>	<i>20</i>
5.2.2.2	<i>Principaux éléments à bord des véhicules</i>	<i>22</i>
5.2.2.3	<i>Contraintes et performances</i>	<i>22</i>
5.3	SYSTÈME PRIMOVE DE BOMBARDIER.....	24
5.3.1	Présentation.....	24
5.3.2	Description technique	25

5.3.2.1	Description générale.....	25
5.3.2.2	Contraintes et performances	27
5.4	SYSTÈME WIPOST DE LOHR.....	30
5.4.1	Présentation.....	Erreur ! Signet non défini.
5.4.2	Description technique	30
5.4.2.1	Contraintes et performances	32
6.	ENERGIE EMBARQUÉE	34
6.1	ACCUMULATEURS ÉLECTROCHIMIQUES (BATTERIES)	34
6.2	ACCUMULATEURS CAPACITIFS (SUPER-CAPACITÉS).....	36
6.3	ACCUMULATEURS ÉLECTROMÉCANIQUES (VOLANT D'INERTIE).....	39
6.4	SYNTHÈSE.....	41
7.	SYNTHÈSE	42
7.1	RISQUES ASSOCIÉS À CHAQUE TECHNOLOGIE	42
7.2	SOLUTIONS AVEC CAPTATION	44
7.3	SOLUTIONS COMPLÉMENTAIRES AVEC ÉNERGIE EMBARQUÉE	46
8.	RECOMMANDATION	47

1. INTRODUCTION

L'objet de cette note est d'analyser les différents systèmes d'alimentation traction possibles pour un matériel roulant de type tramway adaptés aux contraintes climatiques et de tracé de la ville de Québec.

Il s'agit d'une analyse qualitative qui apporte un éclairage général sur les technologies possibles et sur leurs avantages et inconvénients.

Cette analyse est faite en prenant en compte les 2 domaines de l'alimentation traction, à savoir :

- Les installations fixes de traction,
- Le matériel roulant.

2. ENVIRONNEMENT

2.1 PARCOURS

Pour vérifier l'adaptation entre un système d'alimentation traction et un tracé envisagé pour un tramway, il est nécessaire de prendre en compte :

- d'une part, les besoins énergétiques du matériel roulant,
- d'autre part, l'insertion de la ligne.

En effet ces deux critères contribuent à définir les possibilités d'utilisation ou non des différentes technologies.

2.1.1 Besoins énergétiques

Les besoins énergétiques de traction du matériel roulant dépendent principalement :

- des pentes rencontrées sur le tracé,
- des longueurs d'inter-stations,
- ainsi que de la marche type de circulation des rames (par exemple priorité du tramway aux intersections).

Pour les pentes, les données ci-dessous sont basées sur une analyse simplifiée du tracé proposé. Elle devra être consolidée lors de l'élaboration plus détaillée de celui-ci.

Le réseau est caractérisé par des variations d'altitude importantes dans trois zones :

- Du Boulevard René Lévesque à la Côte d'Abraham (ligne Nord-Sud) : pente moyenne de l'ordre de 8% sur 500 m,
- Sur l'Avenue Nérée-Tremblay entre les boulevards Laurier et Charest (ligne Est-Ouest) : pente moyenne de l'ordre de 6% sur 750 m,
- Autour du Pont de Québec (ligne Est-Ouest) : pente moyenne de l'ordre de 5% sur 1000 m.

2.1.2 Insertion

Les critères d'insertion des différentes technologies portent sur les emprises techniques nécessaires :

- Sous la plateforme tramway, en-dessous du plan de roulement (pour les équipements et installations enterrées),
- Au-dessus de la plateforme tramway (pour les équipements de type LAC),
- En latéral, de part et d'autre de la plateforme tramway (supports, LAC, câblages, ...).

2.2 CONDITIONS CLIMATIQUES

Les contraintes climatiques font parties des critères qui doivent être pris en compte pour la conception d'un système d'alimentation traction. Dans le cadre de cette première analyse, seules les informations d'amplitude thermique et de précipitations ont été étudiées.

2.2.1 Précipitations

En termes de précipitations, les valeurs à prendre en compte pour la ville de Québec sont :

- Pluie : 120 mm/h
- Neige : 200 mm/h

Outre son action sur la dégradation de l'adhérence, la présence de neige ou de verglas peut générer d'autres problèmes notamment pour la captation ou la circulation correcte du matériel roulant sur la ligne.

2.2.2 Amplitude thermique

L'amplitude thermique hiver/été pour les villes de Québec et Lévis est importante : -30/-40°C à +45°C.

3. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES SYSTÈMES D'ALIMENTATION TRACTION

Les systèmes d'alimentation traction sont constitués des éléments principaux suivants :

- Le matériel roulant,
- Un/des circuits de distribution traction servant à acheminer l'énergie électrique de traction jusqu'aux matériels roulants,
- Des équipements de conversion produisant l'énergie électrique de traction dans une tension compatible avec le matériel roulant,
- Un/des point(s) d'acquisition de l'énergie électrique sur le(s) réseau(x) de distribution publique.

Tous ces éléments sont fortement imbriqués entre eux, et forme un système d'alimentation traction.

3.1 MATÉRIEL ROULANT

Dans les systèmes actuels de tramway, la motorisation est embarquée à bord du matériel roulant. Les rames doivent donc être alimentées en énergie électrique de traction. Cette alimentation sert également à alimenter les équipements auxiliaires embarqués (ceux nécessaires au fonctionnement de la rame, et ceux pour le confort des voyageurs et du conducteur).

Le tracé sur lequel circulent les matériels roulants et l'exploitation, conditionnent les besoins en puissance et en énergie.

3.2 CIRCUIT(S) DE DISTRIBUTION TRACTION

Le(s) circuit(s) de distribution traction serve(nt) à acheminer l'énergie électrique jusqu'aux rames dans une tension adaptée au matériel roulant.

Ce circuit est constitué :

- D'un circuit pour l'amenée du courant électrique de traction jusqu'au matériel roulant (polarité positive). Généralement une ligne aérienne de contact (LAC),
- D'un circuit pour le retour du courant de traction (polarité négative). Généralement les rails de roulement du tramway.

D'autres solutions technologiques existent ou sont en cours de développement. Elles sont détaillées dans les paragraphes suivants.

3.3 EQUIPEMENTS DE CONVERSION

Ces équipements servent à convertir une tension provenant du réseau de distribution publique en une tension adaptée pour l'alimentation du matériel roulant, appelée tension traction.

Ces équipements de conversion sont généralement implantés dans des locaux techniques appelés sous stations.

3.4 ACQUISITION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

L'acquisition de l'énergie électrique est faite sur le réseau de distribution publique, et dans le présent cas sur le réseau d'Hydro Québec.

4. TENSION D'ALIMENTATION TRACTION

Le choix de la tension d'alimentation traction concerne à la fois les installations fixes de traction et le matériel roulant.

4.1 TENSIONS TRACTION STANDARD

Les tensions d'alimentation traction standardisées dans les transports urbains ou ferroviaire au niveau international sont les suivants (norme EN 50163 notamment) :

- En courant continu
 - 750V= (*)
 - 1500V=
 - 3000V=

(*) La tension nominale de 600V= est encore présente sur certaines lignes. Pour des lignes nouvelles, il est déconseillé (dans la norme) d'utiliser cette valeur de 600V=. Le 750V= permet un gain de puissance tout en restant dans la même catégorie de tension BTA.

- En courant alternatif
 - 15 000 V~
 - 25 000 V~

D'autres niveaux de tensions existent dans le monde, mais ils ne sont pas repris dans les standards actuels pour la création d'une nouvelle ligne.

4.2 DOMAINES D'APPLICATION

4.2.1 Courant alternatif

Les tensions en courants alternatif (15kV et 25 kV) sont classées dans la catégorie Haute Tension.

Domaines d'application privilégiés :

- les lignes ferroviaires,
- les métros enterrés de fortes capacités,
- les réseaux express régionaux.

Ces tensions sont également utilisées pour des lignes de tram-train, notamment lorsque les véhicules tram-train circulent sur des infrastructures ferroviaires.

Les avantages du courant alternatif sont principalement :

- adapter pour les lignes ou réseaux exploités avec du matériel roulant de forte puissance,
- adapter pour des lignes ou réseaux très étendus,

Par contre, les inconvénients principaux de ces 2 tensions alternatives sont :

- **L'augmentation de la masse à vide du matériel roulant et la réduction de capacité qui en découle** (Les équipements d'abaissement de la tension traction pour la rendre compatible avec les chaînes de traction de la motorisation sont embarqués à bord du MR).
- Une classification dans la catégorie Haute Tension,
- La production de rayonnement électromagnétique,
- Des distances d'isolement à respecter importantes,
- Des montages LAC volumineux (isolateurs de fortes dimensionnements),
- La disponibilité des installations traction dépend directement de celle du réseau amont.

De ce fait, leur utilisation pour des lignes urbaines insérée en surface est déconseillée.

Le standard international de référence est le 25 kV~.

Le 15 kV~ 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 matériel roulant avec cette tension traction.

4.2.2 Courant continu

Les tensions en courants continu 750V= et 1500V= sont classées en Basse Tension (norme européenne), alors que la tension 3000V= est en Haute Tension.

Domaines d'application privilégiés :

- Les réseaux urbains (trolleybus, tramway, métro),
- Les lignes ferroviaires,
- Les réseaux express régionaux.

Les avantages du courant continu sont principalement :

- Les sous stations de traction peuvent être connectées en parallèle sur la ligne,
- La souplesse d'architecture, s'adaptant facilement au schéma d'exploitation d'une ligne,
- L'évolutivité dans le temps pour s'adapter aux évolutions de trafic, prolongement de ligne, ...,
- Les faibles distances d'isollements.

Par contre, les inconvénients principaux sont :

- La production de courant vagabonds. Le circuit de retour du courant de traction (les rails de roulement) doit être isolé du sol afin de réduire les influences sur les installations tiers,
- Dans le cas de matériel roulant de forte puissance (plusieurs MW), la lourdeur des montages caténares,

- Le nombre important de sous stations, du fait du niveau de tension distribué.

Les standards internationaux de référence sont le 750V= et le 1500V=.

Le 3kV= 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 matériel roulant avec cette tension traction.

