

Rapport – Division transport

2019-09-06

Référence : FR01T19A18-G-EDK0-MT-GE00-0002-A



RÉSEAU STRUCTURANT DE TRANSPORT EN COMMUN

ANALYSE COMPARATIVE DES MODES DE TRANSPORT LOURDS SUR RAIL



RAPPORT

Analyse comparative des modes de transport lourds sur rail

IDENTIFICATION DU DOCUMENT	
N° du document SYSTRA Canada	FR01T19A18-G-EDK0-MT-GE00-0002-A
N° du document client	N/A

RÉV.	DATE	MODIFICATION	PRÉPARÉ PAR	RÉVISÉ PAR	APPROUVÉ PAR
A	2019-09-06	Création du document	NCT/MR/ CFL/FD	MB/ST	BR/ HM / RT

Préparé par :

Nicolas Cao Trung
Architect


Signature

Maxime Rocquet
Chargée d'études / affaires


Signature

Christophe Farley-Legault, ing. Jr.
Ingénieur Jr. en planification de transport


Signature

Fidji Diboune, ing. Jr.
Ingénieur Jr. en génie électrique


Signature

Révisé par :

Maud Bernard
Responsable d'études


Signature

Susa Tulikoura
Spécialiste en planification de transport


Signature

Approuvé par :

Boris Rowenczyn
Directeur d'entité DCO


Signature



Hervé Mazzoni
Senior Transport Expert

Signature

Romain Taillandier, ing.
Responsable – Transport urbain

Signature

TABLE DES MATIÈRES

FAITS SAILLANTS	1
1. OBJECTIFS DE L'ANALYSE COMPARATIVE DES MODES DE TRANSPORTS LOURDS SUR RAIL	5
1.1 OBJET DE L'ÉTUDE	5
1.2 OBJECTIF DE L'ANALYSE COMPARATIVE DES MODES DE TRANSPORT LOURDS SUR RAIL	5
1.3 DÉFINITION D'UN SYSTÈME DE TRANSPORT EN COMMUN	6
2. SPÉCIFICITÉS TECHNIQUES DES SYSTÈMES DE TRANSPORT LOURDS SUR RAIL	7
2.1 TRAMWAY	7
2.1.1 CONCEPT GÉNÉRAL	7
2.1.2 LE MATÉRIEL ROULANT ET SES CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES	9
2.1.3 CONDITIONS HIVERNALES	11
2.2 TRAIN LÉGER SUR RAIL (SLR)	13
2.2.1 CONCEPT GÉNÉRAL	13
2.2.2 LE MATÉRIEL ROULANT ET SES CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES	13
2.2.3 CONDITIONS HIVERNALES	15
2.3 MONORAIL	16
2.3.1 CONCEPT GÉNÉRAL	16
2.3.2 LE MATÉRIEL ROULANT ET SES CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES	17
2.3.3 CONDITIONS HIVERNALES	19
2.4 MÉTRO SOUTERRAIN	21
2.4.1 CONCEPT GÉNÉRAL	21
2.4.2 LE MATÉRIEL ROULANT ET SES CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES	22
3. COMPARAISON PRÉLIMINAIRE DES QUATRE SYSTÈMES DE TRANSPORT Lourd SUR RAIL	25
3.1 CONTEXTE TERRITORIAL QUÉBÉCOIS	25
3.1.1 LE CORRIDOR D'ANALYSE	25
3.1.2 LE PATRIMOINE	26
3.1.3 LE RÉSEAU ROUTIER	27
3.1.4 LE RELIEF	28
3.2 EXIGENCES D'INSERTION ET DIFFICULTÉS DE CONSTRUCTION	30
3.2.1 TRAMWAY	30
3.2.2 TRAIN LÉGER SUR RAIL	33

3.2.3	MONORAIL	36
3.2.4	MÉTRO SOUTERRAIN	39
3.2.5	SYNTHÈSE DE L'INSERTION DES QUATRE SYSTÈMES	42
3.3	FIABILITÉ DES SYSTÈMES	44
3.4	DISPONIBILITÉ TECHNOLOGIQUE	46
3.5	COÛTS DES SYSTÈMES	47
3.6	SYSTÈMES RETENUS À LA SUITE DE LA COMPARAISON PRÉLIMINAIRE DES MODES DE TRANSPORT LOURDS SUR RAIL	50
4.	COMPARAISON DES SYSTÈMES TRAMWAY ET MÉTRO SOUTERRAIN	52
4.1	CAPACITÉ DU SYSTÈME AU REGARD DE L'ACHALANDAGE ATTENDU	52
4.2	ÉVOLUTIVITÉ DU SYSTÈME.....	57
5.	SYSTÈME RECOMMANDÉ.....	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-2 : Comparaison des 4 modes selon analyse antérieure	2
Tableau 5-1 : Analyse comparative des systèmes métro souterrain et tramway	4
Tableau 2-1 : Les caractéristiques générales du tramway	10
Tableau 2-2 : Les caractéristiques du matériel roulant tramway.....	11
Tableau 2-3 : Les caractéristiques générales du train léger sur rail	14
Tableau 2-4 : Les caractéristiques du matériel roulant train léger sur rail	15
Tableau 2-5 : Les caractéristiques générales du monorail	18
Tableau 2-6 : Les caractéristiques du matériel roulant monorail	19
Tableau 2-7 : Les caractéristiques générales du métro.....	23
Tableau 2-8 : Les caractéristiques du matériel roulant métro	24
Tableau 3-1 : Récapitulatif des coûts d'investissements et coûts d'exploitation	48
Tableau 3-2 : Comparaison des 4 modes selon analyse antérieure	50
Tableau 4-2 : L'achalandage de 3 scénarios modélisés en 2026 et 2041.....	55
Tableau 4-3 : Scénario tramway : taux d'occupation des rames à l'heure de pointe sur la section la plus chargée, avec taux de confort 3,3 personnes / m ²	55
Tableau 4-4 : Scénario métro court et métro long : taux d'occupation des rames à l'HP sur la section la plus chargée, avec taux de confort 3,3 personnes / m ²	56
Tableau 5-1 : Analyse comparative des systèmes métro souterrain et tramway.....	58

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Photos du tramway en France, source SYSTRA.....	8
Figure 2-2 : Exemple de tramways dans le monde	9
Figure 2-3 : Exemple des trains légers sur rail dans le monde	13
Figure 2-4 : Exemple de monorail dans le monde.....	17
Figure 2-5 : Exemples de métros dans le monde	22
Figure 3-1 : Contexte urbain et architectural du tracé.....	26
Figure 3-2 : Territoires d'intérêt historique et culturel sous juridiction de la CUCQ (Commission d'urbanisme et de conservation de Québec).....	27
Figure 3-3 : Réseau routier, source : Ville de Québec, Division de l'exploitation et de la mobilité intelligente	28
Figure 3-4 : Relief le long du tracé, source : SYSTRA	29
Figure 3-5 : Emprise en courbe et en section courante du Citadis de 2,40 m de large, source : SYSTRA	31
Figure 3-5 : Emprise en courbe et en section courante du matériel roulant de 2,65 m de large, source : SYSTRA	31
Figure 3-6 : Tramway : les points durs d'insertion, source : SYSTRA.....	33
Figure 3-7 : Un exemple de coupe d'insertion du train léger sur rail, source : SYSTRA	34
Figure 3-8 : Train léger sur rail : les points durs d'insertion, source : SYSTRA	35
Figure 3-9 : Coupe d'insertion du monorail Daegu (Corée du Sud), source : SYSTRA	36
Figure 3-10 : Monorail : les points durs d'insertion, source : SYSTRA.....	38
Figure 3-11 : Exemples de l'insertion d'un système de métro souterrain, source : SYSTRA	40
Figure 3-12 : Kilomètres linéaires constructibles de 4 modes de transport lourd sur rail pour un même montant d'investissement, source : SYSTRA	49
Figure 4-1 : Tracé du scénario tramway, source : RSTC et SYSTRA	53
Figure 4-2 : Tracé des scénarios métro souterrains, source : RSTC et SYSTRA	54

GLOSSAIRE

APS	Alimentation Par le Sol
BPRSTC	Bureau de Projet de Réseau Structurant de Transport en Commun
CBTC	Communications-based train control
CUCQ	Commission d'urbanisme et de conservation de Québec
GLO	Gabarit Limite d'Obstacle
HC	Heure Creuse
HP	Heure de pointe
LAC	Ligne aérienne de Contact
MR	Matériel Roulant
OD	Origine - Destination
PCC	Poste de Commande Centralisé
PCR	Poste Central de Régulation
PL	Poids Lourds
PMR	Personnes à Mobilité Réduite
PPHPD	Passagers Par Heure Par Direction
RSTC	Réseau structurant de transport en commun
SAFEGE	Société Anonyme Française d'Étude et de Gestion d'Entreprise
SLR	Train Léger sur Rail
TC	Transport en Commun
TCSP	Transport en Commun en Site Propre
UITP	International Association of Public Transport
UTO	Unattended Train Operation
VL	Véhicule Léger

FAITS SAILLANTS

L'étude comparative porte sur les quatre modes de transports lourds sur rail suivants :

- Tramway,
- Train léger sur rail (SLR),
- Monorail,
- Métro en souterrain.

Les critères permettant de choisir un système de transport en commun sont nombreux. Ils dépendent du contexte social, économique, politique de la ville, des objectifs de la mobilité et des objectifs propres à la conception d'un projet de transport. Dans cette étude, l'analyse est répartie en deux parties et est basée sur les critères essentiels permettant d'identifier le meilleur mode de transports lourds sur rail pour Québec :

- Une analyse comparative préliminaire a permis d'identifier deux modes qui sont retenus pour une analyse comparative approfondie. Les critères suivants sont analysés pour l'analyse préliminaire pour chaque mode :
 - disponibilité technologique,
 - exigences d'insertion et de construction,
 - fiabilité du système,
 - capacité du système,
 - coûts du système.
- Une analyse comparative approfondie des modes retenus basée sur les critères suivants :
 - capacité des systèmes au regard de l'achalandage attendu,
 - évolutivité des systèmes.

Résultats de l'analyse comparative préliminaire de quatre modes de transports lourds sur rail

Le métro souterrain peut apporter le meilleur service en ce qui concerne les fréquences, la vitesse et la régularité. La performance du tramway est conditionnée par le degré d'ouverture de la plateforme (site propre exclusif, infranchissable ou non, site partagé ou banalisé avec d'autres circulations) et les conditions de priorité au niveau des franchissements de carrefour (priorité aux feux). Le train léger sur rail crée une barrière dans la ville et nécessite des mesures importantes de gestion de la circulation et de franchissement du site propre exclusif. Le monorail est le mode le moins adapté aux conditions climatiques de Québec, ce qu'a montré l'exemple de Moscou.

L'accessibilité pour l'utilisateur est meilleure pour les modes tramway et train léger sur rail et moindre pour les modes métro et monorail du fait qu'ils sont surélevés ou souterrains. Pour ces derniers, il est nécessaire d'installer des équipements spécifiques pour accéder aux quais (ascenseurs, escaliers mécaniques, escaliers, etc.)

Les nuisances pendant la phase de construction peuvent être moindres pour le métro souterrain selon le type de tunnel (profond, semi-profond, tranchée couverte), car il n'est pas nécessaire de fermer autant de voies de circulations le long du tracé que lors de la construction d'un train léger sur rail ou d'un tramway. Les nuisances lors des travaux du monorail sont également moindres par rapport au train léger sur rail ou tramway, en raison de l'installation relativement rapide des piles. Cependant, le monorail repose sur un nombre limité de constructeurs et est assujéti à une menace pour la durabilité à long terme.

Le tableau ci-dessous résume la comparaison des quatre modes selon les exigences d'insertion et l'effort de construction, la fiabilité des systèmes dans des conditions hivernales, la disponibilité technologique et les coûts.

La couleur verte = très favorable, la couleur jaune = moyen, la couleur orange = faible et la couleur rouge = défavorable.

Tableau 0-1 : Comparaison des 4 modes selon analyse antérieure

	Tramway	Train Léger sur Rail	Monorail	Métro souterrain
Conditions d'insertion	+	---	-	+++
Fiabilité des systèmes dans des conditions hivernales	+	+	---	+++
Disponibilité technologique	+++	+++	---	+++
Coûts	+++	---	+	---


SYSTEME RETENU


SYSTEME NON RETENU


SYSTEME NON RETENU


SYSTEME RETENU

Compte tenu des résultats d'analyse des quatre modes basés sur l'insertion et l'effort de construction, la fiabilité des systèmes, la disponibilité technologique et les coûts, on peut conclure que le tramway et le métro souterrain sont les deux modes les plus adaptés au contexte de la ville de Québec. La section suivante se propose de comparer plus précisément ces deux modes l'un par rapport à l'autre.

Résultats de l'analyse comparative approfondie des deux modes , métro et tramway, retenus suite à l'analyse comparative préliminaire

Le métro souterrain présente plusieurs avantages. Il peut apporter le meilleur service en matière de fréquence, vitesse, et confort. Son avantage est notamment sa régularité et fiabilité, car il ne subit aucun conflit avec d'autres modes de transport. Cependant, ce mode de transport a des coûts de réalisation élevés. Il est presque cinq fois plus coûteux que le tramway, car c'est un mode souterrain. De plus, la nature des sols, inconnu à ce stade d'étude, et est porteuse de nombreuses incertitudes potentiellement susceptible de renchérir des coûts. De plus, ce mode de transport est surdimensionné dans le contexte québécois. Avec l'achalandage estimé, la fréquence du métro classique (composé de 6 voitures) devrait

avoir une fréquence de 13 minutes pour être optimale par rapport à sa capacité, ou le métro devrait être composé de deux voitures pour avoir un niveau de service attractif (fréquence de 4 minutes).

Ainsi on peut dire que le système de métro souterrain est le plus adapté dans le contexte québécois en matière d'insertion et de fiabilité mais à exclure compte tenu de son coût et de l'achalandage prévisionnel calculé pour la ville de Québec. Le tramway, en revanche, est le plus adéquat en terme de coût et aussi par rapport à l'achalandage estimé et la capacité du système.

Par conséquent, SYSTRA recommande un système tramway en tant que ligne structurante pour le projet du réseau structurant de transport en commun de la Ville de Québec (RSTC), considérant que, par rapport à d'autres systèmes, il est le seul à répondre à l'ensemble des critères (insertion, fiabilité, disponibilité technologique, coûts par rapport au budget prévu, capacité du système au regard de l'achalandage et évolutivité du système) de manière satisfaisante.

Le coût du tramway reste en adéquation avec les capacités de financement du maître d'ouvrage au contraire du métro, car avec le même montant d'investissement, il est possible de construire seulement 5 km de métro souterrain alors qu'il est possible de construire 23 km de tramway.