4.2.3 Tableau de synthèse

Le tableau n°1 ci-dessous reprend sous forme de synthèse les aspects abordés et propose une évaluation qualitative suivant trois niveau : adapté (vert), peu adapté (orange), non adapté (rouge)

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

	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

4.3 PROJET DU TRAMWAY DE QUÉBEC

Le projet de tracé pour le tramway de Québec et de Lévis est réalisé majoritairement en zone urbaine avec une insertion en surface.

Il en découle que le choix de la tension traction se réduit au courant continu avec les niveaux de tension 750V= ou 1500V=.

Les autres types de tension (3kV=, 15kV~, 25kV~) sont classées en catégorie Haute Tension. Pour une insertion urbaines, les contraintes techniques qui en découlent sont importantes (distance d'isolement, sécurité vis-à-vis des risques électriques, ...). De plus :

- le matériel roulant doit embarquer les équipements d'abaissement de tension ce qui alourdi le MR,
- les montages qui en découle, ne sont pas très esthétiques (isolateurs de fortes dimensions).

Tableau 2 : Comparatif 750V= / 1500V=

	750V=	1500V=
Aspects techniques • Avantages	La perte d'une sous station traction (maintenance, perte d'alimentation amont, défaillance interne, ...) peut facilement être compensée par les sous stations encadrantes	Réduction du nombre de sous station
• Inconvénients	Nombre important de sous station traction	1500V= permet un espacement plus important des sous stations, mais il en découle des contraintes plus importantes sur le réseau amont (disponibilité, puissance, transfert de puissance, harmonique)
Aspect industriel MR	Tension la plus courante pour le MR tramway. Marché concurrentiel. Adapté pour différents type de captation (Ligne aérienne de contact (LAC), alimentation par le sol (APS), alimentation sans contact, ...)	A ce jour cette tension reste encore peu utilisée en tramway. Elle est adaptée pour une captation aérienne uniquement. Les constructeurs MR commencent à disposer de chaînes de traction pour le 1500V= (notamment depuis le développement du marché tram-train).
Aspect industriel installations fixes de traction	Marché concurrentiel. De nombreux fournisseurs proposent du matériel 750V= pour les sous stations et la LAC. Pour les types de captation, les solutions alternatives sont propriétaire, donc sans ou faible concurrence sur chaque technologie (APS, sans contact, ...)	Marché concurrentiel pour les équipements de sous stations et les installations LAC.
Aspect financier MR	Compte tenu de la situation concurrentielle, les coûts sont attractifs (et le seront d'autant plus que les spécificités sont réduites)	Les coûts dépendront du planning du projet, et de la quantité de rames achetées A court terme et pour une faible quantité, le marché est peu/pas concurrentiel
Aspect financier	Marché concurrentiel pour les	Les coûts sous stations + LAC

Installations fixes	équipements de sous stations et de LAC.	sont similaires au 750V=, mais avec une répartition différente entre les 2 items.
---------------------	---	---

4.4 RECOMMANDATION

Les critères les plus influents dans le choix entre ces 2 niveaux de tension sont :

- La puissance du matériel roulant (nombre de bogies motorisés),
- L'intervalle d'exploitation en période de pointe,
- Le type d'exploitation en période de pointe (rame en unité simple uniquement, ou exploitation en unité multiples (2 rames accrochées),
- Le planning de réalisation du projet.

Le choix définitif sera préconisé lorsque les valeurs des critères les plus influents mentionnés ci-dessus seront connues.

A ce niveau d'analyse préliminaire, la tension 750V= semble la mieux adaptée au projet du tramway de Québec et de Lévis, dans le cas de rames de 30 mètres et une exploitation en unité simple uniquement, avec un intervalle de l'ordre de 3 à 5 minutes.

5. SOLUTIONS AVEC CAPTATION

La solution avec Ligne Aérienne de Contact (LAC) ou Ligne Aérienne de Traction électrique (LATE) 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 autorités de transports, les urbanistes et les industriels à étudier et développer des systèmes d'alimentation de traction électrique sans LATE, notamment en milieu urbain. Ces motivations sont d'ordre :

- **Esthétique** : absence de poteaux, de câbles aériens et d'ancrages en façade...
- **Technique** : moins de difficultés dans certaines zones (courbe de faible rayon, ouvrage de faible hauteur, traversée de convois exceptionnels, etc).
- **Politique** : volonté de donner une image moderne et originale aux nouveaux tramways.

Les avancées technologiques de ces dernières années ont permis à certains industriels d'imaginer et de développer des solutions alternatives à la LATE.

L'énergie électrique nécessaire à la propulsion et aux servitudes d'un tramway privé de LATE peut être, par principe, fournie par deux grandes familles de procédés :

- **L'alimentation embarquée** (avec mise à disposition ou création de l'énergie électrique à bord du véhicule),
- **Le captage d'énergie via un dispositif extérieur** (à partir du sol ou par voie aérienne simplifiée).

5.1 LIGNE AÉRIENNE DE TRACTION ÉLECTRIQUE (LATE) OU LIGNE AÉRIENNE DE CONTACT (LAC)

5.1.1 Présentation

La distribution traction par ligne aérienne de traction électrique (LATE) ou ligne aérienne de contact (LAC) est le système le plus répandu pour un tramway.

Ce vocable LAC regroupe plusieurs solutions techniques :

- Ligne de contact simple unifilaire : elle est constituée d'un seul fil de contact par voie de circulation tramway,
- Ligne de contact bifilaire : elle est constituée de 2 fils de contact par voie de circulation tramway,
- Caténaire légère : elle est constituée d'un fil de contact suspendu à un câble porteur,
- D'autres types de caténaires existent, mais leurs applications restent uniquement dans le domaine ferroviaire. Ces types de montages ne sont pas adaptés pour une insertion urbaine.

5.1.2 Insertion – Impact visuel

Une LATE nécessite la mise en œuvre de supportage. Plusieurs principes d'insertion du supportage sont utilisés afin d'obtenir une bonne insertion de la LATE en fonction de l'environnement autour de la plateforme tramway. Ces principes sont généralement déclinés par secteurs homogènes pour obtenir une harmonisation esthétique.

Les grandes familles sont :

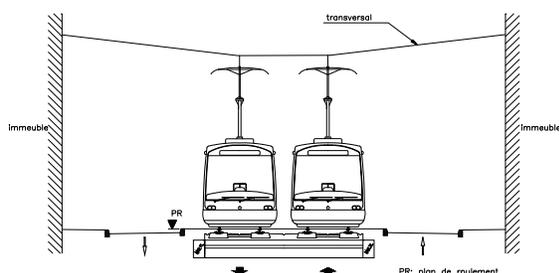
- Type 1 : supports bilatéraux avec suspension sous transversal,
- Type 2 : poteaux latéraux avec suspension sous consoles couvrant 1 ou 2 voies,
- Type 3 : poteaux axiaux avec suspension sous 2 consoles couvrant chacune 1 voie,
- Type 4 : fixations sous ouvrage.

5.1.2.1 Supports bilatéraux – Type 1

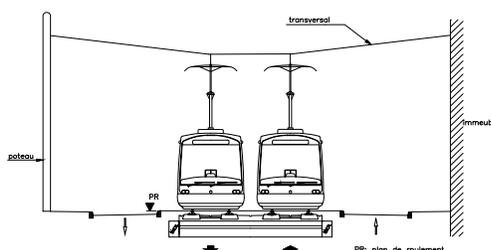
Le terme support désigne un poteau ou un ancrage sur une structure (façade d'un bâtiment par exemple)

Exemples de coupe en travers

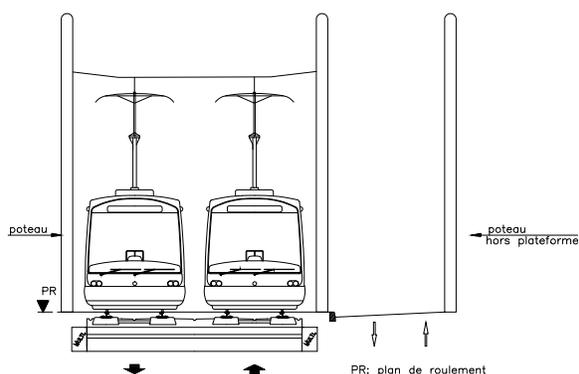
avec 2 ancrages en façade



avec un poteau et un ancrage en façade



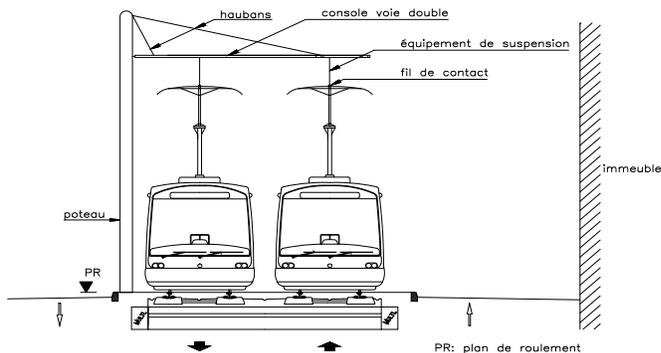
avec 2 poteaux



Les poteaux peuvent être implantés proche de la plateforme tramway ou éloignés.

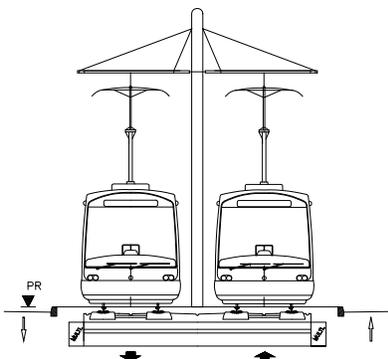
5.1.2.2 Poteaux latéraux – Type 2

Exemple de coupe en travers avec poteau latéral et console couvrant les 2 voies tramway.



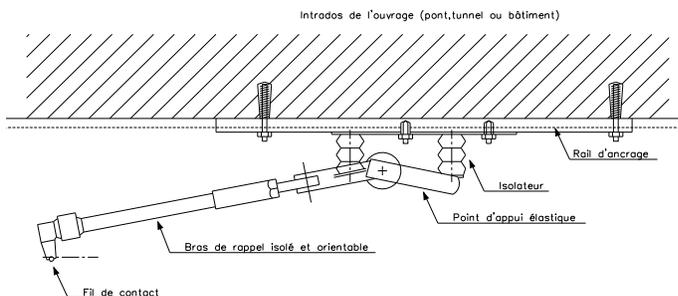
5.1.2.3 Poteaux axiaux – Type 3

Exemple de coupe en travers avec poteau axial avec 2 consoles couvrant chacune une voie tramway.