Le mode tramway correspond au mieux à l'achalandage en termes de capacité du système et il est un mode évolutif permettant de préserver une réserve de capacité en cas de montée en charge de l'achalandage.

La fiabilité du tramway est bonne toute l'année, y compris en hiver, à condition qu'un plan de déneigement de la plateforme et des quais soit mis en place et que soient envisagés les éléments de conception spécifiques tels que le réchauffage d'aiguillages, des centres d'entretiens clos et réchauffés, un matériel roulant bien isolé, etc.

Le tableau ci-dessous récapitule l'analyse comparative préliminaire et approfondie des systèmes métro et tramway.

La couleur verte = très favorable, la couleur jaune = moyen, la couleur orange = faible et la couleur rouge = défavorable.

Tableau 0-2 : Analyse comparative des systèmes métro souterrain et tramway

	Tramway	Métro souterrain
Conditions d'insertion	+	+++
Fiabilité des systèmes dans les conditions hivernales	+	+++
Disponibilité technologique	+++	+++
Coûts	+++	---
Capacité du système au regard d'achalandage	+++	---
Évolutivité du système	+++	+++



SYSTEME RECOMMANDÉ



SYSTEME NON RECOMMANDÉ

1. OBJECTIFS DE L'ANALYSE COMPARATIVE DES MODES DE TRANSPORTS LOURDS SUR RAIL

1.1 OBJET DE L'ÉTUDE

SYSTRA a été mandatée par le Bureau de projet de réseau structurant de transport en commun (BPRSTC) de la ville de Québec afin de réaliser une étude visant à confirmer le choix du système de transport lourd le plus approprié pour le projet du RSTC.

Par ce mandat, BPRSTC commissionne SYSTRA à réaliser une analyse comparative de quatre principaux modes reconnus :

- Tramway,
- Train léger sur rail (SLR),
- Monorail,
- Métro en souterrain.

L'analyse comparative des modes de transports lourds sur rail est constituée de deux parties :

- Une présentation des quatre modes de transport lourds sur rail (tramway, train léger sur rail, monorail et métro), et une analyse comparative préliminaire de ces modes permettant d'identifier les modes retenus pour une analyse comparative approfondie. Les critères suivants sont analysés pour chaque mode :
 - disponibilité technologique,
 - exigences d'insertion et de construction,
 - fiabilité du système,
 - capacité du système,
 - coûts du système.
- Une analyse comparative approfondie des modes retenus basée sur les critères suivants :
 - capacité des systèmes au regard de l'achalandage attendu,
 - évolutivité des systèmes.

1.2 OBJECTIF DE L'ANALYSE COMPARATIVE DES MODES DE TRANSPORT LOURDS SUR RAIL

Le choix du système est un moment déterminant dans la vie d'un projet de Transport en Commun en Site Propre (TCSP). Ce choix repose sur une analyse multicritère contextualisée et il n'existe pas de méthode universelle qui impose ce choix modal automatiquement. Également, cette analyse ne doit pas être réduite à la seule question du type de véhicule à faire circuler, mais doit intégrer l'ensemble des éléments de contexte (techniques, financiers et politiques) dans lequel le projet transport s'inscrit.

Il en résulte une démarche qui combine une multitude de paramètres dont l'importance varie fortement en fonction du contexte local et des orientations et objectifs des acteurs politiques portant le projet.

De fait, il n'existe généralement pas une solution unique pour répondre à un besoin de transport, mais bien plusieurs solutions.

Le choix d'un système de transport s'appuie d'une part sur une vision prospective à long terme de l'agglomération et de son réseau de transport, et d'autre part sur un diagnostic des opportunités et des contraintes du territoire. Il est un vecteur déterminant dans la politique d'aménagement du territoire, de la densification urbaine, et de la politique des transports et de la mobilité dans sa globalité.

Ainsi, l'objectif est d'évaluer quel sera le système le plus optimal pour la Ville de Québec par rapport à un besoin de déplacement identifié et adapté au contexte local.

Il existe plusieurs critères d'aide à la décision dans le choix du système. Toutefois, de façon théorique et simplifiée de choisir un système de transport revient à trouver le meilleur compromis entre :

- La satisfaction de la demande : chaque mode a un domaine de pertinence en termes d'achalandage (couple capacité – fréquence);
- Le coût (investissement + exploitation & maintenance) doit rester en adéquation avec les capacités de financement du territoire;
- L'ambition en termes de qualité (confort des usagers) et niveau de service (fréquence, amplitude).

L'éventail des systèmes de transport doit être analysé selon ces prismes pour trouver la solution la plus adaptée.

1.3 DÉFINITION D'UN SYSTÈME DE TRANSPORT EN COMMUN

Un système de transport en commun se définit, avant tout, comme un moyen permettant de se déplacer d'un point à un autre par un véhicule, et par conséquent, via une infrastructure. Chaque système a ses spécificités réglementaires et techniques. Les systèmes de transport en commun sur rails peuvent être décomposés en 4 ensembles techniques aux caractéristiques différentes. Chacun de ces quatre ensembles techniques contribue à la qualité et à la performance du système de transport :

- Infrastructure : dédiée ou partagée, souterraine, aérienne ou en surface;
- Systèmes : alimentation, signalisation, contrôle, télécommunication, automatisme;
- Matériel roulant : capacité, dimensions, mode de conduite;
- Mode d'exploitation : distance inter station, vitesse commerciale, fréquence, amplitude de service.

Un système de transport efficace doit être en capacité de répondre à la demande identifiée (enjeux de desserte, achalandage attendu) et d'assurer le niveau d'offre souhaité (en termes d'exploitation, de qualité de service, d'image, etc.).

Afin de confirmer le choix du système de transport le plus approprié pour le réseau structurant de transport en commun de la Ville de Québec, une analyse comparative des quatre modes sur rail est réalisée :

- Le tramway,
- Le train léger sur rail (SLR),
- Le monorail,
- Le métro en souterrain.

2. SPÉCIFICITÉS TECHNIQUES DES SYSTÈMES DE TRANSPORT LOURDS SUR RAIL

Ce chapitre synthétise les principales caractéristiques techniques des systèmes de transport sur rail pour les quatre modes étudiés. Cette description met en lumière les principales caractéristiques de ces modes dans l'objectif de les comparer entre eux. Cette description est donc synthétique et non exhaustive afin de se concentrer sur les principaux indicateurs de comparaison entre les modes.

2.1 TRAMWAY

2.1.1 Concept général

Le système « Tramway » est à la base un système ferroviaire classique (roulement fer sur fer) dans lequel des rames indépendantes circulent sur des infrastructures spécifiques (rails), mais pas toujours dédiées (cas des sites banalisés, dont la plateforme est franchissable).

La forte évolution du marché, le contexte de plus en plus concurrentiel (regroupement de constructeurs, arrivée de nouveaux acteurs), mais surtout l'engouement autour de ce mode, choisi par de nombreuses agglomérations dans le monde, ont conduit à un élargissement considérable des matériels proposés. Ces matériels sont conçus sur l'assemblage de modules de base constituant le véhicule et offrent ainsi une modularité permettant d'adapter chaque offre aux besoins spécifiques des agglomérations tout en bénéficiant d'outils de production standardisés.

Le tramway est présent dans 53 pays et sur l'ensemble des continents. Il transporte 45 millions de personnes chaque jour dans 388 villes¹. Selon l'UITP², 80 villes à travers le monde projetaient ou construisaient leur première ligne de tramway en 2015.

Le système de guidage des tramways sur fer est basé sur le contact roue/rail. Il a pour principal avantage de limiter le niveau d'effort nécessaire à la transmission du mouvement, et pour inconvénient principal de disposer d'une adhérence limitée dans la transmission de cet effort, contrairement aux véhicules sur pneus. Le contact roue/rail constitue une interface sensible et nécessite l'entretien des pièces d'usure (reprofilage des roues du matériel roulant, et parfois rechargement du rail³ dans les zones soumises à de fortes contraintes). Cette interface est cependant très largement maîtrisée via les nombreux retours d'expérience qui ont permis d'éprouver différentes solutions techniques.

Le tramway est un système qui permet une requalification urbaine et viaire. Il évolue en milieu urbain ouvert, en interaction forte avec tous les usagers de la voirie et de l'espace public, avec des niveaux de protection variables de la plateforme : site propre infranchissable, site protégé, site banal mélangé à la circulation automobile, aire piétonne, etc.

¹ International Association of Public Transport (UITP), statistiques établies à novembre 2015

² International Association of Public Transport (UITP), statistiques établies à novembre 2015

³ Le rechargement du rail permet de prolonger la durée de vie du rail dans les endroits où il est usé ce qui évite de le remplacer



Lyon – Plateforme infranchissable (voitures) et végétalisée



Paris (T2) – Plateforme infranchissable (voitures) – Toulouse – Site semi-franchissable



Tours (haut) et Montpellier – Aire piétonne

Figure 2-1 : Photos du tramway en France, source SYSTRA

C'est un transport guidé caractérisé par un véhicule assujéti à suivre de façon permanente une trajectoire déterminée par des rails matériels (cette caractéristique lui permet de se soustraire au Code de la route, pour sa partie réglementaire).

Le tramway repose sur le principe de la conduite à vue : le conducteur est à tout moment responsable de la marche du véhicule. Il adapte sa vitesse et conditionne son rythme de conduite à ce qu'il voit (obstacles sur la voie, autres rames de tramway, signalisation de trafic, etc.). Cela le distingue particulièrement du métro ou du train léger sur rail dont le principe de base est le cantonnement (fixe – avec un découpage de la voie en cantons / blocs ou mobile – grâce au Communications-based train control (CBTC)), qui assure l'espacement en sécurité entre les trains.

Généralement, la vitesse commerciale moyenne observée est de l'ordre de 18 à 20 km/h en milieu urbain (selon les conditions d'insertion, le nombre de carrefours franchis, etc.), en relation avec une maille de desserte de l'ordre de 400 m entre stations. A noter qu'il s'agit d'une moyenne observée, et que celle-ci peut être supérieure dans les cas où l'inter station est augmentée, ou lorsque la densité de carrefours traversés est moindre.

Pour atteindre les objectifs de vitesse commerciale, un principe de priorité maximale de passage aux carrefours est généralement déployé. Il consiste classiquement à détecter le tramway en amont de l'intersection, à gérer son approche, à assurer que son « feu vert » lui soit offert au moment de son arrivée à la ligne d'effet des feux, puis retour au fonctionnement nominal du carrefour pour limiter le temps perdu par les autres usagers dès que le tramway libère la zone de traversée. Les signaux lumineux d'intersection du tramway ainsi que les systèmes de détection et d'acquiescement du tramway sont raccordés au

contrôleur de feux routiers qui gère la demande de priorité des tramways et la Signalisation Lumineuse de Trafic (SLT) complète du carrefour.

En termes de droit, le tramway est un véhicule généralement « prioritaire » par rapport aux autres usagers de la route⁴. Absolu dans son principe, le droit de priorité est toutefois relatif dans ses effets : il ne comporte aucune immunité et ne dispense pas d'observer les autres règles du Code de la route. Dans les faits, ce régime de priorité accordé aux tramways n'est pas exclusif d'une obligation générale de prudence applicable à tout usager de la route. Également, les conducteurs de tramway sont tenus de respecter les signaux comportant des prescriptions absolues (ordre, interdiction, restrictions temporaires), ainsi que les indications données par les agents habilités à régler la circulation routière.

2.1.2 Le matériel roulant et ses caractéristiques générales

Le matériel roulant « Tramway » est conçu pour une durée de vie entre 25 et 30 ans, durée qui peut être prolongée jusqu'à 40 ans par des opérations de rénovation et de remise à niveau technique.

La richesse des configurations proposées par les différents constructeurs permet de couvrir une gamme très élargie de capacité unitaire des rames, et par conséquent du système de transport. L'évolution du marché des tramways urbains a conduit les constructeurs à étudier des véhicules dont le concept général repose sur les principes suivants : plancher bas intégral avec articulations multiples, conception modulaire, personnalisation possible (notamment par des livrées et des aménagements intérieurs spécifiques), et évolutivité de la capacité de transport. En effet, cette dernière peut être augmentée au cours de la vie du véhicule sans diminuer les performances par l'ajout de nouveaux modules ou par l'exploitation en unités doubles (l'infrastructure, les quais de stations, l'électrification et notamment la signalisation ferroviaire devant cependant avoir été dimensionnées pour cette possible évolution).

La capacité d'un système de tramway peut varier considérablement de manière générale entre 2 600 et 6 000 passagers par heure et par direction avec les rames simples, selon le matériel roulant (longueur / largeur) et la fréquence choisie. En couplant les rames de tramway, il est cependant possible d'augmenter la capacité du système jusqu'à 10 000 passagers par heure et par direction, comme c'est le cas sur la ligne de Tramway T2 en Île-de-France (France), par exemple. Toutefois, une telle fréquentation est exceptionnelle et s'accompagne de difficultés particulières d'exploitation (irrégularités, indisponibilités..).



Tours, source : SYSTRA



Rio de Janeiro, source : SYSTRA



Casablanca, source : SYSTRA

Figure 2-2 : Exemple de tramways dans le monde

⁴ Notion variable selon les pays. À titre d'exemple, au Danemark, le tramway est considéré comme un véhicule routier et le piéton est prioritaire d'un point de vue réglementaire.

Le tableau suivant présente les caractéristiques générales du système tramway.

Tableau 2-1 : Les caractéristiques générales du tramway⁵

Les caractéristiques générales du tramway	
Circulation en site propre à privilégier (objectif de performance du système), mais possibilité d'avoir des sites partagés avec les véhicules routiers ou les piétons	
Pente maximale : 7 % - 8 %	
Rayon de courbure inférieur à 25 m	
Priorité aux intersections	
Distance entre les stations : +/- 400 m	
Alimentation électrique : Ligne aérienne de contact ou batteries (le plus souvent 750V) <i>nb : des systèmes d'alimentation par le sol (APS) existent, mais ne peuvent être appliqués aux conditions climatiques de Québec</i>	
Fréquence : jusqu'à un tramway toutes les 3 minutes par direction	
Capacité : entre 2 600 et 6 000 passagers par heure par direction	
Vitesse commerciale : 18-20km/h, selon le niveau de protection de la plateforme	
Véhicules articulés, rames couplées	
Coût du matériel roulant (MR) : 3 à 6 M\$ par rame (simple)	
Durée de vie du MR ⁶ : 25 à 40 ans	
Coût d'investissement : de 25 à 45 M\$/km	
Coût d'exploitation et d'entretien d'une ligne en moyenne : de 10 à 15 \$/véhicules kilomètres/an (veh.km/an)	

Spécificités techniques et données de constructeurs

Les caractéristiques suivantes sont données à titre indicatif pour le matériel roulant tramway et basées sur des modèles des firmes : canadienne « Bombardier », française « Alstom », finlandaise/tchèque « Škoda Transtech » et espagnole « CAF », qui sont les principaux constructeurs sur le marché du secteur des transports en commun sur rail. D'autres constructeurs⁷ existent en plus des quatre présentés ci-dessous.

⁵ Sources des caractéristiques générales : base de données SYSTRA (Projets SYSTRA dans le monde & benchmarks) & CEREMA (anciennement CERTU) : Référentiel pour le choix des systèmes de transports collectifs à haut niveau de service; Choisir un mode de transport capacitaire; Quels indicateurs de suivi de l'efficacité des services de transports; Choisir son système de transport au service d'un réseau et d'un projet de territoire.

⁶ La base pour les calculs comparatifs

⁷ Ansaldo Breda (Italie/Japon), Siemens (Allemagne), Stadler (Suisse), CRCC (Chine), Heiterblick (Allemagne), Kawasaki et Kinki Sharoyo (Japon), Pesa et Protram (Pologne) ou Tartra (République tchèque)

Les modèles suivants sont pris en exemple :

- « Cityrunner-Flexity Outlook C » de Bombardier,
- « Artic » de Škoda Transtech,
- « Urbos AXL » de CAF,
- « Citadis » d'Alstom.

Tableau 2-2 : Les caractéristiques du matériel roulant tramway

	Cityrunner	Artic	Urbos AXL	Citadis
Réseau	Genève	Helsinki	Stockholm	Montpellier
Longueur (m)	42,0	27,6	39,5	42,5
Largeur (m)	2,30	2,40	2,65	2,65
Hauteur (m)	3,67	3,83	3,60	3,27
Masse à vide (t)	50,1	43,4	-	51,9
Écartement (mm) ⁸	1000	1000	1435	1435
Alimentation (V)	750 en continu	600 en continu	750 en continu	750 en continu
Vitesse maximale (km/h)	60	80	90	70
Capacité assise (nbre de passagers)	66	88	68	70
Capacité totale (nbre de passagers) (niveau de confort : 4 passagers / m ²)	237	213	240	304

2.1.3 Conditions hivernales

Sur les réseaux ferrés, et notamment les réseaux de tramway, des mesures sont prises en compte en cas de conditions climatiques hivernales extrêmes.

Les éléments de conception à prendre en compte pour assurer la circulation d'un tramway pendant l'hiver sont listés ci-dessous et doivent s'inscrire de façon plus générale dans le cadre d'un plan d'opérations d'entretien hivernal :

- Les systèmes d'aiguillages doivent être réchauffés, par exemple, par des résistances électriques ou par des brûleurs à propane;
- Le déneigement des rails peut être assuré directement par le matériel roulant, du fait de son poids (plusieurs dizaines de tonnes), qui chasse la neige sur les côtés. Si les chutes de neige sont très importantes, plusieurs systèmes existent pour désencombrer la voie. Le premier consiste à mettre en

⁸ Écartement des rails est la distance entre les 2 voies de rail du tramway.

place un accessoire (soc) servant à écarter la neige à l'avant de la voiture de tête. À défaut, un matériel roulant spécifique existe et permet de nettoyer les voies. Cette rame ouvre la voie avant le début du service;

- Il est essentiel d'empêcher l'entassement de neige dans les gorges du rail (éviter des sites banalisés) et de ne pas utiliser de sel de déneigement, car il durcit la neige dans les gorges du rail et rend difficile son nettoyage;
- La ligne aérienne de contact (LAC) ne nécessite pas de gestion hivernale particulière si l'amplitude horaire du tramway est assez élevée (18 h-20 h/24 h), car dans ce cas les rames en circulation empêchent la LAC de geler. L'amplitude horaire prévue à Québec est 20 h (circulation entre 5 h à 1 h);
- Les centres d'entretien doivent être clos et chauffés afin que les rames soient dégivrées;
- Le matériel roulant doit être bien isolé pour empêcher la formation de gel dans les rames.

À titre d'exemple, la ville de Toronto (Canada) ou la ville d'Helsinki (Finlande) disposent d'un réseau de tramway fonctionnant lors des périodes hivernales. Le matériel roulant (Bombardier ou Škoda Transtech) est équipé de dispositifs particuliers pour circuler dans des conditions extrêmes. Les tramways circulent pendant les chutes de neige et les grands froids. Par exemple, à Helsinki, les rames de déneigement commencent à circuler lors de chutes de neige de plus de 40 cm. Avant cela, les rames de tramway assurent le déneigement.

2.2 TRAIN LÉGER SUR RAIL (SLR)

2.2.1 Concept général

Le **Système de « Train léger sur rail »** est un mode de transport en commun urbain/interurbain sur fer ayant une vitesse commerciale variant entre 30km/h et 40km/h. Il dispose d'une capacité allant jusqu'à 25 000 passagers par heure par direction selon les longueur et largeur du matériel roulant. Le niveau de service dépend des caractéristiques techniques du matériel roulant et des caractéristiques physiques de l'itinéraire (pentes, courbes, distance moyenne entre les stations).

Le train léger sur rail se caractérise par son **site propre exclusif, intégralement séparé du trafic de surface**, ce qui garantit la sécurité, la rapidité et la fiabilité du service. Le plus souvent, on trouve ce mode de transport sur les emprises ferroviaires comme à Charleroi en Belgique, à Edmonton ou Metrolink à Manchester. Il est alimenté par caténaire ou troisième rail.

Contrairement au tramway, la gestion de l'espacement entre les rames n'est pas gérée à vue (par le conducteur), mais par un système de cantons, et nécessite des équipements et systèmes de signalisation. Son système de signalisation est capable de fonctionner sans conducteur (automatique) tout comme le métro.

Le système de Train Léger sur Rail est généralement utilisé pour transporter un grand nombre de passagers des banlieues périphériques dans le quartier central des affaires. Dans de nombreux cas, les lignes de Train Léger sur Rail de banlieue peuvent avoir une vitesse maximale pouvant atteindre 90 km/h, sauf dans les centres-villes où les arrêts sont plus rapprochés.

2.2.2 Le matériel roulant et ses caractéristiques générales

Le **matériel roulant « Train léger sur rail »** se caractérise comme un système ferroviaire léger et alimenté électriquement. Son système de guidage est basé sur le contact « rail / roue » ou « rail / pneu ». Ses caractéristiques et ses performances sont comparables à celles du métro.

L'évolution constante des modes de transport en commun impose aux constructeurs une demande plus diversifiée du matériel roulant capable de répondre aux besoins croissants en matière de capacité du système.

Le Train léger sur rail constitue une réponse à ces besoins par sa polyvalence, étant capable de circuler comme un métro ou comme un train de banlieue, avec des arrêts tous les 500 m à 1 000 m.



Nantes, source : SYSTRA



Kuala Lumpur, source : SYSTRA

Figure 2-3 : Exemple des trains légers sur rail dans le monde

Le tableau suivant présente les caractéristiques générales du système de train léger sur rail.

Tableau 2-3 : Les caractéristiques générales du train léger sur rail⁹

Les caractéristiques générales du train léger sur rail	
Intégralement séparé du trafic de surface	
Pente maximale : 7 %	
Rayon de courbure inférieur à 150 m	
Potentiellement sans conducteur (automatique)	
Distance entre les stations : 500 m à 1 000 m	
Alimentation électrique : caténaires (le plus souvent 750V ou 1500V) – ou 3 ^e rail	
Fréquence : jusqu' à un train toutes les 1,5 minute par direction	
Capacité : jusqu'à 25 000 passagers par heure par direction selon la longueur & largeur du matériel roulant	
Vitesse commerciale : de l'ordre de 30 à 40 km/h	
Matériel roulant (MR) : 3 à 6 voitures de 45 à 90 m (en exploitation de rames couplées : 2 x 45 m)	
Coût du MR : 4,5 à 7 M\$ par rame ¹⁰	
Durée de vie du MR ¹¹ : ~ 40 ans	
Coût d'investissement : de 45 à 65 M\$/km	
Coût d'exploitation et d'entretien d'une ligne en moyenne : de 15 à 24 \$/ véhicules kilomètres/an	

Spécificités techniques

Les caractéristiques suivantes sont données à titre indicatif et basées le modèle de la firme canadienne « Bombardier », leader sur le marché du secteur des transports en commun sur rails. Il existe d'autres constructeurs¹² dans le monde en plus de ceux présentés ci-dessous.

⁹ Sources des caractéristiques générales : base de données SYSTRA (Projets SYSTRA dans le monde & benchmarks) & CEREMA (anciennement CERTU) : Référentiel pour le choix des systèmes de transports collectifs à haut niveau de service; Choisir un mode de transport capacitaire; Quels indicateurs de suivi de l'efficacité des services de transports; Choisir son système de transport au service d'un réseau et d'un projet de territoire.

¹⁰ Matériel roulant de 45m (valeur basse) ou 90m (valeur haute)

¹¹ La base pour les calculs comparatifs

¹² CAF (Espagne), ROTEM (Corée), Siemens (Allemagne), CRCC (Chine), Kawasaki et Kinki Sharyo (Japon)

Tableau 2-4 : Les caractéristiques du matériel roulant train léger sur rail

	S series
Réseau	Scarborough ligne 3
Longueur (m)	12,7
Largeur (m)	2,49
Hauteur (m)	inconnue
Masse à vide (t)	15,4
Écartement (mm) ¹³	1435
Alimentation (V)	600
Vitesse maximale (km/h)	70
Capacité assise (nbre de passagers)	30
Capacité totale (nbre de passagers) (niveau de confort : 4 passagers / m ²)	85

2.2.3 Conditions hivernales

L'entretien hivernal du train léger sur rail est globalement similaire à celui du tramway, mais présente quelques spécificités supplémentaires.

Les conditions de gel de l'eau souterraine doivent être suivies pour que l'infrastructure ne subisse pas de dommages dus aux gels et dégels (risque de déformation). Dans le cas contraire, la vitesse de circulation doit être réduite en période hivernale et limitée à 50 km/h, afin d'assurer l'exploitation du système en toute sécurité. Les dommages peuvent être prévenus en ouvrant les fossés et les canalisations pour permettre à l'eau de fonte de circuler et aux remblais de sécher.

Il est essentiel de bien organiser le déneigement de l'infrastructure pour assurer la performance opérationnelle. Il est conseillé d'installer des brosses de neige fixes au niveau des aiguilles permettant d'améliorer leur fonctionnement (moins de blocages) et de diminuer leur besoin de déneigement.

¹³ Écartement des rails est la distance entre les 2 voies de rail.

2.3 MONORAIL

2.3.1 Concept général

Le Système du « Monorail » est un mode de transport surélevé et guidé sur un rail unique (rail ou poutre en béton) et aux différentes techniques de propulsion et d'alimentation, parmi lesquelles on trouve la technologie à roues qui est la plus répandue pour les dessertes urbaines.

Le monorail urbain est exploité et utilisé pour transporter des passagers généralement sur de courtes distances (5 à 30 km), pour des dessertes urbaines, et nécessite une infrastructure spécifique. Sa vitesse commerciale est comprise entre 25 et 40 km/h (selon l'inter station).

Le monorail évolue en général sur des infrastructures surélevées, ce qui lui permet de s'affranchir des contraintes de circulation routière, et de n'avoir aucune interaction avec les autres modes de transport, les cyclistes, les piétons. Les stations sont aménagées en ouvrages, généralement dotés d'ascenseurs ou d'escaliers mécaniques. C'est un système globalement similaire au métro aérien, mais qui nécessite des emprises plus réduites en raison du système de guidage par rail unique central, se matérialisant par une poutre béton ou acier.

On peut distinguer deux types de monorails : système monorail sur rail central et système monorail suspendu.

Le système monorail sur rail central est aujourd'hui le plus répandu des monorails dans le monde. Les véhicules sont montés à cheval sur un rail en béton ou en acier. Le roulement se fait sur des pneus et le guidage par des pneus latéraux de part et d'autre du rail central. Le monorail sur rail central peut évoluer sur viaduc surélevé, mais son insertion est aussi possible au niveau du sol (rare, généralement en dépôt) ou en souterrain (pas d'exemple existant et intérêt très limité du fait du coût qui tourne le dos à l'ambition initiale d'économiser sur l'infrastructure). La largeur du rail central diffère selon le constructeur, ce qui rend incompatibles les matériels des différents constructeurs entre eux.

Le système monorail peut également être **en suspension**, comme le « *Wuppertal Schwebahn* » (Allemagne), le premier monorail suspendu électrique du monde, qui s'apparente à un téléphérique étant donné que le matériel roulant est constitué d'une cabine suspendue sous le rail de guidage. Afin de tenir sur le rail de guidage, les roues, initialement de type ferroviaire, étaient dotées de deux boudins. Le Monorail de Wuppertal évolue exclusivement sur une infrastructure surélevée en acier reposant sur des piliers. En effet, il est difficile d'envisager une implantation à niveau pour ce type de matériel dont le principal avantage réside dans l'absence d'impact majeur sur l'espace immédiat qu'il survole (par exemple les voies de circulation, la rivière, etc.).

Le concept du monorail suspendu a évolué dans les années 1960 durant lesquelles la Société Anonyme Française d'Étude et de Gestion d'Entreprise (SAFEGE) a développé un système de roulement sur pneu inspiré du métro sur pneus déployé sur certaines lignes du métro parisien. Ce système est doté d'un rail creux auquel les voitures sont suspendues par les bogies dotés de 4 roues pneumatiques de roulement et de quatre roues pneumatiques de stabilisation. Ce système a été repris par Hitachi et est aujourd'hui en place au Japon à Shonan ou à Chiba. Il a aussi inspiré la technologie Siemens des People Movers actuellement déployée à Dortmund et à Düsseldorf.

Le monorail a traditionnellement un fort impact visuel dans un milieu urbain, et pour certains, une image futuriste. L'insertion d'un monorail a besoin d'une emprise au sol limitée, mais nécessite toutefois des artères capables de l'héberger (volumétrie avec distances de sécurité aux façades du bâti). Il peut également disposer de pylônes métalliques positionnés de manière latérale à la voirie dans un espace non contraint par un tissu urbain. Il est à noter qu'une implantation « idéale » du monorail suspendu se situe au-dessus d'un cours d'eau où rien d'autre ne peut être construit.

Les sections aériennes nécessitent de prévoir les conditions d'évacuation des passagers en section courante et les équipements d'accès aux stations.