5.1.2.4 Fixations sous ouvrages – Type 4

Exemple de coupe en travers d'un point de fixation sous ouvrage avec un bras d'appui compensé



5.1.3 Technique

La technologie LAC tramway est aboutie. Elle est mise en œuvre dans des pays ayant un environnement climatique similaire au Québec.

Lors des calculs de résistances des structures, il conviendra de prendre en compte les charges complémentaires dues à la neige, à la glace, au vent, ...

La technologie est parfaitement adaptée pour le passage du pont du Québec, en accrochant le supportage directement sur les structures du pont.

Le système d'alimentation traction par LAC est la solution de référence en termes de performances dynamiques, maturité de la solution, complexité, facilité de mise en œuvre.

La durée de vie constatée des installations LAC est fréquemment > 30 ans.

La LAC est utilisée sur des réseaux ayant des contraintes climatiques similaires à celle de Québec.

La diversité des montages pouvant être mise en œuvre permet de s'adapter à l'environnement esthétique dans lequel elle est insérée.

Pour les montages avec poteaux, cela implique de disposer d'une sur-largeur pour implanter l'alignement de poteaux. Les massifs de fondation des poteaux peuvent entrer en conflit avec les réseaux souterrains.

5.1.4 Financier

Pour un tramway, la LAC est considérée comme la solution de référence dans le reste de ce document (Distribution traction + MR) en termes de coût d'investissement et de coût d'exploitation/maintenance).

5.2 SYSTÈME APS D'ALSTOM

Figure : Tramway de Bordeaux en opération



5.2.1 Présentation

Le système d’Alimentation Par le Sol (APS) a pour but de supprimer la LAC pour les systèmes de transports urbains électrifiés et de la remplacer par un système d’alimentation continu au niveau du sol, un rail d’alimentation entièrement intégré à la plate-forme de roulement.

L’APS est un système breveté par ALSTOM qui ne souhaite pas l’implanter sur le matériel roulant autre que le sien.

L’APS permet de ramener l’encombrement d’un système tramway à son gabarit standard et de libérer la voie publique des obstacles aériens. Les composants d’alimentation électrique sont sous le véhicule ou enterrés dans l’emprise de la plateforme.

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

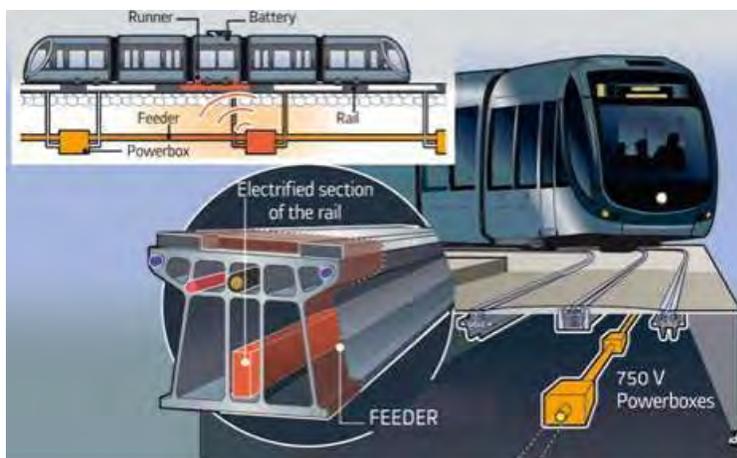


Figure : principe général de l’APS

5.2.2 Description technique

Le rail d'alimentation est situé au centre de la voie de roulement. Sa trajectoire est déterminée par les rails de guidage.

Pour limiter la zone mise sous tension le rail d'alimentation intégré à la plate-forme de roulement est segmenté.

Hors présence du véhicule, les segments sont mis hors tension, et mis au potentiel des rails de roulement. Seuls les segments situés entièrement sous l'emprise au sol du véhicule peuvent être mis sous tension pour assurer la traction.

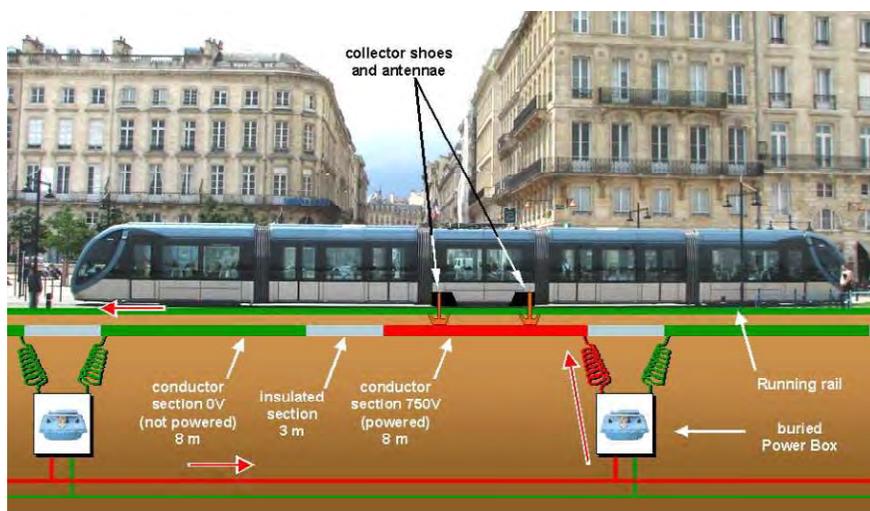


Figure : schéma du rail d'alimentation segmenté

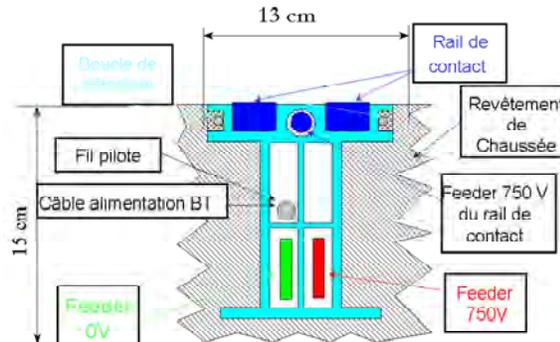
L'APS comprend des éléments au sol et des composants à bord des véhicules.

5.2.2.1 Principaux éléments au sol du système

Les principaux éléments installés au sol sont les suivants :

- Le rail d'alimentation
 - Les coffrets d'alimentation.
 - Les coffrets PR
- Le rail d'alimentation (composé de segments conducteurs et de segments isolants). Le profilé contient la totalité des câbles et éléments linéaires constitutifs du système.

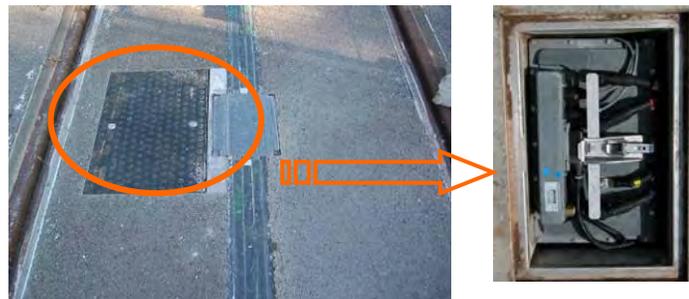
Figure : profilé APS et fonction des alvéoles câbles



- Les coffrets d'alimentation.

Ils sont disposés dans des regards d'alimentation dans le sol, entre les rails ou entre les voies, tous les deux segments (~20m). Ces coffrets regroupent l'ensemble des dispositifs de commutation et d'alimentation des segments amont et aval.

Figure : coffret d'alimentation APS



- Les coffrets PR.

A chaque point d'alimentation principal une demi-section d'APS est alimentée et contrôlée à partir d'un coffret PR, cet équipement permet l'opération de l'équipement (Mise en route, traitement des défauts, report d'état et de contrôle).

Revêtements de la plateforme :

Du point de vue revêtement de la plateforme, différents types de poses du profilé APS sont envisageables : plateforme bitumée, pavée, végétalisée, sur voie ballastée, etc.



Figure : différents types de pose du profilé APS

5.2.2.2 Principaux éléments à bord des véhicules

Les principaux composants à bord des véhicules, sont les suivants :

- Les frotteurs d'alimentation installés sous le véhicule
Au nombre de deux, ils captent le courant de traction à partir des rails au sol et sont relevables (lorsque le véhicule passe en mode captage par Ligne Aérienne par exemple).
- Le coffre de commutation installé en toiture du véhicule
Il permet de changer de source d'alimentation en fonction des conditions rencontrées : rail au sol, ligne aérienne ou batterie.
- La batterie
Une batterie propre au système APS est utilisée en secours sur la chaîne de traction. Cette batterie permet de redémarrer un véhicule arrêté sur des zones non alimentées comme les segments isolés de coffrets en défaut ou des zones particulières comme des appareils de voie.
- Les organes de contrôle / commande. Des commandes et témoins sont prévus en cabine.

5.2.2.3 Contraintes et performances

Durée de vie

Une fois la fiabilité du système pérennisée, la durée de vie de l'APS est annoncée comparable à celui d'une LAC dès lors que la maintenance de ses composants est effectuée selon le plan de maintenance préconisé.

Le système est en opération sur le tramway de Bordeaux depuis décembre 2003.

Contraintes environnementales

Alstom est en cours de déploiement de la 2^{ème} génération d'APS, développé pour des conditions climatiques plus durs (sable, précipitation), notamment en vue d'installation à Dubaï.

La compatibilité du système avec les produits pouvant être utilisés pour le déneigement est à vérifier.

A ce jour, le système APS n'a encore été installé dans un environnement avec des contraintes climatiques similaires à celles de Québec.

Facilités/difficultés de mise en œuvre

Outre la pose du rail au niveau de la chaussée nécessitant une certaine précision, le système présente des contraintes particulières de mise en œuvre au niveau des appareils de voie.

Une attention particulière doit être apportée pour le drainage des regards dans lesquels sont placés les coffrets.

Estimation du niveau de complexité

De par sa conception, le système APS nécessite la mise en place de nombreux composants au sol (1 coffret tous les 20m comportant des composants électroniques de commande et des contacteurs pour gérer l'alimentation de chaque section de rails), que l'on ne retrouve pas dans le cas d'un système classique composé d'un tramway et d'une ligne aérienne.