2.3.2 Le matériel roulant et ses caractéristiques générales

Le matériel roulant « monorail », système de transport guidé, a une largeur de rame supérieure à celle du chemin de guidage, qu'il s'agisse d'un rail unique ou d'une poutre bétonnée. Ce système implique donc une certaine stabilité de l'ensemble des rames, rendue possible par deux technologies bien distinctes :

- Les rames sont en chevauchement sur leur support;
- Les rames sont suspendues sous leur support qui est généralement un rail. Le contact est de type roue/rail.

Il est à noter que la prise en compte des exigences de sécurité liées à l'évacuation des passagers en cas d'arrêt complet et prolongé d'un véhicule conduit à un surenchérissement du coût de l'infrastructure, réduisant alors significativement les économies promises par un ouvrage minimaliste.

Il existe de nombreuses variétés et une multitude de modèles monorail à travers le monde, notamment en Amérique et en Asie.



Shonan, source : SYSTRA



Dubaï, source : SYSTRA



Daegu, source : SYSTRA

Figure 2-4 : Exemple de monorail dans le monde

Le tableau suivant présente les caractéristiques générales du système monorail.

Tableau 2-5 : Les caractéristiques générales du monorail¹⁴

Les caractéristiques générales du monorail	
Circulation sur un ouvrage dédié ou une emprise entièrement étanche à toute circulation	
Pente maximale : 7 % - 10 %	
Rayon de courbure inférieur à 45 m	
Automatique (sans conducteur)	
Distance entre les stations : 500 m à 800 m	
Alimentation électrique	
Fréquence : jusqu'à une rame toutes les 1,5 minute par sens ¹⁵	
Capacité : 4 000 à 30 000 passagers par heure par direction	
Vitesse commerciale : 25 à 40 km/h	
Matériel roulant (MR) : réversible – 2 à 6 voitures (30 à 90 m)	
Coût du MR : 3 à 4 M\$ par voiture	
Durée de vie du MR ¹⁶ : 30 à 40 ans	
Coût d'investissement : de 45 à 70 M\$/km	
Coût d'exploitation et d'entretien d'une ligne en moyenne : de 6 à 16 \$/ véhicules kilomètres/an	

Exemples de matériels roulants de monorail de 3 constructeurs - Spécificités techniques

Les caractéristiques suivantes sont données à titre indicatif et basées sur des modèles des firmes : canadienne « Bombardier », allemande « Siemens » et japonaise « Hitachi Monorail », principaux constructeurs de monorails dans le monde. Siemens a produit également un modèle de monorail suspendu, déployé sur deux sites en Allemagne. Il existe quelques autres constructeurs dans le monde en plus de ces trois présentés ci-dessous¹⁷.

¹⁴ Sources des caractéristiques générales : base de données SYSTRA (Projets SYSTRA dans le monde & benchmarks) & CEREMA (anciennement CERTU) : Référentiel pour le choix des systèmes de transports collectifs à haut niveau de service; Choisir un mode de transport capacitaire; Quels indicateurs de suivi de l'efficacité des services de transports; Choisir son système de transport au service d'un réseau et d'un projet de territoire.

¹⁵ À double voie

¹⁶ La base pour les calculs comparatifs

¹⁷ FURTEX (États-Unis), Hitachi-Mitsubishi et Marubeni (Japon), Malaysia Monorail Tech (Malaisie)

Parmi les modèles, on peut citer en exemple, ceux de :

- « Innovia 300 » de Bombardier (véhicule multicorps avec 4 voitures),
- « Daegu Urban » de Hitachi (véhicule multicorps biarticulé),
- « H-Bahn » de Siemens (véhicule isolé).

Tableau 2-6 : Les caractéristiques du matériel roulant monorail

	Innovia 300	Daegu Urban	H-Bahn (SIPEM) ¹⁸
Réseau	-	Daegu	Université de Dortmund
Longueur (m)	50,1	46,2	8,2
Largeur (m)	3,15	2,90	2,24
Hauteur (m)	4,05	5,24	2,62
Masse à vide (t)	14,0	11,0	4,5
Alimentation (V)	750 en continu	750 - 1500 en continu	400 triphasé
Vitesse maximale (km/h)	80	70	50
Capacité assise (nbre de passagers)	64	84 à 96 selon configuration	16
Capacité totale (nbre de passagers) (niveau de confort : 4 passagers / m ²)	356	265	45

2.3.3 Conditions hivernales

La plupart des monorails en service dans le monde sont situés dans des zones aux hivers doux, voire chauds, ou à défaut dans des régions tempérées limitant ainsi les impacts des conditions climatiques hivernales sur l'infrastructure. À noter, tout de même, une exception avec le monorail de Moscou mis en service en 2004.

Il faut différencier les types de monorails. En effet, ceux disposant de matériels roulants suspendus sont moins soumis aux aléas climatiques, car le rail porteur peut être couvert, évitant ainsi l'accumulation de neige sur l'infrastructure. Ceci n'est pas envisageable avec des rames à chevauchement sur leur support, où ce dernier sera soumis aux intempéries et plus particulièrement à la neige, sauf si le système est complètement fermé. À Moscou, un système de « balayage » de neige a été installé à l'avant du matériel roulant, lui permettant de circuler et donc de rester en exploitation lors de conditions extrêmes. Ce monorail a été conçu pour rester opérationnel dans une amplitude thermique comprise entre -40 °C et +40 C. Il est tout de même nécessaire de préciser qu'il a été décidé d'arrêter cette ligne en 2017

¹⁸ Siemens ne commerciale plus ce système, mais peut fournir le système d'automatisation. Les rames et le système de suspension sont produits par d'autres constructeurs.



notamment en raison de la diminution du nombre d’usagers et de son coût d’exploitation et d’entretien affecté par l’hiver. La ville de Moscou envisage de transformer la voie du monorail en voie verte et aménage une ligne de tramway en parallèle de la ligne de monorail fermée.

À ce jour, il n’est pas connu de système de chauffage prévu pour les supports de monorail à l’instar des équipements existants sur les métros de type « véhicule automatique léger (VAL) » avec plateforme extérieure.

2.4 MÉTRO SOUTERRAIN

2.4.1 Concept général

Le système « métro », à roulement de type « pneu/piste » ou « roue/rail », est un mode de transport à grande capacité et un système de transport rapide de grandes masses de passagers, généralement utilisé dans les zones à forte densité urbaine et démographique.

Le métro est présent sur l'ensemble des continents. Il transporte 51 milliards de personnes par an dans 157 villes¹⁹.

Grâce à de nombreux ouvrages, le système métro se caractérise systématiquement par une infrastructure entièrement dédiée, qu'elle soit en souterrain, à niveau ou en viaduc.

Cette infrastructure, que l'on peut qualifier d'étanche, interdit toute intrusion sur la voie et n'est pas soumise aux aléas de la circulation routière, permettant ainsi au système d'atteindre des capacités très importantes (jusqu'à 40 000 personnes par heure et par direction).

La contrepartie de cet avantage est un coût élevé de génie civil. Les sections souterraines exigent un certain nombre d'équipements permettant de répondre aux normes et règles de sécurité applicables aux tunnels (désenfumage, évacuation incendie, etc.).

Cette caractéristique essentielle (infrastructure étanche) a permis d'envisager la mise en place d'automatismes pour optimiser l'efficacité du système. Les premières expérimentations à la fin des années 60 ont été suivies par un déploiement à plus grande échelle durant les années 70, avec des systèmes de type PA135²⁰ et VAL pour ne citer que ceux-ci.

Aujourd'hui, la grande majorité des nouveaux déploiements se fait avec des niveaux d'automatisation allant de la semi-automatisation (accélération et freinage sont automatisés, mais la fermeture des portes est contrôlé par les conducteurs - GoA2) à l'automatisation complète (exploitation sans conducteur à bord des trains – GoA4).

La technologie (CBTC²¹) est maîtrisée par les principaux acteurs du marché. Elle repose sur une communication bidirectionnelle et continue entre les trains et des calculateurs de sécurité au sol. Les trains se localisent sur la voie, transmettent leur position au sol qui, ayant la connaissance complète de la ligne (c.-à-d. position de tous les trains, position des aiguilles, état des itinéraires, pentes, courbes), transmet à chaque train une cible ainsi que les vitesses maximales. Le train en déduit le profil de vitesse à suivre. Par rapport aux systèmes traditionnels (cantonnement²² fixe, gestion de l'espacement entre les trains par de la signalisation au sol), le CBTC permet de faire du cantonnement mobile et de longueur variable et aux rames d'être plus proches les unes des autres. Il améliore la régularité et la vitesse commerciale grâce, entre autres, aux portes palières²³.

¹⁹ UITP, statistiques établies à novembre 2015

²⁰ Pilotage automatique avec un signal de 135 kHz

²¹ Communications-based train control

²² Cantonnement permet d'assurer qu'il y a un espace suffisant entre les voitures de métro circulant dans le même sens.

²³ Portes automatiques aménagées aux stations le long des quais qui s'ouvrent quand la voiture de métro arrête à la station.

De plus en plus de métros urbains ont tendance à recourir à ce niveau élevé d'automatisation. Entre 2005 et 2013, la longueur totale de ligne équipée en UTO ²⁴ (GoA4) est passée de 300 à 680 km, et 1 800 km sont attendus en 2025. Les systèmes d'automatisation du métro disposent sans conteste d'une maturité et d'un retour d'expérience excellent en termes de performance, de régularité, mais aussi de sécurité.

2.4.2 Le matériel roulant et ses caractéristiques générales

Le métro est un matériel roulant à traction électrique, roulant sur des rails. Il existe cependant quelques spécificités, comme certains Métros de Paris, de Montréal, de Mexico, de Santiago du Chili, etc., qui roulent sur pneumatiques (technologie développée à partir des années 1950 par la société d'exploitation française RATP). Les métros peuvent être entièrement automatisés, c'est-à-dire sans conducteur, comme la ligne 14 à Paris, la ligne D à Lyon, etc.

Il existe de nombreux exemples de métro souterrain dans le monde, dont on peut citer les quatre lignes de métro souterraines de Montréal qui a des voitures avec une capacité moyenne de 160 passagers pouvant circuler à une vitesse maximale de 70-72 km/h. La fréquence en heure de pointe varie entre 2 et 5 minutes selon les lignes.



New York, source : SYSTRA



Paris, source : SYSTRA



Alger, source : SYSTRA

Figure 2-5 : Exemples de métros dans le monde

²⁴ Unattended Train Operation

Le tableau suivant présente les caractéristiques générales du système métro.

Tableau 2-7 : Les caractéristiques générales du métro²⁵

Les caractéristiques générales du métro	
Circulation sur un ouvrage ou une emprise dédiée, sans aucune interaction avec le reste des circulations	
Pente maximale : 4 % - 5 % (fer) et 7 % - 10 % (pneu)	
Rayon de courbure > 200 m	
Conduite manuelle ou automatique	
Distance moyenne entre les stations : 800 m à 1 000 m, voire 2 000 m	
Alimentation électrique : 750V DC ou 1,500V DC – caténaire ou 3 ^e rail	
Fréquence : jusqu'à un métro toutes les 1,5 minute (avec CBTC) par direction	
Capacité : 20 000 à 40 000 passagers par heure par direction	
Vitesse commerciale : 25 à 50 km/h (selon l'interstation)	
Matériel roulant (MR) : de 6 à 12 voitures	
Durée de vie du MR : 40 ans ²⁶	
Coût de MR : 6 à 12 M\$ par rame	
Coût d'investissement : de 100 à 200 M\$/km	
Coût d'exploitation et d'entretien d'une ligne en moyenne : de 11 à 17 \$/veh.km/an	

Exemples des matériels roulants de métro de 3 constructeurs - Spécificités techniques

Les caractéristiques suivantes sont données à titre indicatif et basées sur des modèles des firmes : canadienne « Bombardier », française « Alstom » et finlandaise « Valmet, Strömberg », leaders sur le marché des matériels roulants.

Parmi les modèles, on peut citer en exemple, ceux de :

- « MPL 85 » d'Alstom (modèle de métro automatique ; véhicule multicorps avec 2 voitures),
- « M100 » de Valmet, Strömberg (véhicule multicorps avec 2 voitures),
- « SL C20 » de ABB, Adtranz et Bombardier Transport (véhicule multicorps avec 3 voitures).

²⁵ Sources des caractéristiques générales : base de données SYSTRA (Projets SYSTRA dans le monde & benchmarks) & CEREMA (anciennement CERTU) : Référentiel pour le choix des systèmes de transports collectifs à haut niveau de service; Choisir un mode de transport capacitaire; Quels indicateurs de suivi de l'efficacité des services de transports; Choisir son système de transport au service d'un réseau et d'un projet de territoire.

²⁶ La base pour les calculs comparatifs

Tableau 2-8 : Les caractéristiques du matériel roulant métro

	MPL 85	M100	SL C20
Réseau	Lyon	Helsinki	Stockholm
Longueur (m)	36,1	44,2	46,5
Largeur (m)	2,9	3,2	2,9
Hauteur (m)	3,5	3,7	3,7
Masse à vide (t)	-	32	39 - 41
Écartement (mm) ²⁷	1435	1524	1435
Alimentation (V)	750	750	650 - 750
Vitesse maximale (km/h)	75	80 - 90	70 - 80 - 90
Capacité assise (nbre de passagers)	100	130	126
Capacité totale (nbre de passagers) (niveau de confort : 4 passagers / m ²)	325	430	412

²⁷ Écartement des rails est la distance entre les 2 voies de rail du métro.

3. COMPARAISON PRÉLIMINAIRE DES QUATRE SYSTÈMES DE TRANSPORT LOURD SUR RAIL

La mise en place d'un système de transport lourd sur rail est un élément structurant d'une planification urbaine à long terme pour l'agglomération. Afin d'analyser l'opportunité d'un tel projet et d'appréhender les conditions de sa réussite, il convient d'analyser sa pertinence, non seulement à l'horizon de sa mise en service, mais également à long terme. Dans le contexte québécois, choisir un système de transport revient au premier lieu à trouver le meilleur compromis entre :

- L'insertion et les difficultés de construction,
- La fiabilité des systèmes dans les conditions hivernales de Québec,
- La disponibilité technologique,
- Les coûts des systèmes.

En second lieu, l'adéquation entre l'offre de transport (la capacité du système) et la demande (l'achalandage) à court terme et à long terme est analysée pour les modes sélectionnés à partir de la première analyse afin d'identifier le système le plus approprié à Québec. Cette analyse est présentée dans le Chapitre 4.

3.1 CONTEXTE TERRITORIAL QUÉBÉCOIS

Cette partie décrit les principaux éléments territoriaux du corridor d'insertion des quatre modes de transport sur rail présentés précédemment affectant leur faisabilité qui est analysé par mode dans le chapitre 3.2.

3.1.1 Le corridor d'analyse

Le tracé relie le quartier « Le Gendre » à l'ouest et le quartier « Charlesbourg » à l'est de la Ville de Québec, desservant entre ces deux terminus les pôles générateurs principaux et les quartiers centraux de la ville : le pôle Sainte-Foy, l'Université Laval, la colline Parlementaire, le Vieux-Québec, le pôle Saint-Roch et le quartier Limoilou.



Figure 3-1 : Contexte urbain et architectural du tracé

3.1.2 Le patrimoine

L'agglomération de Québec est reconnue internationalement pour son patrimoine bâti exceptionnel et identitaire. Ce patrimoine constitue l'héritage architectural des derniers siècles ayant façonné le paysage urbain des secteurs historiques de l'agglomération de Québec. Les territoires d'intérêt historique et culturel regroupent également des parcours fondateurs et des trames urbaines développées en fonction du parcellaire d'origine toujours perceptible dans l'environnement urbain actuel²⁸.

La carte ci-contre illustre les territoires d'intérêt historique et culturel bénéficiant d'un statut de protection en vertu de la Loi sur le patrimoine culturel et sous juridiction fédérale située sur le territoire de l'agglomération de Québec (en violet pâle)²⁹.

²⁸ Source : Construction d'un tramway sur le territoire de la Ville de Québec dans le cadre du projet de réseau structurant de transport en commun par la Ville de Québec (3211-08-015)

²⁹ Source : Construction d'un tramway sur le territoire de la Ville de Québec dans le cadre du projet de réseau structurant de transport en commun par la Ville de Québec (3211-08-015)

Le long du tracé existant deux sites patrimoniaux classés impactant l'insertion des 4 systèmes de transport lourds sur rail à savoir :

- Le Vieux-Québec,
- Le Trait-Carré.

La carte ci-dessous localise également les sites patrimoniaux. Les cercles jaunes présentent les aires de protection des bâtiments à valeur patrimoniale.

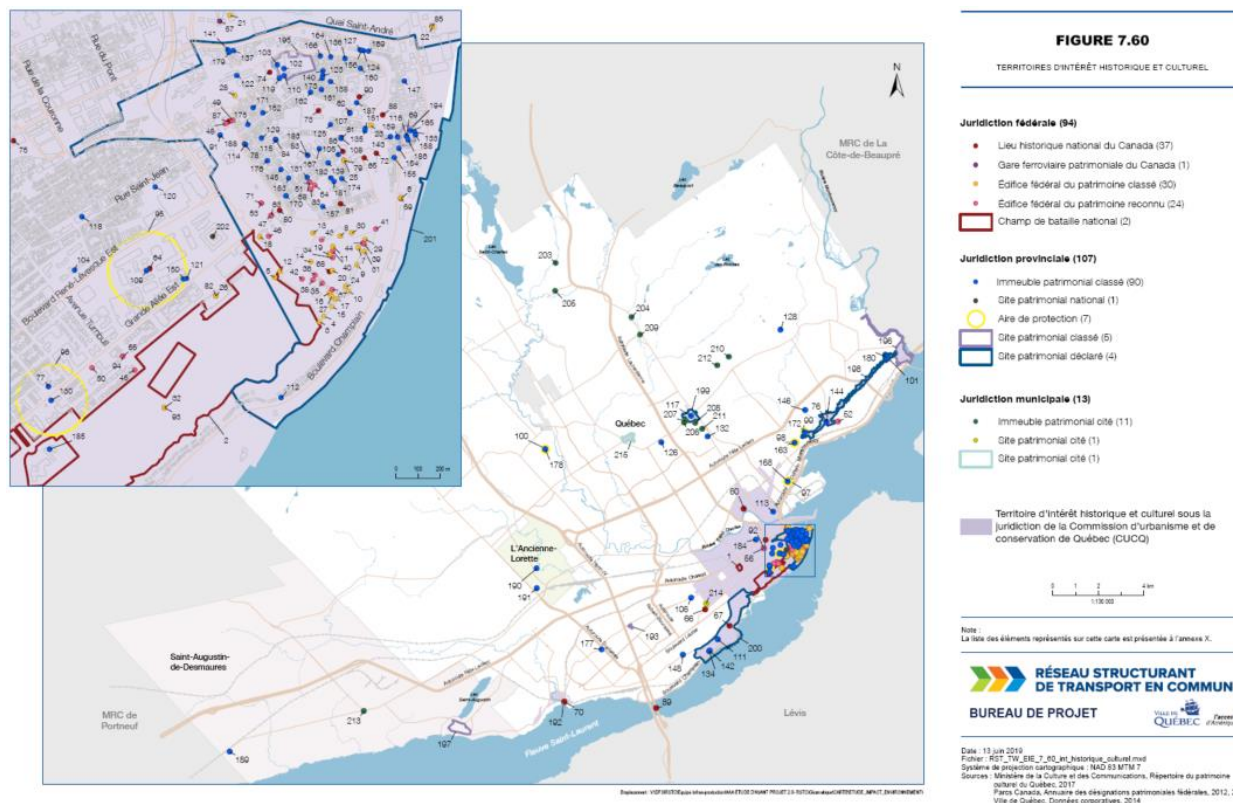


Figure 3-2 : Territoires d'intérêt historique et culturel sous juridiction de la CUCQ (Commission d'urbanisme et de conservation de Québec)

Source : Construction d'un tramway sur le territoire de la Ville de Québec dans le cadre du projet de réseau structurant de transport en commun par la Ville de Québec (3211-08-015)

3.1.3 Le réseau routier

Dans son ensemble, la Ville de Québec possède les caractéristiques urbanistiques d'un plan « hippodamien », dans lequel s'articulent et se croisent les rues rectilignes, formant des îlots carrés et/ou rectangulaires. Cette typologie urbaine engendre de nombreuses intersections et de carrefours, l'un des traits marquants de la ville (typique en Amérique du Nord).

Le tracé de projet de transport en commun (en jaune sur la carte ci-dessous) traverse les autoroutes Duplessis, Henri-IV et Felix-Leclerc, et passe à proximité des autoroutes Laurentienne dans le quartier

Saint-Roch, et Dufferin au centre-ville³⁰. Le tracé emprunte par ailleurs plusieurs artères importantes, mais majoritairement des artères secondaires³¹, le chemin des Quatre Bourgeois, la 1^{ère} Avenue et les boulevards Laurier et René-Levesque.

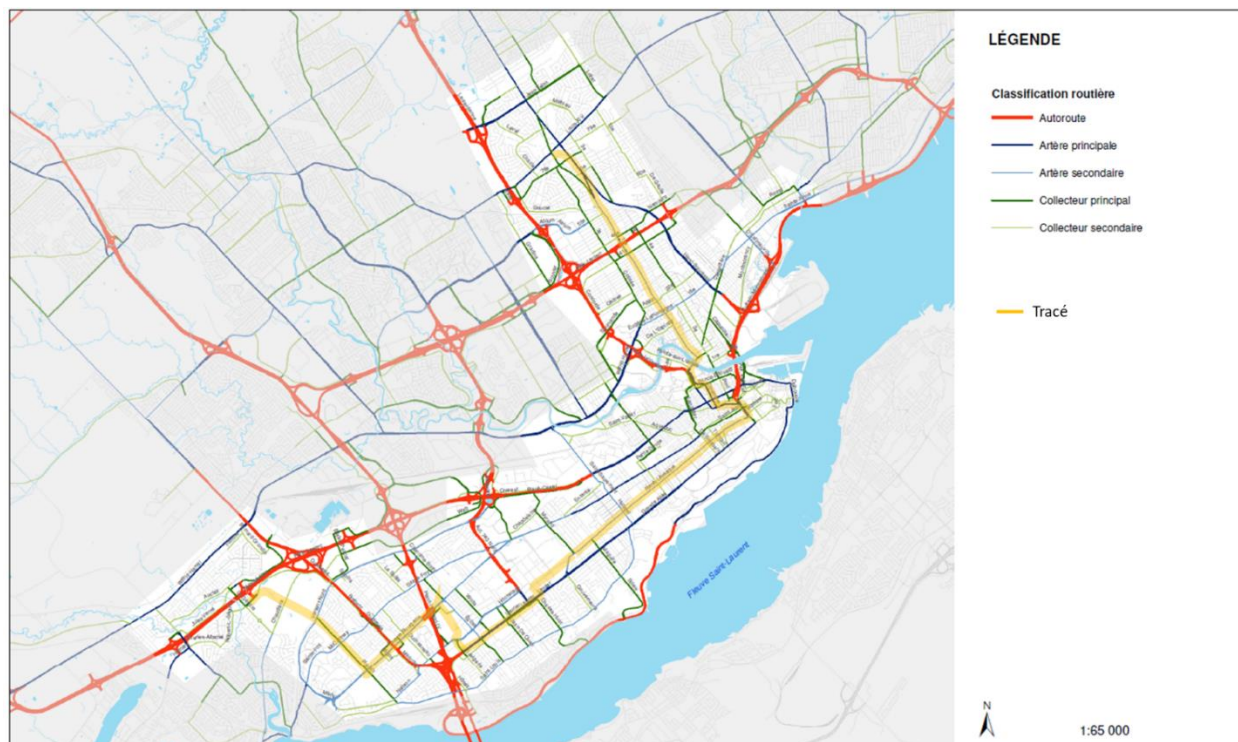


Figure 3-3 : Réseau routier, source : Ville de Québec, Division de l'exploitation et de la mobilité intelligente

3.1.4 Le relief

Le tracé projeté du tramway chevauche la portion nord de la province géologique des Appalaches (principalement entre le fleuve Saint-Laurent et le boulevard Charest) et la portion sud des basses-terres du Saint-Laurent, pour la portion comprise dans l'axe du boulevard Charest et au nord de celui-ci³².

Les dénivellations importantes, entre 7 % et 10 %, sont des contraintes pour l'insertion d'un mode de transport lourd sur rail. Les fortes pentes identifiées près du tracé se situent le long de la Rive-Nord du fleuve Saint-Laurent, ainsi qu'au sud du boulevard Charest, délimitant la haute ville et la basse ville de Québec. Le secteur situé au sud de cette démarcation est caractérisé par une colline ayant une pente variant entre 11 % et 15 %, ainsi que par des rebords d'escarpements rocheux décrivant des lignes, plus

³⁰ Source : Construction d'un tramway sur le territoire de la Ville de Québec dans le cadre du projet de réseau structurant de transport en commun par la Ville de Québec (3211-08-015)

³¹ Les artères secondaires sont utilisées comme voies de transit urbain qui permettent de relier des arrondissements et des zones urbaines où il y a d'importants générateurs. Habituellement 1 à 2 voies de circulation par direction.

³² Source : Construction d'un tramway sur le territoire de la Ville de Québec dans le cadre du projet de réseau structurant de transport en commun par la Ville de Québec (3211-08-015)

ou moins concentriques, autour des sommets. Au nord de cette dénivellation, le relief est relativement plat³³.

La carte ci-dessous présente la dénivellation et les trois points durs (pentes supérieures à 7 %) en matière d'insertion le long du tracé étudié (cercles bleus) :

- Secteur Vieux-Québec et Colline Parlementaire,
- Secteur Saint-Rodrigue et Trait-Carré,
- Secteur Plateau de Sainte-Foy et Pointe-de-Sainte-Foy.

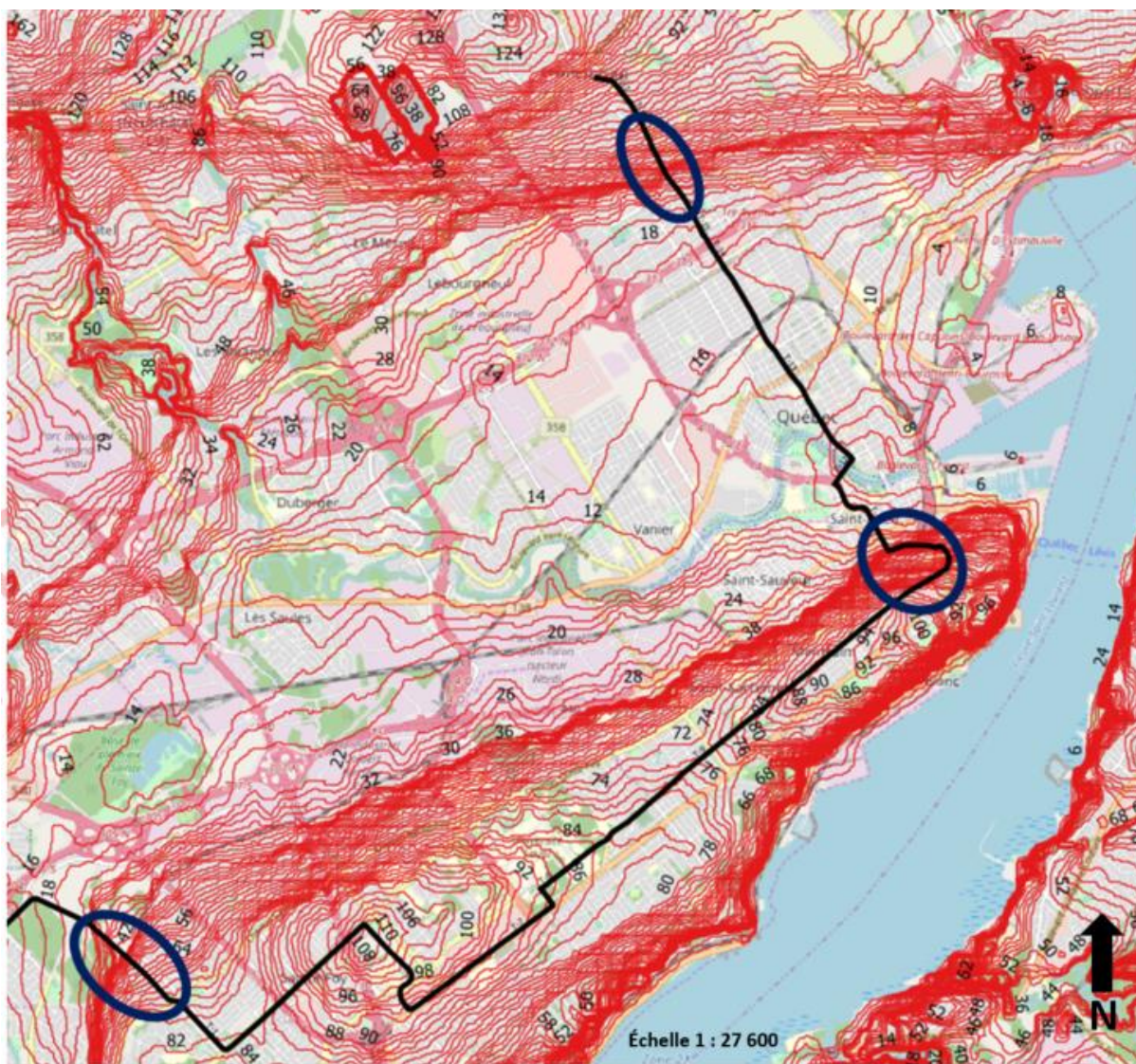


Figure 3-4 : Relief le long du tracé, source : SYSTRA

³³ Source : Construction d'un tramway sur le territoire de la Ville de Québec dans le cadre du projet de réseau structurant de transport en commun par la Ville de Québec (3211-08-015)

3.2 EXIGENCES D'INSERTION ET DIFFICULTÉS DE CONSTRUCTION

Dans cette partie, les principes généraux d'insertion seront d'abord rapidement présentés pour chacun des quatre modes envisageables à Québec. Puis, leur faisabilité d'insertion dans le corridor spécifique de la ville de Québec présenté dans le chapitre 3.1.1 est analysée à partir des éléments présentés aux chapitres 3.1.2, 3.1.3 et 3.1.4.