On notera également que ces composants sont très fréquemment sollicités (à chaque passage de véhicule).

Performances dynamiques

Le système d'alimentation en énergie de traction par le sol permet au matériel roulant, d'une manière générale, de réaliser des performances (accélérations, freinage) proches d'une solution traditionnelle avec LAC. La vitesse maximale atteignable en mode APS est de 60km/h.

Par ailleurs, l'APS est compatible avec une utilisation en site mixte ou dans des carrefours avec fort trafic. Toutefois, des précautions de renforcement sont à prévoir pour certains composants du rail APS dans ces zones.

Sécurité du système

Ce système permet de supprimer les risques d'électrocution des voyageurs en ligne et des opérateurs en dépôt.

Lors de l'avancement d'un véhicule, seuls les segments protégés par son emprise au sol sont mis sous tension. L'ensemble des segments accessibles au public sont mis en sécurité en restant connectés à l'équipotentielle 0Vr du système. Ils ne présentent de ce fait aucun danger électrique pour les personnes et les biens le long de la ligne.

Maturité de la solution – Retour d'expérience

Après des difficultés et défaillances rencontrées lors de la 1^{ère} mise en service en 2003, des améliorations ont été apportées. Le système est maintenant arrivé à maturité.

Maintenance

Le coût de maintenance du système est plus important que celui du système de référence. Les principales pièces d'usure restent les rails de contact au sol et les frotteurs sous le véhicule.

La batterie, utilisée pour déplacer le véhicule en autonomie sur quelques dizaines de mètres en cas de panne du système d'alimentation des rails, doit aussi être remplacée périodiquement.

Le nombre important de composants électroniques et électrotechniques au sol (coffret), ainsi que la fréquence élevée à laquelle ils sont sollicités devraient engendrer par principe un niveau de maintenance élevé et donc des coûts importants.

5.3 SYSTÈME PRIMOVE DE BOMBARDIER

5.3.1 Présentation



Figure : principe général du système PRIMOVE

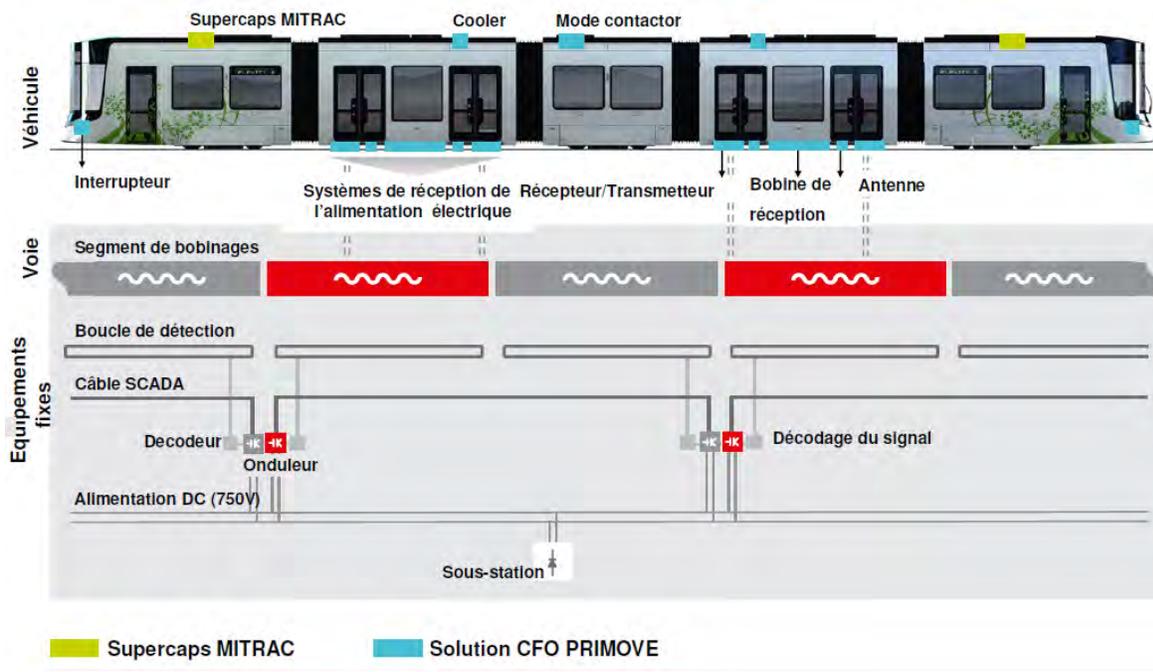
Le système est basé sur une transmission électrique par induction, c'est à dire sans contact, par le sol.

Cette nouvelle technologie représente la première application dans le secteur ferroviaire de l'alimentation par induction.

Ce système est en cours de développement et l'objectif de BOMBARDIER est de disposer d'un système homologué et présentable au public pour le salon Innotrans de septembre 2012. Ce système a été présenté à Egis Rail en septembre 2011, sur une voie d'essais à Augsburg (Allemagne).

5.3.2 Description technique

5.3.2.1 Description générale



Comme le montre la figure ci-dessus, les sous-stations réparties le long du parcours fournissent l'alimentation en 750VCC des onduleurs triphasés répartis régulièrement le long de la voie.

L'alimentation est réalisée par segments de voie simple d'une longueur comprise entre 9m et 11m. Pour garantir la sécurité des personnes circulant le long de la voie (champs magnétiques), les coupons alimentés sont toujours situés sous le véhicule.

11km de ligne nécessiteraient environ 2000 onduleurs (voie double) pour alimenter des coupons de 11m destinés à faire circuler des véhicules de 40m de long.



Rame démonstrateur à Augsburg (Sept 2011)

Le système PRIMOVE comprend des éléments au sol et des composants à bord des véhicules.

1. Les principaux éléments au sol du système, sont les suivants :

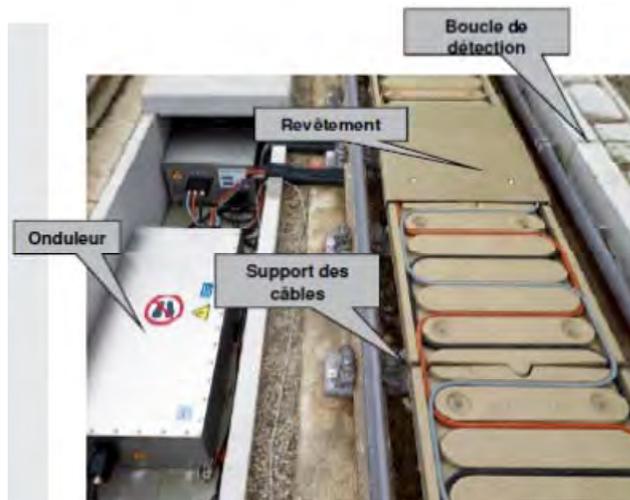
- Les composants d'alimentation électrique (circuit primaire). Les câbles électriques sont dissimulés à quelques centimètres sous la voie, entre les rails de roulement, et seules les zones entièrement recouvertes par le véhicule délivrent de l'énergie (déclenchement des onduleurs au sol lors de la détection du passage de la rame au-dessus d'une boucle de détection).



Figure : circuit primaire d'alimentation PRIMOVE (enfoui dans le sol)



Circuit primaire triphasé implanté entre les rails



Voie d'essai Primove à Augsburg (Sept 2011)

2. Les principaux composants à bord des véhicules, sont les suivants :

- Les bobines de réception électrique (circuit secondaire). Elles sont montées sous le véhicule et transforment le champ magnétique créé par les câbles en un courant électrique qui alimente le système de traction du véhicule.

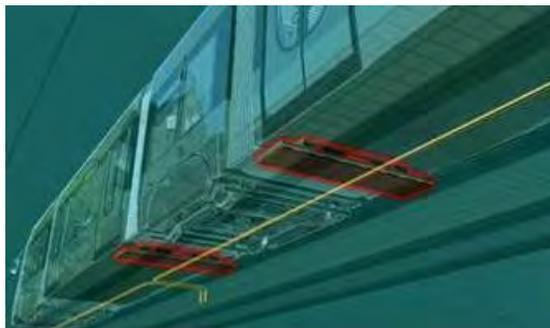


Figure : circuit secondaire d'alimentation PRIMOVE (embarqué)



Sous-châssis de la rame démonstrateur à Augsburg (Sept 2011)

- Les super-capacités installées sur le toit du véhicule («MITRAC Energy Saver»). Ces condensateurs récupèrent l'énergie de freinage du véhicule, la stockent, puis la réutilisent durant le démarrage, l'accélération ou la marche du tramway.

5.3.2.2 Contraintes et performances

Durée de vie

La durée de vie du système PRIMOVE est annoncée comparable à celui d'une LAC dès lors que la maintenance de ses composants est effectuée selon le plan de maintenance préconisé.

Contraintes environnementales

D'après BOMBARDIER, cette technologie sans contact serait capable de résister à toutes les conditions météorologiques et intempéries (pluie, neige, verglas, sable...).

Il conviendra de vérifier l'efficacité de la transmission d'énergie en cas de couche de neige ou de verglas sur les systèmes au sol. La distance optimale de l'entrefer risque d'impliquer de fortes contraintes pour le déneigement de la plateforme.

Facilités/difficultés de mise en œuvre

La distance optimale de l'entrefer entre le bobinage de la voie et le dispositif de captage sous le véhicule est de 40mm, et ne doit pas être inférieure à 20mm. Il est donc en particulier exclu de végétaliser la plateforme tramway. Bombardier préconise un revêtement en asphalte ou avec des faux pavés en résine.

En septembre 2011, aucun de ces revêtements n'avait été mis en œuvre par Bombardier. En particulier, leur résistance et tenue dans le temps aux passages répétés de véhicules routiers (en carrefour par exemple) n'avait pas encore été démontrées.

Estimation du niveau de complexité

Le niveau de connaissance actuel du PRIMOVE ne permet qu'une estimation très approximative du niveau de complexité du système. La présence d'onduleurs tous les 9m à 11m (x2 pour une voie double) est à rapprocher de la présence d'un boîtier tous les 22m dans le cas de l'APS.

Ce système reste toutefois plus complexe qu'une solution éprouvée et bien maîtrisée tel qu'un système classique de LAC.