L'insertion d'un système dans un environnement urbain doit s'intégrer dans une démarche globale visant à favoriser l'usage des modes alternatifs à la voiture particulière (transports collectifs et modes actifs) tout en conservant un niveau d'accessibilité locale automobile acceptable. Cette insertion est toutefois affectée par les limites physiques telles que l'étroitesse des rues, le relief, les barrières naturelles, la nature du sol et les contraintes géotechniques. Son insertion en milieu urbain existant, aux emprises contraintes, doit intégrer l'ensemble de ces éléments.

3.2.1 Tramway

3.2.1.1 Les principes d'insertion généraux

L'insertion du tramway en site propre implique une réorganisation harmonieuse et ordonnée de la voirie, tout en proposant des approches paysagères comme les espaces végétalisés, les coulées vertes, etc., mais également des pistes cyclables, des zones piétonnes, etc. dans sa démarche globale.

La largeur de la plateforme en section en alignement droit, pour une voie double, dépend de la largeur du matériel roulant et de la présence et de la localisation des poteaux support de la LAC (sur la plateforme entre les deux sens de circulation ou sur trottoir, ou ancrage aux façades).

À titre d'exemple, en alignement droit, hors poteaux caténaires, celle-ci est, en voie double de :

- 5,80 mètres pour des véhicules de 2,40 mètres de large (par exemple à Bordeaux en France);
- 6,30 mètres pour des véhicules de 2,65 mètres de large (par exemple à Montpellier en France).

Avec poteau de la LAC central (entre les deux sens de circulation du tramway), ces largeurs sont augmentées au minimum de 40 cm.

En courbe, l'emprise au sol augmente. Celle-ci dépend de l'architecture du matériel roulant (disposition des bogies et des articulations entre caisses). Pour une courbe de rayon de 25 m, elle peut varier entre 6,90 m et 7,70 m pour un véhicule de 2,40 m de large. Le rayon de courbure minimum acceptable est de 25 m pour garantir les performances du système et éviter des risques d'usure prématurée. Toutefois, des rayons inférieurs peuvent être envisagés au cas par cas. Par exemple, à Bordeaux (France), un rayon de 18 m a été proposé sur la ligne B (à l'angle de la rue Vital Carles) pour éviter tout impact bâti. Cette configuration, si elle fonctionne, est toutefois à éviter, car elle implique de fortes contraintes en matière d'exploitation (vitesse faible pour réduire le bruit et les efforts).

Ci-dessous un exemple de l'emprise en courbe et en section courante du Citadis (Alstom) de 2,40 m de large et un exemple de section courante d'un matériel roulant de 2,65 m large

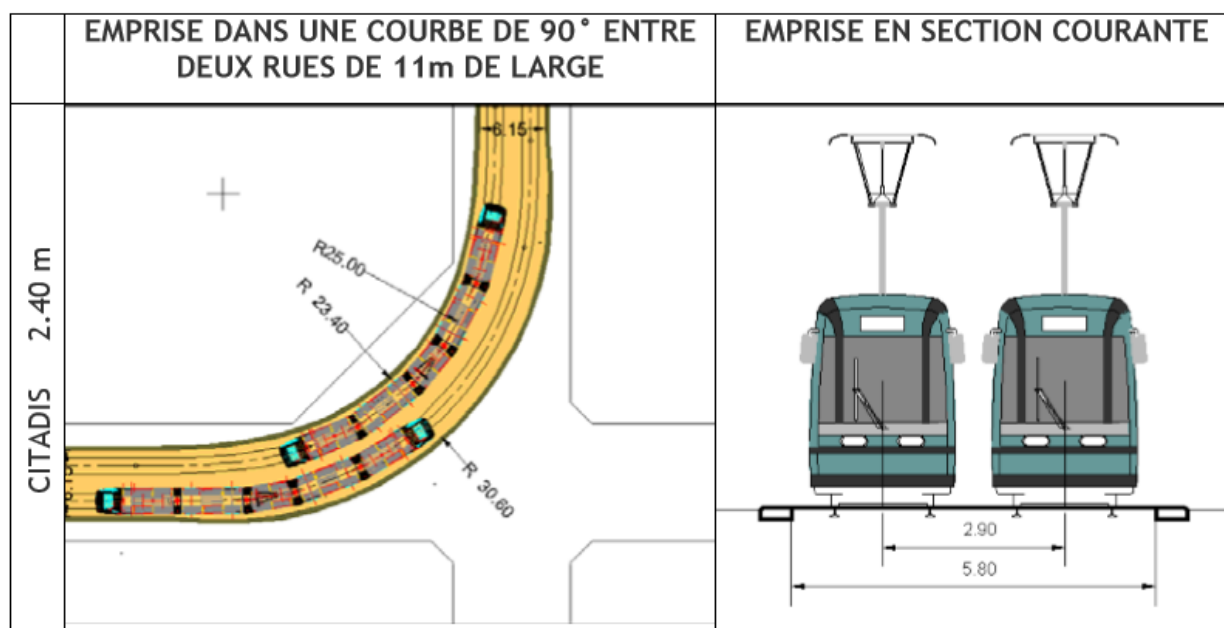


Figure 3-5 : Emprise en courbe et en section courante du Citadis de 2,40 m de large, source : SYSTRA

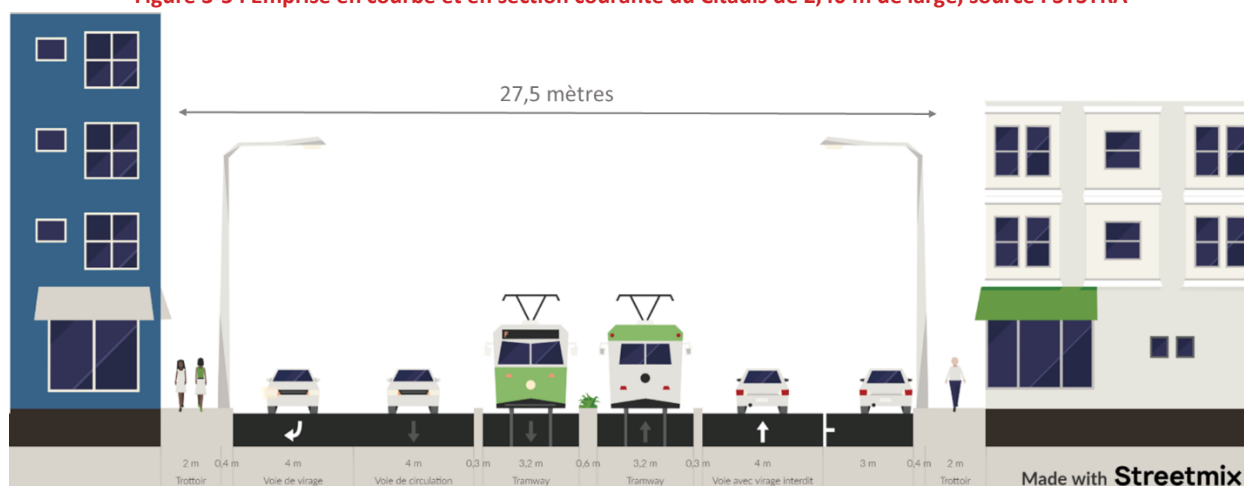


Figure 3-6 : Emprise en courbe et en section courante du matériel roulant de 2,65 m de large, source : SYSTRA

La pente couramment admissible d'un tramway est de 7-8 %. Des solutions techniques sont envisageables pour augmenter légèrement cette valeur (principalement par le remplacement de bogies porteurs par des bogies moteurs). Ceci a un impact sur le coût du matériel.

3.2.1.2 Insertion sur le tracé

Le tramway est un système qui s'intègre bien dans un milieu urbain et qui est très accessible (accès de plain-pied), mais qui nécessite une emprise importante dédiée au sol, ainsi qu'une gestion spécifique des intersections rencontrées sur l'ensemble du tracé pour assurer la sécurité et une bonne performance du

système (l'emprise minimale³⁴ nécessaire pour la plateforme du tramway en section courante est de 7 mètres³⁵, et au niveau des stations, de 15 mètres. Pour rappel, la pente admissible pour le tramway est entre 7 et 8 %).

Le long du tracé du projet de Québec, plusieurs points durs d'insertion sont identifiés pour le tramway (cf. carte ci-dessous) :

- 2 secteurs avec pente supérieure à 7 % (variant entre 8 et 28 %) : le secteur Plateau de Sainte-Foy et Pointe-de-Sainte-Foy à l'ouest, ainsi que le secteur Vieux-Québec et colline Parlementaire à l'est;
- Le tracé traverse un site patrimonial classé et un territoire qui est sous la juridiction de la CUCQ qui entraîne des difficultés d'insertion en particulier au Vieux-Québec et à Haute Ville de Québec;
- 3 secteurs où l'insertion est contrainte ou très contrainte en matière d'emprise. Sur la carte ci-dessous, les points de couleur orange identifient les points durs d'insertion pouvant être résolus sans impact sur le bâti (ne conditionnent pas la faisabilité du tramway). La couleur rouge signifie que pour résoudre les problématiques d'insertion, il faudra le plus probablement réaliser des acquisitions de foncier afin de garantir le bon fonctionnement et l'accessibilité en voiture du secteur. La couleur rouge foncée signifie que l'insertion n'est pas réalisable sans impacter fortement le tissu urbain existant. Il faudra très probablement réaliser des travaux de démolition lourds ou des travaux de structure (ex. : démolition d'un bâtiment, construction d'un pont);
- Nécessité de reprendre 2 ouvrages (pont autoroutier et pont ferroviaire) pour permettre l'insertion du tramway.

³⁴ Ne tient pas en compte la réserve de neige.

³⁵ A ce stade d'étude pré-insertion, une largeur de 7 mètres est considérée

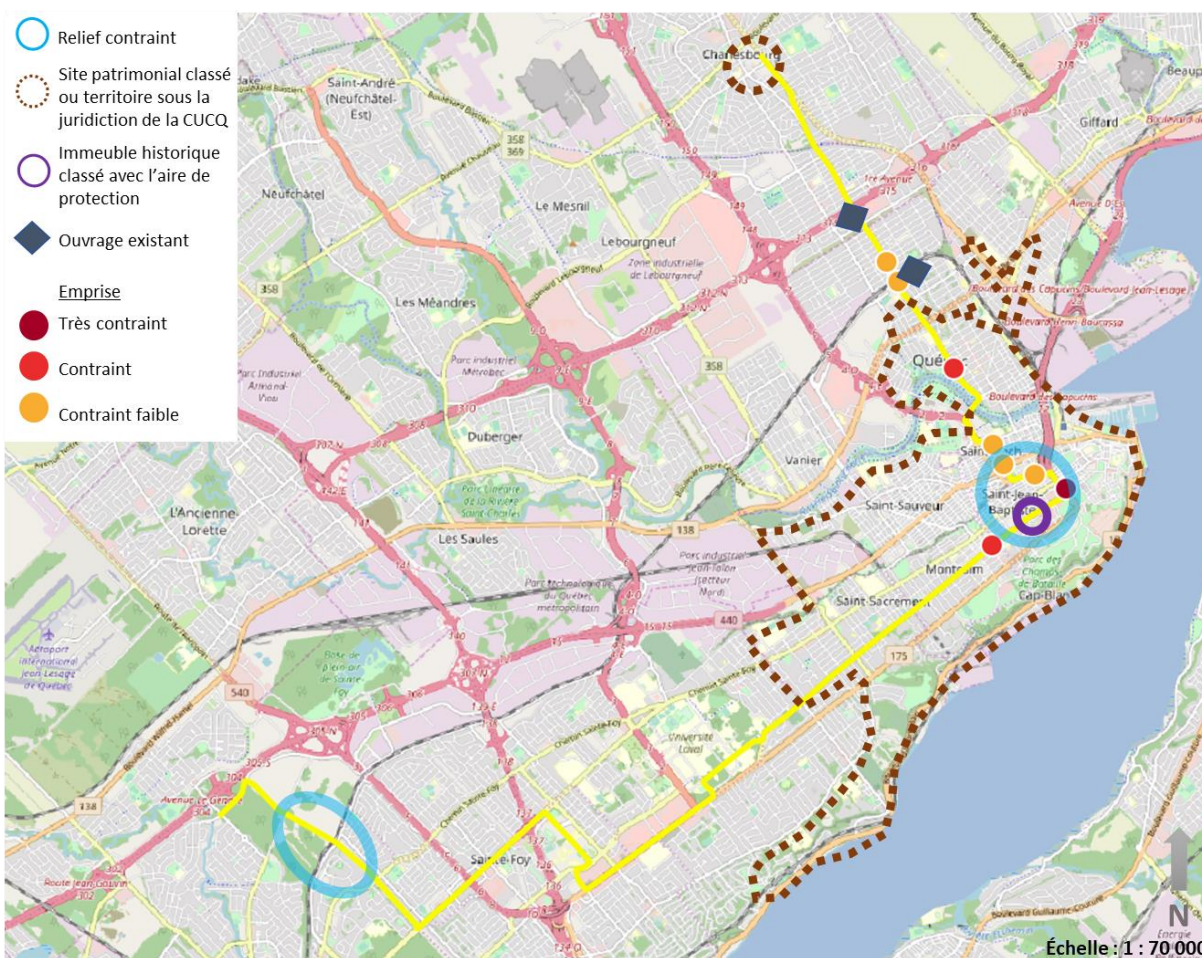


Figure 3-7 : Tramway : les points durs d'insertion, source : SYSTRA

La réalisation d'une ligne de tramway sur une chaussée existante implique de profondes modifications des réseaux aériens et enterrés.

Le tracé prévu traverse des zones de haute densité et des zones historiques. Ainsi, l'insertion du tramway n'est pas faisable sans une réduction du nombre de voies de circulation et/ou de l'offre en stationnement sur voirie ni sans acquisitions foncières.

Par ailleurs, la topographie le long du tracé impose la construction de tunnels pour assurer la faisabilité technique du tramway (contrainte de pente). Cette spécificité entraînera des coûts supplémentaires pour la réalisation d'un tramway.

3.2.2 Train léger sur rail

3.2.2.1 Les principes d'insertion généraux

Les lignes de train léger sur rail s'insèrent dans des emprises entièrement exclusives permettant de garantir la sécurité et la fiabilité de l'exploitation. Il est préférable d'éviter les passages à niveau pour assurer cette bonne fiabilité du système et la sécurité de tous les usagers. La réalisation du train léger sur

rail en double voie (une par sens) est considérée comme optimale, car elle offre une flexibilité opérationnelle maximale (fiabilité des temps de parcours) et la possibilité de fonctionner avec des temps de passage plus courts et des vitesses plus rapides.

Lorsqu'insérée en surface (sans ouvrage), l'infrastructure d'un train léger sur rail est consommatrice d'emprise au sol. Ce système a besoin d'une emprise d'une largeur minimale de 12 mètres en section courante et 21 mètres au niveau des stations. En courbe, l'emprise au sol augmente. Le rayon de courbure minimum acceptable est de 150 mètres. En dessous de ces chiffres, l'insertion n'est pas techniquement réalisable.

La pente couramment admissible d'un train léger sur rail est de 7 % pour du roulement fer. Des solutions techniques sont envisageables pour augmenter légèrement cette valeur.

La coupe d'insertion ci-dessous illustre un exemple d'insertion d'un train léger sur rail dans un espace urbain.

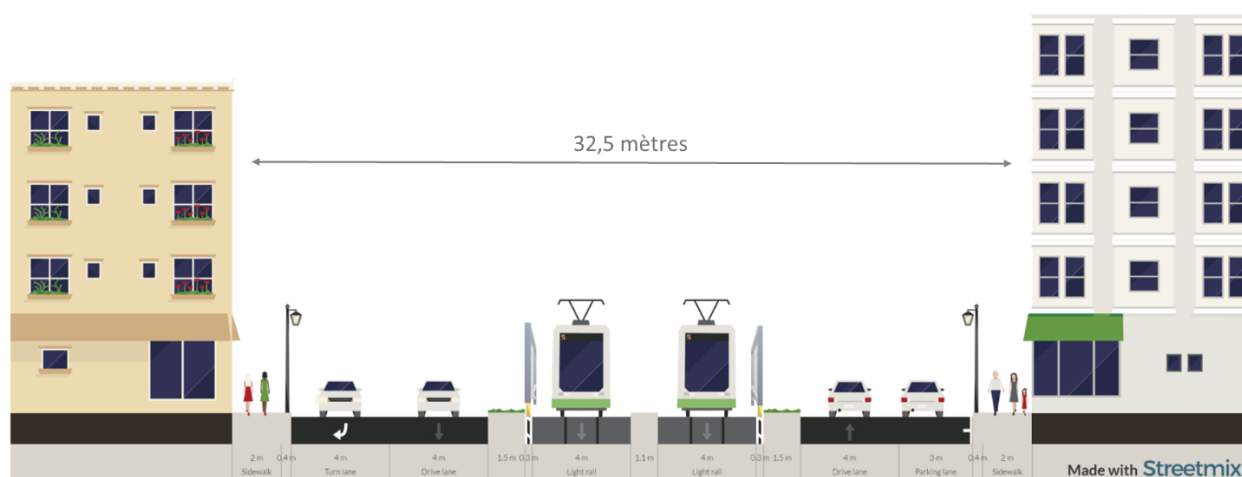


Figure 3-8 : Un exemple de coupe d'insertion du train léger sur rail, source : SYSTRA

3.2.2.2 Insertion sur le tracé

L'emprise minimale³⁶ nécessaire pour train léger sur rail en section courante est de 12 mètres, et au niveau des stations, de 21 mètres. Pour rappel, la pente admissible pour le train léger sur rail est 7 %.

Le long du tracé du projet de Québec, plusieurs points durs d'insertion sont identifiés pour le train léger sur rail (cf. carte ci-dessous) :

- 2 secteurs avec des pentes supérieures à 7 % (variant entre 7,4 % et 28 %) : le secteur Plateau de Sainte-Foy et Pointe-de-Sainte-Foy à l'ouest, le secteur Vieux-Québec et colline Parlementaire à l'est et le secteur Saint-Rodrigue et Trait-Carré au nord;
- Le tracé traverse un site patrimonial classé et un territoire qui est sous la juridiction de la CUCQ qui entraîne des difficultés d'insertion en particulier au Vieux-Québec et à Haute-Ville de Québec;

³⁶ Ne tient pas en compte la réserve de neige.

- 9 secteurs où l'insertion est contrainte ou très contrainte en matière d'emprise. Sur la carte ci-dessous, les points de couleur orange identifient les points durs d'insertion pouvant être résolus sans impact sur le bâti (ne conditionnent pas la faisabilité du train léger sur rail). La couleur rouge signifie que pour résoudre les problématiques d'insertion, il faudra le plus probablement réaliser des acquisitions de foncier afin de garantir le bon fonctionnement et l'accessibilité en voiture du secteur. La couleur rouge foncée signifie que l'insertion n'est pas réalisable sans impacter fortement le tissu urbain existant. Il faudra très probablement réaliser des travaux de démolition lourds ou des travaux de structure;
- Le long du tracé, cinq courbes serrées qui contraignent l'insertion du train léger sur rail ou affectent fortement sa performance (vitesse réduite);
- Nécessité de reprendre 2 ouvrages (pont autoroutier et pont ferroviaire) pour permettre l'insertion du train léger sur rail.

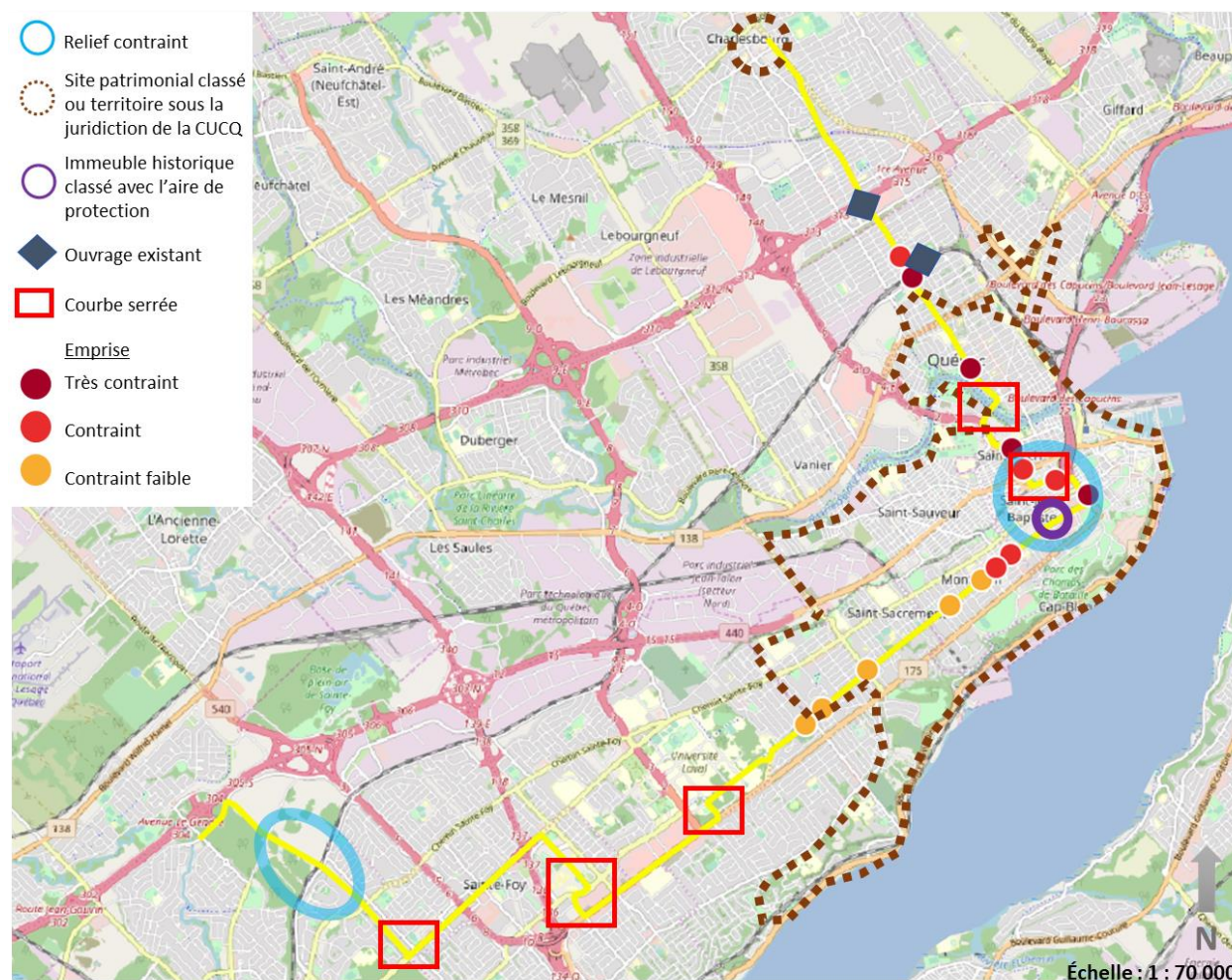


Figure 3-9 : Train léger sur rail : les points durs d'insertion, source : SYSTRA

Le train léger sur rail est un système fiable en site propre exclusif, mais qui nécessite une protection des emprises pour empêcher tout franchissement de la voie. Au niveau des intersections avec des voies routières, cela peut nécessiter la réalisation d'ouvrages pour assurer un franchissement dénivelé de l'infrastructure par la circulation générale (dénivellation supérieure ou inférieure). Ainsi, une gestion importante de la circulation sur l'ensemble du territoire est nécessaire pour assurer un niveau acceptable de perméabilité aux véhicules à moteur et aux modes actifs garantissant une bonne accessibilité riveraine.

Le tracé prévu traverse des zones de haute densité et des zones historiques. Ainsi, l'insertion du train léger sur rail n'est pas faisable sans une réduction du nombre de voies de circulation et/ou de l'offre en stationnement sur voirie et sans acquisitions foncières. De plus, il crée une coupure urbaine en pleine ville et représente un impact visuel fort, plus que tramway.

Par ailleurs, la topographie le long du tracé impose la construction de tunnels pour assurer la faisabilité technique du train léger sur rail (contrainte de pente). Cette spécificité entraînera des coûts supplémentaires pour la réalisation d'un train léger sur rail.

Deux ouvrages (pont autoroutier et ferroviaire) rendent l'insertion du train léger sur rail très contraint en plus des contraintes des girations. Ces points devraient être étudiés davantage pour confirmer la faisabilité. Ceci génère également des coûts supplémentaires.

3.2.3 Monorail

3.2.3.1 Les principes d'insertion généraux

Ce système bénéficie parfois d'une image de modernité et de performance grâce à sa circulation sur un ouvrage dédié en élévation. L'infrastructure d'un monorail est moins consommatrice d'espace qu'un viaduc de métro (gabarit du monorail plus faible). L'emprise en section courante surélevée est au minimum de 7 mètres. Le besoin en foncier au niveau de sol est limité, 3 mètres. Il est ainsi adapté pour des rues étroites. Toutefois, il est important de considérer dans l'insertion une distance minimale sécuritaire entre une infrastructure surélevée et une façade de l'ordre 5 - 6 m. Ci-dessous, un exemple de coupe d'insertion du monorail.

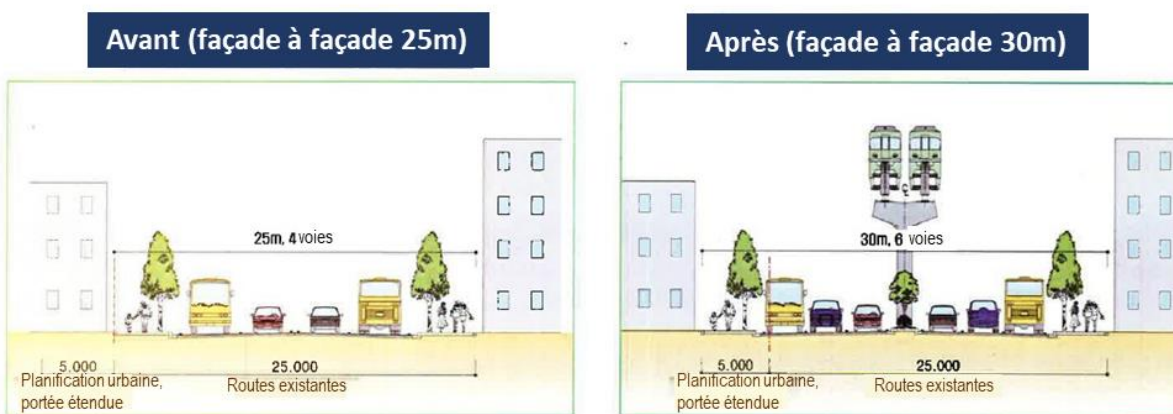


Figure 3-10 : Coupe d'insertion du monorail Daegu (Corée du Sud), source : SYSTRA

Le rayon de courbure minimum acceptable est de 45 mètres. La pente couramment admissible d'un monorail est de 7-10 %.

Concernant les quantités de matériaux, le monorail est particulièrement avantageux par rapport à un système ferré aérien traditionnel. Deux poutres représentent environ 2,5 m³ de béton par mètre linéaire, et nécessitent des piles et fondations plus légères que celles d'un viaduc avec tablier³⁷.

La vitesse commerciale du monorail est un point fort de ce mode, mais qui dépend essentiellement de la géométrie (en particulier courbures) et des distances inter stations. Dans de bonnes conditions, un monorail est aussi performant qu'un train léger sur rail ou un métro.

3.2.3.2 Insertion sur le tracé

L'emprise minimale nécessaire pour un monorail est au sol de 3 mètres, et en surélévation l'emprise minimale est de 17 mètres en section courante (intégrant une distance minimum de 5 mètres entre les façades et l'infrastructure) et 25 mètres au niveau des stations. L'insertion du monorail se fera à priori principalement en axial, étant donnée la contrainte de 5 m – 6 m d'éloignement des façades. Pour rappel, la pente admissible pour le monorail est entre 7 % et 10 %.