La canalisation des champs magnétiques est actuellement l'enjeu principal pour Bombardier qui continue de travailler sur le sujet afin d'obtenir une homologation en Allemagne d'ici septembre 2012.

Pour des raisons d'ordre géométrique et d'encombrement, le système n'est pas mis en place dans les zones d'aiguille et circuit de voie SLT. Une section longue sans câblage (> 20m) nécessitera une réserve d'énergie embarquée (MITRAC : supercapacités et/ou batterie Li-On).

Performances dynamiques

Selon Bombardier, le système d'alimentation en énergie de traction par le sol permet au matériel roulant de réaliser les mêmes performances (accélérations, freinage, vitesse commerciale) qu'en solution traditionnelle avec LAC. Bombardier annonce des performances fiables quelles que soient les conditions météorologiques.

Sécurité du système

Le système PRIMOVE permet de supprimer les risques d'électrocution des voyageurs en ligne et des opérateurs en dépôt. Les câbles électriques déposés sous la surface du sol et alimentés seulement lorsque le véhicule les recouvre intégralement, assurent un fonctionnement sans danger pour les piétons et autres usagers de la route tels que bicyclettes, motos ou voitures.

Bombardier annonce avoir testé l'absence de danger sanitaire vis-à-vis des personnes porteuses de pacemakers.

Un phénomène d'échauffement d'objets métalliques accidentellement présents sur le bobinage entre rails est signalé par Bombardier.

Maturité de la solution – Retour d'expérience

Les premiers essais de la nouvelle solution sans caténaire PRIMOVE ont été réalisés à partir de Septembre 2008 jusqu'à fin 2009, sur la voie de test du site de Bombardier à Bautzen en Allemagne. Un véhicule prototype (tramway à plancher bas de 30 mètres de long) et la voie d'essais étaient équipés des composants PRIMOVE. L'expérimentation se poursuit depuis 2010 sur le site pilote de la ville de Augsburg en Allemagne (voir plus haut), pour obtenir l'homologation du système. Des essais sont prévus jusqu'à la fin de l'année 2012, après le salon INNOTRANS ; date à laquelle la voie d'essais pourrait être connectée au réseau de la ville d'Augsburg.

Maintenance

Le système de transfert de puissance sans contact réduit significativement la quantité de pièces et de composants soumis à l'usure par frottement. Ainsi, concernant le système de captage d'énergie, la part de maintenance électronique est prépondérante sur celle de la maintenance mécanique.

5.4 SYSTÈME WIPOST DE LOHR



Figure : principe général du système WIPOST2

5.4.1 Présentation

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 750V à 3.6m du sol. Le véhicule récupère cette énergie grâce à deux pistes d'alimentation installées de chaque côté de la toiture. L'espacement entre poteaux est défini pour le matériel roulant soit toujours en contact avec au moins un point d'alimentation.

Ce système pourrait être combiné avec un équipement classique d'alimentation par LAC (véhicule équipé d'un pantographe).

Si l'espacement des poteaux est supérieur à la longueur d'un véhicule, ce dernier doit être équipé d'un système de stockage embarqué pour assurer son autonomie entre 2 poteaux d'alimentation.

5.4.2 Description technique

Le système WIPOST comprend des éléments fixes au sol et des composants à bord des véhicules.

1. Les principaux éléments au sol du système, sont les suivants :

- Les poteaux d'alimentation électrique

Ils sont fixés au sol, tels des poteaux de LAC. La distance qui les sépare est légèrement inférieure à la longueur du matériel roulant circulant sur la ligne. Ces poteaux intègrent un profilé conducteur permettant de délivrer l'électricité aux véhicules. Ils pourraient intégrer l'éclairage public.



Figure :

Exemples de Design de poteau



Figure :

Principe d'implantation des poteaux sur la ligne

2. Les principaux composants à bord des véhicules, sont les suivants :

- 2 pistes d'alimentation en toiture

Pistes d'alimentation
en toiture



Figure : principe WIPOST de la piste d'alimentation en toiture

Les deux pistes d'alimentation sont installées en toiture de part et d'autre du véhicule. Elles se présentent sous la forme d'un profilé d'une longueur égale à celle du véhicule. L'énergie sera captée par le véhicule lors du passage sous les poteaux d'alimentation grâce au contact de cette piste avec un profilé conducteur installé sur les poteaux.

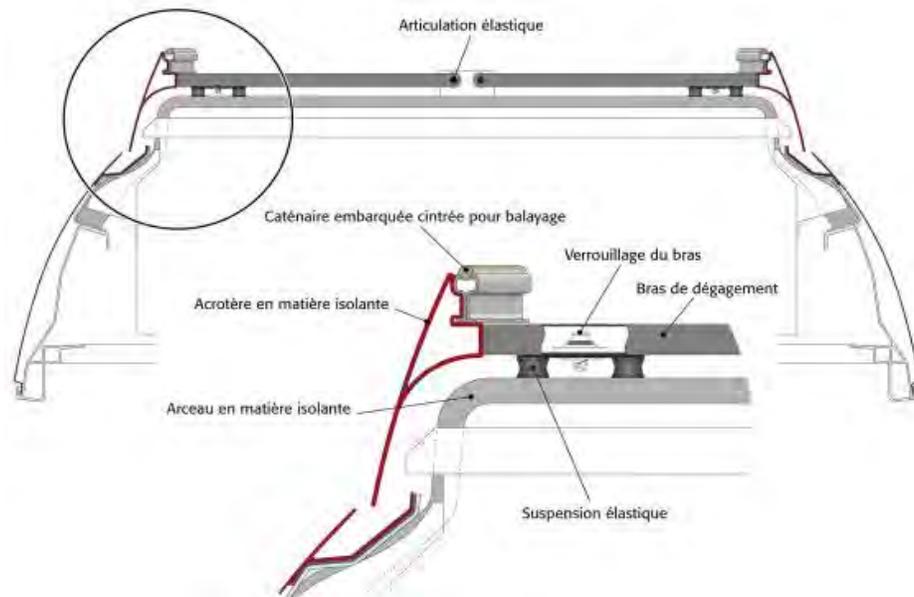


Figure : WIPOST, détails de la piste d'alimentation en toiture

- Un dispositif à base de super-capacités permettant de stocker l'énergie captée au droit de chaque poteau. Cette énergie stockée permet d'assurer l'autonomie du véhicule lorsqu'il circule entre les poteaux espacés d'une distance supérieure à la longueur du véhicule.

5.4.2.1 Contraintes et performances

Durée de vie

La durée de vie du système WIPOST serait comparable à celui d'une LAC dès lors que la maintenance de ses composants est effectuée selon le plan de maintenance préconisé.

Lorsqu'un dispositif à base de super-capacités sera nécessaire, il devra être remplacé plusieurs fois durant la vie du véhicule.

Contraintes environnementales

Ce dispositif serait capable de résister aux environnements maritime (sable, brouillard salin, humidité...). Le niveau d'information actuel sur le principe de fonctionnement laisse présager des difficultés dues aux conditions climatiques similaires à celles rencontrées sur la LAC.

Facilités/difficultés de mise en œuvre

Non applicable à ce jour.

Estimation du niveau de complexité

Le niveau de connaissance actuel du WIPOST ne permet qu'une estimation très approximative du niveau de complexité du système.

Les principales problématiques seraient à ce jour:

- Le système d'alimentation,
- Les chocs et bruits au passage du pantographe sous les portiques,
- Les homologations vis-à-vis de la sécurité.

Performances dynamiques

Le niveau de développement du WIPOST ne permet pas d'annoncer de performances précises mais l'objectif du système étant d'offrir une alternative à la LAC et le principe d'alimentation étant proche de celui d'une ligne aérienne classique, il paraît vraisemblable d'en attendre des performances similaires. Les performances pourront dépendre fortement du profil de la ligne, et du dimensionnement du système pour un projet donné (nombre de poteaux d'alimentation, quantité d'énergie que l'on pourra stockée, etc.).

Sécurité du système

Il n'y a pas de risque d'électrocution des voyageurs et autres usagers de la voie publique car la distribution électrique est réalisée à 3.6m du sol au niveau de chaque poteau.

Maturité de la solution – Retour d'expérience

Pas de visibilité sur le développement.

Maintenance

Non applicable à ce jour.

6. ENERGIE EMBARQUÉE

Cette énergie peut être :

- emmagasinée dans des accumulateurs situés à bord du véhicule. Ces accumulateurs peuvent être de type :
 - **Électrochimiques (batteries),**
 - **Capacitifs (super-capacités),**
 - **Électromécaniques (volant d'inertie),**
- ou générée à bord :
 - **Pile à combustible.**

Les systèmes d'alimentation embarqués (stockage et/ou production d'énergie) sont utilisés pour assurer principalement deux fonctions :

- le *lissage des fortes variations de puissance* (freinage, démarrage, transitoires), lorsqu'il est couplé avec un autre moyen de captage d'énergie.
- *l'alimentation secondaire* en cas d'interruption volontaire ou accidentelle de captage : avarie technique, franchissement d'inter-station sans captage continu du réseau d'alimentation.

Le choix de la solution technique est crucial quand il s'agit d'une installation embarquée. Il faut alors correctement dimensionner la masse et le volume du réservoir d'énergie, qui dépendent :

- de l'énergie massique du vecteur d'énergie et de ses auxiliaires (Wh/kg),
- du cycle d'utilisation (masse déplacée, vitesse, relief, consommation auxiliaire, etc.) donnant la puissance instantanée, la puissance moyenne,
- de l'autonomie souhaitée, incluant une réserve en situation dégradée ou exceptionnelle,
- de la présence ou non du freinage par récupération,
- du coût d'installation, de la consommation d'énergie, de la durée de vie et de la maintenance du système,
- de la sécurité, du confort et du respect de l'environnement.

6.1 ACCUMULATEURS ÉLECTROCHIMIQUES (BATTERIES)

Une batterie est composée d'une multitude de cellules d'accumulateur montées en série et en parallèle qui permettent de stocker l'énergie puis de la restituer ultérieurement de façon régulière. Le stockage d'énergie électrique par batteries suit des progrès continus.

Les technologies de batteries utilisées ou utilisables en matière de traction sont essentiellement :

- Plomb-acide (Pb)
- Nickel-Cadmium (NiCd).

Mais ces derniers laissent place aux nouveaux procédés :

- Nickel Métal Hydrure (Ni/MH) en cours d'industrialisation,
- Lithium-ion (Li/ion), Lithium-polymère (Li/polymère) ou le phosphate de fer lithié () dont les mises au point ne sont pas encore terminées.

Les batteries peuvent être installées en toiture ou en sous-châssis de véhicule.

Autonomie

Les batteries peuvent fournir une autonomie complète à un tramway (traction et servitudes) pendant quelques centaines de mètres avant de devoir être rechargées. Elles sont donc nécessairement couplées avec un système de captage d'énergie. Dans le cas d'un couplage avec de la LAC, l'interruption des équipements visibles peut-être de quelques centaines de mètres.

Durée de vie

La durée de vie des batteries dépend essentiellement de la technologie, de la profondeur de décharge, de la température, du nombre de cycles charge / décharge admissible, du temps de recharge au cours d'un cycle, et du maintien en température. La durée de vie, relativement courte, des batteries reste un des points « faibles » de ce système.

Les batteries au plomb ne semblent pas intéressantes pour une application de type « alimentation autonome » sur un tramway car leur faible prix ne paraît pas compenser leur faible durée de vie.

Contraintes relatives aux conditions climatiques

Le Québec possède une réputation internationale au chapitre de la recherche et de la fabrication de batteries destinées aux véhicules électriques. Québec investit dans un projet de bus électriques, avec utilisation de batteries dont les prototypes devraient être testés en 2014. De plus, 500 bus hybrides (biodiesel-batteries) devraient être fournis, entre 2014 et 2016, à différentes sociétés de transport québécoises.

Cependant il est à noter que les contraintes de mise en œuvre d'accumulateurs électrochimiques sont plus importantes pour du tramway que pour du bus (puissance à fournir...).

Mis à part quelques exceptions, la plupart des batteries ont un fonctionnement optimal à une température ambiante de 20°C et supportent mal les basses températures (<0°C) et les hautes températures (>60°C) qui ont un impact significatif sur leur puissance.

A ce jour, malgré les recherches et développements en cours pour l'utilisation de batteries dans des conditions climatiques très froides, cette technologie aurait donc du mal à maintenir un fonctionnement correct pour des tramways avec les températures minimum hivernale (-30°C), et les 5°C de moyenne annuelle, constatées dans la ville de Québec.

Performances dynamiques

La traction assurée par batteries autonomes, type Ni/MH ou Li/Ion, se pratique aujourd'hui avec des tramways lors d'une interruption de captage de quelques centaines de mètres. Le profil en long (pentes) et les arrêts (en station ou carrefour routier) limitent la longueur du trajet réalisé en autonomie.

Pour maintenir des performances dynamiques similaires à celle du tramway alimenté par une LAC cela implique la mise en œuvre de batteries de fortes capacités.

Les constructeurs les associent de plus en plus souvent à des supercapacités en charge de récupérer l'énergie de freinage qui sera ensuite consommée lors des phases de traction. Les supercapacités aptes à emmagasiner puis à restituer des puissances importantes, sont alors utilisées comme une zone de stockage tampon de l'énergie permettant d'économiser l'énergie (récupération de l'énergie de freinage électrique) et de fournir une énergie d'appoint durant les phases de traction.

Sécurité du système

Le système n'est pas accessible par les voyageurs et autres usagers de la ligne. Des précautions sont à prendre lors de la maintenance des coffres batterie.

Maturité de la solution - Retour d'expérience

Utilisé en exploitation commerciale depuis 2007 :

- sur le tramway de Nice (Citadis 302) pour s'affranchir de la LAC sur 2 places (distance de quelques centaines de mètres). Vitesse limitée à 30 km/h,
- sur le tramway de Padoue (Translohr de 25m) pour s'affranchir de la LAC sur une place.

Des expérimentations sont en cours sur d'autres réseaux.

Québec est dans une phase importante de recherche et innovation concernant les batteries destinées aux véhicules électriques. A ce jour, ces recherches sont orientées pour une utilisation des batteries par des véhicules type voiture ou bus. Il n'y a pas encore de retour d'information concernant des batteries, utilisables sur des tramways, adaptées aux conditions climatiques de Québec.

Maintenance

Les batteries modernes sont désormais étanches et ne nécessitent aucun entretien spécifique.

Les batteries demandent par ailleurs une manutention et un stockage sécurisé en dépôt, puis un recyclage en fin de vie.

Coûts

- Coût d'investissement : Le coût des accumulateurs varie entre 30 et 50 k€/KWh (soit environ entre 37 et 62 k\$/km), selon le couple de matériaux employé.
- Coût d'exploitation : Les batteries seront à remplacer plusieurs fois pendant la durée de vie du matériel roulant. Leur durée de vie dépendra des conditions d'exploitation : longueur et nombre des zones franchies en autonomie, profil en long de ces zones, arrêt dans les zones franchies en autonomie, etc.

Actuellement, le retour d'expérience du tramway de NICE montre qu'il sera nécessaire de remplacer les batteries tous les 5 à 6 ans avec un coût d'environ 100 k€/véhicule (soit environ 125 k\$/véhicule). Les températures minimum hivernale (-30°C), et les 5°C de moyenne annuelle, constatées dans la ville de Québec pourraient augmenter la fréquence de remplacement des batteries et donc le coût d'exploitation.

6.2 ACCUMULATEURS CAPACITIFS (SUPER-CAPACITÉS)

Les super-capacités (ou super-condensateurs) sont des réservoirs capacitifs pouvant assurer des échanges denses de courant.

Contrairement aux batteries ils autorisent des charges et décharges très rapide (quelques secondes), ce qui est utile au démarrage et pendant les phases d'accélération des véhicules, par exemple. Les super-capacités acceptent des recharges rapides, complètes ou partielles.

La recharge des super-capacités peut être réalisée pendant les phases de freinage électrique lorsque le véhicule circule en ligne (récupération de l'énergie produite par les moteurs de traction), ou en station lorsque le véhicule est alimenté par la LAC (biberonage). Dans ce dernier cas, le temps de rechargement en station annoncé par les constructeurs est de 20 à 30s selon les constructeurs, ce qui représente à peu près la durée moyenne d'arrêt d'un tramway lors d'un transfert de passagers.

Les super-condensateurs peuvent aussi être combinés aux accumulateurs classiques (batteries).

Autonomie

Les super-capacités peuvent fournir une autonomie complète à un tramway (traction et servitudes) pendant quelques centaines de mètres avant de devoir être rechargées. Elles sont donc nécessairement couplées avec un système de captage d'énergie. Dans le cas d'un couplage avec de la LAC, l'interruption des équipements visibles peut-être de quelques centaines de mètres.

Les super-capacités sont de plus en plus souvent associées à des batteries en charge de fournir une plus grande quantité d'énergie sur une durée plus importante, notamment pour améliorer les performances des véhicules lorsque ces derniers circulent en autonomie pour franchir des zones sans alimentation (sans LAC ou sans alimentation par le sol).

A titre d'exemple, dans le cas d'une alimentation autonome pendant quelques centaines de mètres cela représenterait une masse totale d'environ 1 tonne et un volume d'environ 1m³ à installer sur le tramway.

Économies d'énergie éventuelles

Plusieurs types d'applications, ayant pour but d'économiser l'énergie, ont été développés par les constructeurs de matériels roulants, on citera pour mémoire les principales ci-après :

- Fournir une énergie d'appoint pour franchir une zone de quelques centaines de mètres sans LAC (les super-capas sont souvent couplées à un système de batterie).
- Lisser les pointes de courants absorbés sur la ligne par les véhicules.
- Récupérer plus efficacement l'énergie de freinage électrique renvoyée sur la ligne.
- Fournir une énergie d'appoint sur certaines zones du parcours, lorsque la tension ligne devient trop faible.

Suivant les systèmes proposés par les différents industriels, l'économie d'énergie serait de l'ordre de 10% à 20% par rapport à système sans super-capacités.

Durée de vie

Les principaux inconvénients des super-capacités résident dans les fuites, ce qui limite la durée du stockage et augmente les pertes joules, ainsi que dans l'emploi de composants chimiques qui limitent leur durée de vie.

Cependant ces composants ont une durée de vie 500 à 1000 fois supérieure aux accumulateurs électrochimiques (batterie).

La durée de vie d'un système à base de super-condensateurs est estimée à environ 15 ans.

Contraintes relatives aux conditions climatiques

Le fonctionnement des super-capacités n'est pas affecté par les températures négatives.

Cependant, à ce jour, les dispositifs à base de super-condensateurs nécessitent d'être refroidis efficacement dès lors qu'ils fonctionnent dans un environnement dont la température ambiante dépasse 10°C.

Bruit

Compte-tenu des dispositifs à mettre en place pour assurer un refroidissement efficace des super-capacités (souvent à base de ventilateurs), une attention particulière devra être apportée sur l'augmentation éventuelle du niveau de bruit du véhicule à l'arrêt et en circulation.

Facilités/difficultés de mise en œuvre

Pour une même puissance délivrée, les super-capacités sont légères et compactes, comparativement aux accumulateurs traditionnels (batterie), par contre elles ne permettent pas d'emmagasiner autant d'énergie que ces accumulateurs traditionnels de type batterie.

Estimation du niveau de complexité

L'alimentation des équipements de traction par super-capacités engendre l'ajout de composants supplémentaires par rapport au système de transport basé sur un tramway alimenté par LAC (circuits actifs d'équilibrage de la tension, systèmes de refroidissement des coffres, chargeur des super-capacités).

La récupération de l'énergie de freinage réalisée grâce aux super-capacités permet de réduire de manière significative la taille du rhéostat de freinage.

Performances dynamiques

Les performances maximales peuvent être similaires à celle d'un véhicule connecté à la LAC, mais seulement sur de courte distance (quelques centaines de mètres). Les super-capacités nécessitent ensuite d'être rechargées.

Plus la zone de la ligne comportera de singularité (forte pente, faible rayon de courbure...), plus le système consommera rapidement de l'énergie et sera limité dans son autonomie.

Sécurité du système

Le système n'est pas accessible par les voyageurs et autres usagers de la ligne. Des précautions sont à prendre lors de la maintenance des coffres de super-capacités.

En cas de dommage externe, plus de 95% de l'électrolyte est absorbé par le carbone actif. La fuite d'acétonitrile est donc très limitée.

En cas d'incendie, les émissions de vapeurs sont les mêmes que dans le cas de la combustion de matières plastiques.

En cas d'utilisation défectueuse, les grandeurs mesurées (capacité, résistance) sortent des limites autorisées et déclenchent des mesures appropriées telle que l'arrêt du système.

Maturité de la solution - Retour d'expérience

Cette solution commence à être mise en œuvre sur des lignes en opération depuis 2 à 3 ans, par différents constructeurs (Bombardier, Stadler, CAF, Alstom, Siemens).

Maintenance

Son fonctionnement étant entièrement électrique, la super-capacité nécessite moins de maintenance qu'un système mécanique de stockage, comme le volant d'inertie.

La maintenance consisterait principalement à :

- nettoyer les cellules du coffre par soufflage d'air,
- remplacer les ventilateurs tous les 5 à 8 ans,
- remplacer les super-condensateurs tous les 10 ans en cas d'utilisation en autonomie.

Coûts

- Coût d'investissement : Le coût des super-capacités est très supérieur à celui des batteries (~50 à 80 €/Wh, soit environ 60 à 100 \$/Wh).
- Coût d'exploitation : Selon les constructeurs de matériel roulant, tel CAF ou Bombardier, les super-capacités favorisent la récupération de l'énergie de freinage et pourraient réduire dans certains types d'utilisations la consommation d'énergie de traction jusqu'à 30 % (soit une diminution totale de 20%, incluant les servitudes).

6.3 ACCUMULATEURS ÉLECTROMÉCANIQUES (VOLANT D'INERTIE)

Le principe du volant d'inertie consiste à stocker de l'énergie mécanique dans une masse tournante. Cette énergie vient du freinage par récupération du véhicule, et d'une source de maintien qui peut être la LAC. Cette énergie est disponible pour fournir les pointes de courant des démarrages, voire assurer une marche autonome en situation dégradée.



Figure : volant d'inertie pour véhicules

Le principe du volant d'inertie consiste à stocker de l'énergie mécanique dans une masse tournante.

Dans le cas d'un matériel roulant, le volant d'inertie est entraîné par une machine électrique réversible (moteur/alternateur), lors de l'alimentation par la ligne ou du freinage par régénération. Il tourne à haute vitesse (10 000 à 30 000 tr/min) et une source de maintien est nécessaire à son fonctionnement (un moyen de captage d'énergie dans le cas du tramway).

En phase de propulsion, l'énergie cinétique accumulée dans le volant entraîne la machine génératrice pour alimenter les moteurs de traction.

Autonomie

Le volant d'inertie peut fournir une autonomie complète à un tramway (traction et servitudes) pendant quelques centaines de mètres avant de devoir être ré-entraîné. Il est donc nécessairement couplé avec un système de captage d'énergie. Dans le cas d'un couplage avec de la LAC, l'interruption des équipements visibles peut-être de quelques centaines de mètres (~500m max dans les conditions les plus favorables).

Les expérimentations les plus récentes permettent une autonomie de quelques centaines de mètres pour un tramway (dans les conditions les plus favorables : sans arrêt, ni pente à franchir, vitesse max de 40km/h...).

Économies d'énergie éventuelles

Les volants d'inertie sont basés sur le principe de récupération puis de restitution de l'énergie, cela mène à des économies d'énergie puisque ils permettent de :

- Fournir une énergie d'appoint pour franchir une zone de quelques centaines de mètres sans LAC.
- Lisser les pointes de courants absorbés sur la ligne par les véhicules.
- Récupérer plus efficacement l'énergie de freinage électrique renvoyée sur la ligne.
- Fournir une énergie d'appoint sur certaines zones du parcours, lorsque la tension ligne devient trop faible.

Durée de vie

Le volant d'inertie est donné pour une durée de vie de 30 ans par les constructeurs de matériel roulant. Cependant certains organes mécaniques sont à remplacer assez régulièrement due à la masse et la vitesse importante des pièces en rotation.

Contraintes relatives aux conditions climatiques

Le volant d'inertie étant protégé dans un coffre il ne craint pas plus les intempéries que les systèmes actuels montés en toiture de tramway.

Facilités/difficultés de mise en œuvre

Le volant d'inertie est un système économique et non polluant. Par contre la vitesse de rotation élevée entraîne des difficultés dans la réalisation technique et par conséquent des problèmes de durée de vie du système. Actuellement cette technologie a été délaissée par les constructeurs de matériels roulants qui axent leurs recherches et développement sur les systèmes à base de batterie et de super-capacités.

Estimation du niveau de complexité

L'alimentation des équipements de traction par volant d'inertie engendre l'ajout de peu de composants supplémentaires par rapport au système de transport basé sur un tramway alimenté par une LAC.

Performances dynamiques

Un tramway avec volant d'inertie aura des performances optimales moindres que celles d'un système LAC ou APS, même s'il représente un excellent compromis puissance / énergie pour une utilisation en centre-ville.

Le tramway de Rotterdam a démontré qu'il pouvait atteindre, avec le volant d'inertie en mode autonome, une vitesse de 45 Km/h en charge maximale (6 passagers au m²).

Sécurité du système

Bien que le système ne soit pas accessible par les voyageurs et autres usagers de la ligne il persiste un risque sécuritaire en cas de défaillance du système. De plus des précautions sont à prendre lors de la maintenance de ce système puisqu'il met en œuvre des masses importantes à des vitesses de rotation élevées.

Maturité de la solution - Retour d'expérience

La masse importante du volant, les aléas de circulation rendant l'autonomie hasardeuse et des accidents survenus lors d'essais expérimentaux (Alstom en 2003) ont ralenti le développement de ce système.

Actuellement, on constate un regain d'intérêt de ce système devenu performant grâce à de multiples améliorations technologiques :

- Gain de volume et de poids permettant d'être installé en toiture de tramway,

- très grande vitesse de rotation (12 à 30 000 tr/min) pour accroître l'énergie et la puissance massique (500 W/kg),
- réduction des pertes par rotation dans le vide,
- moteur / générateur intégré,
- montage anti-gyroscopique.
- Paliers magnétiques.

Cependant des problèmes liés à la vitesse de rotation importante subsistent.

Les volants d'inertie ont été ou sont surtout développés / utilisés pour des bus ou trolleybus (Bristol, Bâle, Brême, Munich, Stockholm) mais il existe aussi des applications pour les tramways dont la plus représentative est le tramway de Rotterdam (Hollande) fournit par Alstom, mis en service en 2005.

Masse du système volant d'inertie : env. 1 tonne. Le dispositif se recharge à chaque freinage ou par un système de recharge rapide complémentaire lors de chaque arrêt en station.

Maintenance

Les volants d'inertie requièrent une maintenance importante due notamment à la masse et la vitesse élevées des pièces en rotation.

L'entretien porte donc principalement sur les guidages en rotation à haute vitesse et éventuellement sur l'électronique de pilotage.

Coûts

- Coût d'investissement : Son coût d'acquisition, supérieur à celui des batteries, est compensé par un coût de maintenance plus faible.
- Coût d'exploitation : Selon Alstom, il est possible de réaliser jusqu'à 15% d'économie d'énergie.

6.4 SYNTHÈSE

Toutes ces technologies d'énergie embarquées permettent de parcourir quelques centaines de mètres. Elles nécessitent donc d'être couplées à une technologie avec captation d'énergie.

7. SYNTHÈSE

7.1 RISQUES ASSOCIÉS À CHAQUE TECHNOLOGIE

Chacune des technologies présentées porte en elle ses propres risques pour le maître d'ouvrage. Ceux-ci peuvent être de nature :

- **technique**, liés à la nature intrinsèque de la technologie et au niveau de développement du produit, par rapport aux conditions spécifiques (profil en long, climat..) qu'il rencontrera sur le réseau de Québec,
- **industriel**, en fonction du nombre des industriels impliqués dans ces développements ou industrialisation (possibilité d'organiser une concurrence ou systèmes « exclusifs » ?),
- **temporel**, en fonction de la compatibilité des programmes de développement avec le planning de mise en service des lignes de Québec,
- **contractuel**, liés à la difficulté d'organiser une réelle concurrence dans le cadre des marchés publics du Québec,
- **administratif**, en relation aux procédures d'homologation de chaque système,
- **financier**, en fonction, pour certains de ces systèmes, de la difficulté d'appréciation des coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance.

Il est à noter que ces risques sont très étroitement liés et que chacun est la cause, la conséquence ou même la combinaison d'un certain nombre d'autres risques.

Tableau de synthèse des risques

Le tableau suivant présente la synthèse des risques par système, en prenant la LAC comme référence.

	LAC (référence)	Autonomie embarquée			Systèmes de Captage alternatif à la LAC		
		Batteries électrochimiques	Super-capacités	Volants d'inertie	APS (ALSTOM)	PRIMOVE (BOMBARDIER)	WIPOST (LOHR)
Technique	0	***	**	**	**	***	***
Industriel	0	0	0	**	**	***	***
Planning	0	*	*	**	*	**	***
Contractuel	0	0	0	0	***	***	***
Administratif (Homologation)	0	0	0	*	*	***	***
Financier	0	*	*	**	**	**	***

*** Risques importants

** Risques moyens

* Risques faibles

0 Risque de référence

7.2 SOLUTIONS AVEC CAPTATION

	LAC	APS (Alstom)	Primove (Bombardier)	Wipost (Lohr)
	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

	LAC	APS (Alstom)	Primove (Bombardier)	Wipost (Lohr)
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/glacé	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

7.3 SOLUTIONS COMPLÉMENTAIRES AVEC ÉNERGIE EMBARQUÉE

	Accumulateurs électrochimiques (Batteries)	Accumulateurs capacitifs (super capacités)	Accumulateurs électromécaniques (volant d'inertie)
Maturité de la solution	Correcte. Utilisée en exploitation	Correcte. Utilisée en exploitation	Inférieure aux 2 autres technologies en usage embarqué
Fiabilité / disponibilité	Bon	Bon	Bon
Autonomie	~ quelques centaines de mètre	~ quelques centaines de mètre	~ quelques centaines de mètre
Recharge	Recharge lente (> 30 minutes))	Recharge rapide lors des freinages, et recharge lente complémentaire via la LAC	Recharge rapide lors des freinages, et recharge lente complémentaire via la LAC
Encombrement	Installé en coffres sans modification du gabarit matériel roulant.	Installé en coffres de toit sans modification du gabarit matériel roulant	Installé en coffres de toit sans modification du gabarit matériel roulant
Durée de vie	5 à 10 ans (suivant type de batterie)	10 à 15 ans	10 à 15 ans
Profil en long de la plateforme	Peu adapté au tracé en pente dans le sens montée	Peu adapté au tracé en pente dans le sens montée	Peu adapté au tracé en pente dans le sens montée
Pont du Québec (~1km)	Augmentation de l'autonomie nécessaire	Augmentation de l'autonomie nécessaire	Augmentation de l'autonomie nécessaire
Neige	Equipements installés en toiture	Equipements installés en toiture	Equipements installés en toiture
Amplitude thermique	Peu adapté	Adapté	Adapté
Consommation électrique	Récupération de l'énergie au freinage	Récupération de l'énergie au freinage	Récupération de l'énergie au freinage
Coût d'investissement	Investissement initial modéré	Solution la plus onéreuse	Investissement initial modéré
Coût d'exploitation / maintenance	Voir item durée de vie	Voir item durée de vie	Voir item durée de vie
Sécurité	Précautions à prendre pour les coffres batteries	Précautions à prendre pour les coffres de super-capacités en cas de passage en tunnel	Persistance d'un risque en cas de défaillance du système

Ces solutions technologiques ne peuvent être utilisées qu'en complément d'une solution avec captation.

8. RECOMMANDATION

Ces dernières années certaines technologies d'alimentation tramways sans LAC se sont créées (PRIMOVE, WIPOST), d'autres se sont développées (APS, batteries, super-capacités).

Parmi les technologies décrites ci-dessus, les états de développement varient. Certaines sont encore au stade des études de faisabilité (WIPOST) alors que d'autres sont au niveau expérimental (PRIMOVE) voir même en application sur des projets commerciaux (APS, batteries, super-capacités).

Outre la maturité de la technologie, ou des exigences particulières du maître d'ouvrage (esthétique,...), il apparait une multitude de critères entrant en compte pour le choix d'un mode d'alimentation plutôt qu'un autre.

Parmi les plus importants figure les conditions environnementales et la topographie du réseau sur lequel devra circuler le tramway. Basé sur ces critères il apparait recommandé de s'orienter vers un système d'alimentation par LAC pour le réseau de Québec. Cette solution permet également la récupération de l'énergie de freinage des rames (échange d'énergie entre les rames en freinage par réinjection et les rames en traction, et pouvant être complété par la mise en œuvre de sous station traction réversibles).

Cependant, il parait techniquement envisageable de combiner un système de stockage d'énergie éprouvé, tel que des super-capacités, avec la LAC. La LAC serait la source d'énergie principale sur l'ensemble du réseau, et la combinaison de celle-ci avec un système d'appoint d'énergie embarqué pourrait bonifier l'apparence (ou l'image de marque) dans certaines zones prestigieuses de la ville de Québec.

Pour le choix du niveau de tension, les critères les plus influents sont :

- La puissance du matériel roulant (nombre de bogies motorisés),
- L'intervalle d'exploitation en période de pointe,
- Le type d'exploitation en période de pointe (rame en unité simple uniquement, ou exploitation en unité multiples (2 rames accrochées),
- Le planning de réalisation du projet.

A ce niveau d'analyse préliminaire, la tension 750V= semble la mieux adaptée au projet du tramway de Québec et de Lévis, dans le cas de rames de 30 mètres et une exploitation en unité simple uniquement, avec un intervalle de l'ordre de 3 à 5 minutes.

Le choix définitif sera préconisé lorsque les valeurs des critères les plus influents mentionnés ci-dessus seront connues.

ANNEXE D : NOTE TECHNIQUE SUR LE CEE

1 CENTRE D'EXPLOITATION ET D'ENTRETIEN (CEE)

Un exercice a été fait dans le but d'établir à la louche la superficie du Centre d'exploitation et d'entretien. Le lecteur trouvera ci-après une première esquisse montrant ce à quoi pourrait ressembler le CEE.

Compte tenu d'un achalandage de 3 000 personnes/heure/sens sur le tronçon le plus chargé en pointe, on se dirige vers une fréquence de service ± 3 minutes avec des rames de 32 m.

Compte tenu d'une vitesse commerciale de ± 22 km/h et d'un premier réseau de ± 15 km de long, il faut prévoir ± 33 rames en phase 1 (incluant réserve d'exploitation et d'entretien).

Dans une deuxième phase (prolongement du réseau et accroissement de l'achalandage), il n'est pas déraisonnable de penser que la flotte de Matériel roulant pourrait passer à ± 55 rames de 32 m.

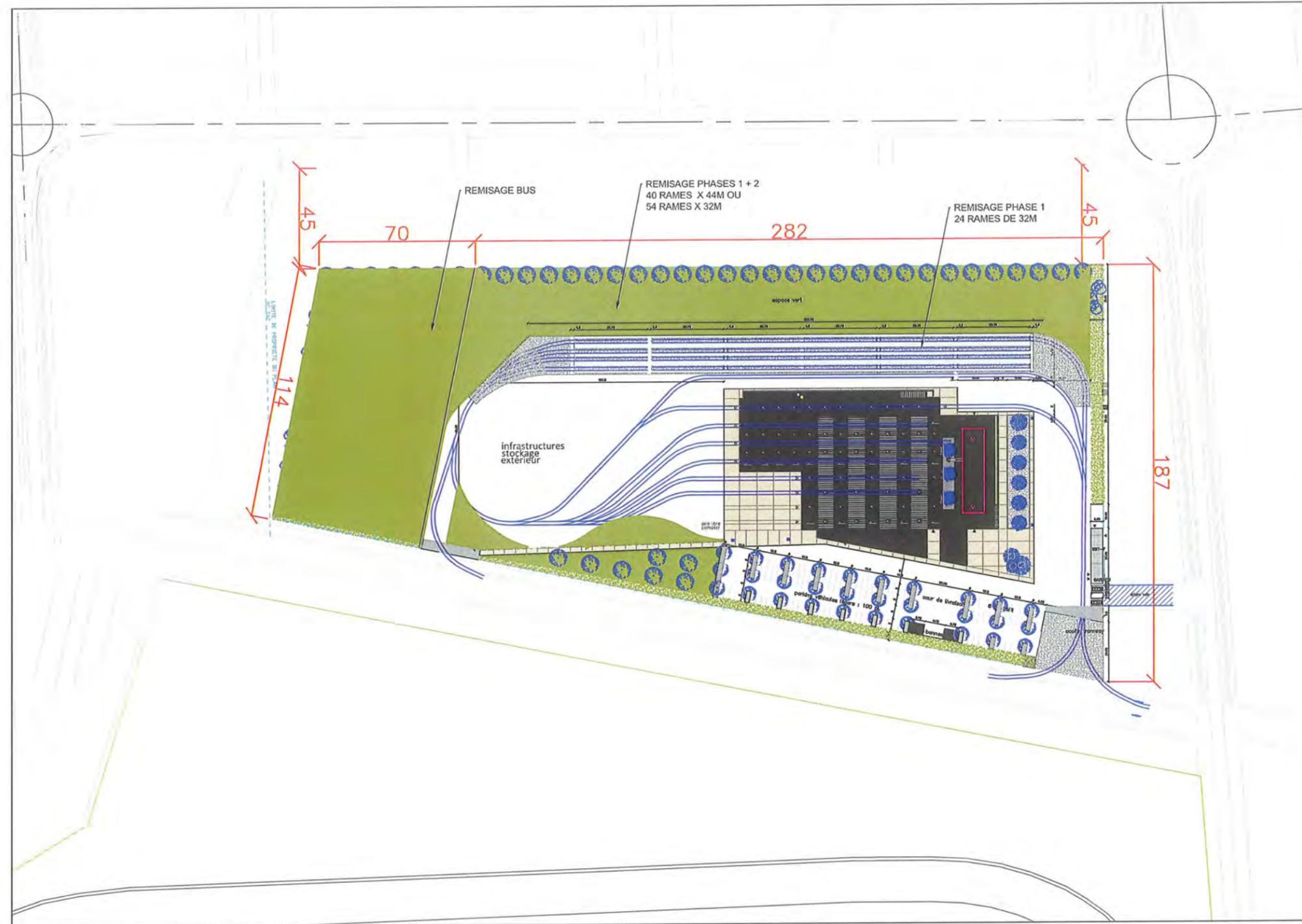
En ultime (incluant Lévis et un accroissement de l'achalandage), le parc de matériel roulant devra être plus important, mais il sera alors probablement judicieux au point de vue exploitation de construire un second Centre d'entretien (disons sur le territoire de Lévis).

En bref, à priori, nous pensons que le terrain requis pour un premier CEE devrait avoir \pm les dimensions indiquées au croquis ci-après.

Compte tenu :

- de l'importance de la superficie du terrain (entre 33 000 m² et 53 000 m²),
- que le terrain devrait être localisé près du tracé de la phase 1 du tramway pour minimiser le kilométrage haut-le-pied (et pourquoi pas être le long du boulevard Charest entre Verdun et Nérée-Tremblay),
- de l'activité économique générée par un tel centre (emploi en autres)
- etc.

La recherche d'un tel terrain devrait faire partie du projet de l'analyse redéveloppement des terrains de part et d'autre du tracé du tramway, ce qui fait partie du lot 3.



ÉCHELLE = 1:2000 (côtes en mètres)

100 m

Légende :

PA1	2012.07.18	Édition interne
RÉV.	DATE	DESCRIPTION

Client: **RTC** Contrat No: xxxx-xxxx-xx



Consultant :



Projet: Étude de faisabilité technique
Projet du tramway de Québec et de Lévis
Réseau de transport de la Capitale

Intitulé de l'étape:
1.1 PROJET DE RÉF., VARIANTES ET ENJEUX DU TRAMWAY

Intitulé du plan:
CENTRE D'EXPLOITATION ET D'ENTRETIEN
PLAN MASSE PRÉLIMINAIRE (EXEMPLE)

Dessiné par:
Vérifié par:
Approuvé par:

Format 11x17
Échelles:
Horizontale
Verticale

XXXXXX-XX-XXXX-XXXX

1	Révision No. PA1
1	