Le long du tracé du projet de Québec, plusieurs points durs d'insertion apparaissent (cf. carte ci-dessous):

- 2 secteurs avec des pentes supérieures à 10 % (variant entre 11 % et 28 %) : le secteur Plateau de Sainte-Foy et Pointe-de-Sainte-Foy à l'ouest, ainsi que le secteur Vieux-Québec et colline Parlementaire à l'est;
- Le tracé traverse un site patrimonial classé et un territoire qui est sous la juridiction de la CUCQ qui entraîne des difficultés d'insertion en particulier au Vieux-Québec et à Haute-Ville de Québec;
- 3 secteurs où l'insertion est contrainte ou très contrainte en matière d'emprise ; sur la carte ci-dessous, les points de couleur orange identifient les points durs d'insertion pouvant être résolus sans impact sur le bâti (ne conditionnent pas la faisabilité du monorail). La couleur rouge signifie que pour résoudre les problématiques d'insertion, il faudra le plus probablement réaliser des acquisitions de foncier afin de garantir le bon fonctionnement et l'accessibilité en voiture du secteur. La couleur rouge foncée signifie que l'insertion n'est pas réalisable sans impacter fortement le tissu urbain existant. Il faudra très probablement réaliser des travaux de démolition lourds ou des travaux de structure;
- Nécessité de reprendre 2 ouvrages (pont autoroutier et pont ferroviaire) pour permettre l'insertion du monorail.

³⁷ Cas du métro en viaduc : un tablier à double voie et structure en U se situe autour de 4,3 m³ par mètre linéaire.

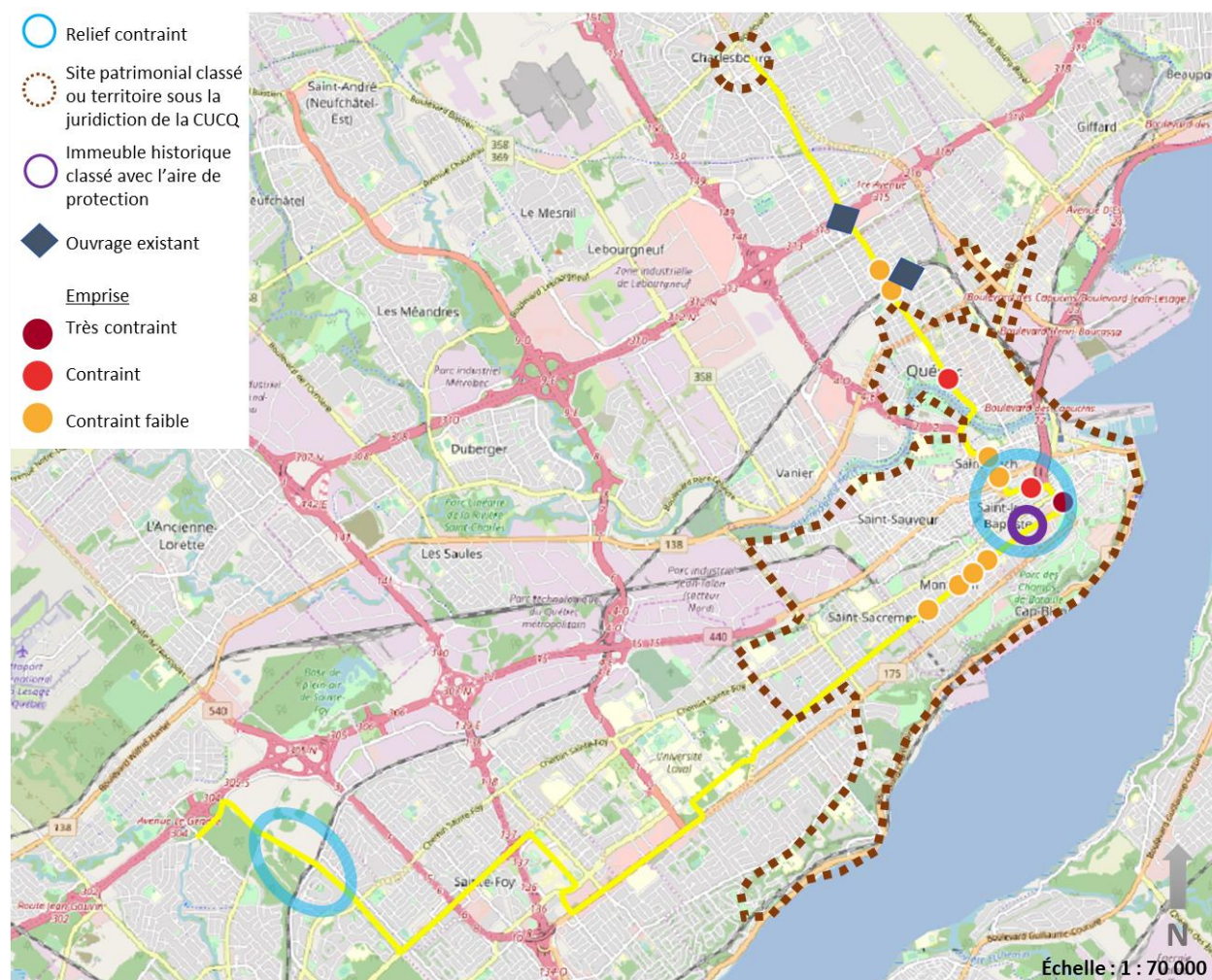


Figure 3-11 : Monorail : les points durs d'insertion, source : SYSTRA

La réalisation d'une ligne de monorail sur une chaussée existante implique de profondes modifications des réseaux aériens et enterrés.

L'insertion du monorail a moins d'impact sur le nombre de voies de circulation et sur le stationnement que le tramway ou le train léger sur rail du fait que l'emprise au sol minimum nécessaire est réduite pour ce mode (3 mètres).

De même que pour le tramway ou le train léger sur rail, la topographie le long du tracé impose la construction de tunnels qui ajoute un coût important du fait de la hauteur du matériel roulant (3m d'équipements de roulement, 3 m de hauteur de cabine). Le franchissement des deux ouvrages semble également très contraint et ce point devrait être étudié davantage pour confirmer la faisabilité. Ceci génère également des coûts supplémentaires.

Enfin, on peut ajouter que la ville de Québec se caractérise par son patrimoine exceptionnel et classé qui s'accommode mal d'une insertion urbaine de type monorail.

3.2.4 Métro souterrain

3.2.4.1 Les principes d'insertion généraux

Pour rappel, le Métro est un « **Transport Collectif en Site Propre** » (TCSP) circulant sur des emprises qui lui sont entièrement dédiées, non franchissables et non accessibles par les autres modes de déplacements. Il est généralement exploité en milieu souterrain. Les cas d'insertion au sol sont rares et constituent, le cas échéant, une coupure physique dans le milieu urbain, la plateforme métro devant impérativement être infranchissable à toute circulation comme un train léger sur rail. Dans cette étude, seule l'option métro souterrain est analysée.

Le métro souterrain est un système fiable et performant. La vitesse commerciale est élevée. Il est conditionné par le rayon de courbure. Pour autoriser la vitesse maximale, il n'est pas conseillé d'aménager des courbes plus serrées que 200-250 m :

- rayon mini ≥ 200 m : la vitesse maxi est alors limitée à 70 km/h,
- rayon mini ≥ 250 m : la vitesse maxi est alors limitée à 80 km/h.

Le type de réalisation d'une ligne de métro souterrain dépend des contraintes géotechniques et urbaines rencontrées. D'autres facteurs tels que le coût de construction influent fortement sur le choix retenu.

Plusieurs types d'ouvrages peuvent être considérés pour l'insertion d'un métro souterrain. Les caractéristiques de ces derniers sont présentées ci-dessous :

TUNNELS PROFONDS (forés)

Le tunnel foré est en général profond et de forme circulaire dotée d'un diamètre externe de 10m pour deux voies.

La profondeur du tunnel permet au tracé d'être indépendant de la voirie (largeur et axe). Ainsi, il est envisageable de passer sous les bâtiments dans la mesure où leurs fondations sont moins profondes que le tunnel.

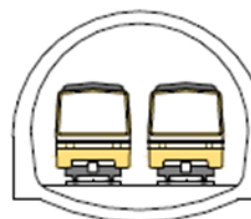
La couverture du tunnel doit être au minimum égale à 1,5 x le diamètre, soit environ 10-15m hors couche superficielle. À proximité des stations cette profondeur peut être ramenée à 1x le diamètre, ce qui place le niveau du rail entre -17 et -23 m par rapport au niveau du sol.



TUNNELS SEMI-PROFONDS (minés)

Il s'agit d'un tunnel voûté d'une largeur d'environ 9,5m (dimensions extérieures) pour deux voies.

Sa couverture est la même que celle d'un tunnel foré. Sa mise en œuvre est envisagée lorsque la longueur du tunnel à creuser est trop courte pour justifier l'utilisation d'un tunnelier (<1000m).



TRANCHÉE COUVERTE

La tranchée couverte permet d'avoir des tunnels une faible profondeur. Et par conséquent une implantation des stations possible sur un seul niveau avec des quais moins profondes (et plus faciles à évacuer).

Cette solution exige que le tracé soit aligné à la voirie (au même titre que dans les cas d'insertion au sol ou en viaduc). Cela implique également un travail important de déviation des réseaux.

La profondeur du rail est dans ces cas-là d'environ 7m.

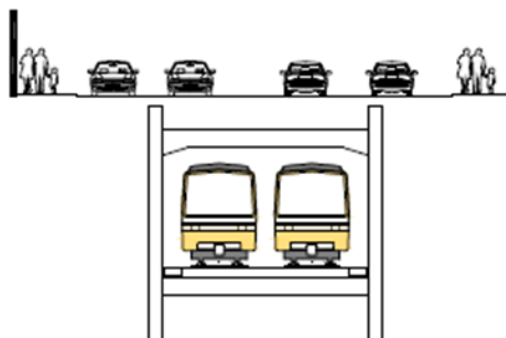


Figure 3-12 : Exemples de l'insertion d'un système de métro souterrain, source : SYSTRA

Le tunnel profond est le plus adapté dans les cas suivants :

- Villes très peuplées et très denses,
- Là où les voiries sont très étroites,
- Lorsqu'il faut traverser des constructions,
- Lorsqu'il faut passer sous les lignes existantes,
- Lorsqu'il faut franchir un obstacle naturel (fleuve, colline).

Le tunnel semi-profond est le plus adapté dans les cas suivants :

- Villes très peuplées et très denses,
- Là où les voiries sont très étroites.

La tranchée couverte est le plus adaptée dans les cas suivants :

- Lorsque le tracé se superpose à de larges artères,
- Lorsque la construction peut être envisagée depuis la surface.

Le choix du procédé d'exécution d'un tunnel profond, semi-profond ou en tranchée couverte est influencé par :

- L'existence dans le voisinage d'ouvrages de construction souterraine ou en superstructure;
- Les propriétés des sols. À cet égard, il faut considérer que même si les conditions du terrain sont peu favorables, les techniques modernes de recompression, de consolidation et d'étanchement des terrains peuvent permettre de construire un tunnel à l'avancement, sans créer de désordres notables dans les constructions existantes;
- La présence de réseaux enterrés de toute nature (gaz, électricité, etc.). Les déviations trop nombreuses de canalisations grèvent l'économie d'une solution par rapport à l'autre;
- Le trafic de surface au cours des travaux (piétons, véhicules automobiles) et la nécessité de maintenir les accès aux immeubles riverains (industries, commerces, résidences), la gêne étant d'autant plus grande que la voirie est plus étroite. Ces contraintes obligent souvent à avoir recours à la méthode de l'exécution en tranchée couverte, ou à la réalisation à l'abri d'un platelage provisoire permettant le maintien de la circulation;
- Les projets de constructions nouvelles qui peuvent avoir une incidence sur la conception et les conditions d'exécution des souterrains.

Le projet du métro doit également prendre en considération un certain nombre de paramètres quant à son organisation fonctionnelle, à savoir :

- L'accessibilité aux quais en partie souterraine pour les personnes à mobilité réduite;
- Les dispositifs d'évacuation en cas d'incendie et les systèmes de désenfumage et pompage;
- La disponibilité d'emprises en surface pour les urgences des stations : le domaine public ou privé.

3.2.4.2 Insertion sur le tracé

L'insertion du métro souterrain (solution la plus coûteuse) n'a que peu d'impact sur la surface en dehors des puits d'aération et d'évacuation des fumées et des stations qui nécessitent des emprises et réserves foncières.

Pour le métro souterrain, de nombreux facteurs tels que le type et la nature du sol, la stabilité de celui-ci, la profondeur de la réalisation, l'encombrement urbain de surface et souterrain, etc. déterminent la méthode qui va être employée pour sa construction. Outre les caractéristiques hydrologique et géotechnique, l'encombrement du sous-sol (réseau urbain, égouts, stationnements, fondations d'immeubles) est un paramètre dimensionnant qui va influencer fortement la méthode de construction et les coûts. Souvent, il n'est pas possible d'envisager une même méthode pour la construction d'une ligne entière (rares sont les terrains urbains avec des structures hydrologique et géologique constantes).

Si le coût de la construction d'un tunnel (profond, semi-profond, tranchée couverte) est mis de côté, il est considéré que le critère d'insertion n'est pas éliminatoire pour le choix du métro souterrain. **Cependant, à ce stade, les informations disponibles sur la nature des terrains traversés et leur comportement lors de travaux ne permettent pas de garantir la faisabilité technique d'un tunnel sur l'intégralité du tracé.**

3.2.5 Synthèse de l'insertion des quatre systèmes

Le tableau ci-après présente de manière synthétique les enjeux liés à l'insertion des systèmes de transport lourds sur rail exposés précédemment. La couleur verte signifie que l'enjeu est faible en termes d'insertion, c'est-à-dire qu'il ne présente pas de contrainte spécifique, la couleur jaune signifie que cet élément est neutre, la couleur orange signifie que l'enjeu est fort, et la couleur rouge signifie que l'enjeu est très fort, c'est-à-dire que les contraintes sont très importantes.

	Tramway	Train Léger sur Rail	Monorail	Métro souterrain
Largeur minimale recommandée	7 m sur la section courante 15 m au niveau des stations	12 m sur la section courante 21 m au niveau des stations	17 m – 18 m (intégrant une distance minimum sécuritaire entre l'infrastructure et les façades) sur la section courante 25 m – 26 m (intégrant une distance minimum sécuritaire) au niveau des stations	9-10 m sur la section courante 18-19 m au niveau des stations
Pente	< 7 – 8 %	< 7 %	< 7 – 10 %	< 7-10 %
Rayon de courbure	> 25 m	> 150 m	> 45 m	> 200 m - 250 m (une courbe en souterrain est moins contrainte qu'en surface)
Conditions d'insertion dans l'espace urbain	- Site dédié, site banalisé - Nécessite une gestion de la circulation le long du tracé	- Site propre exclusif, intégralement séparé du trafic de surface - Nécessite une gestion importante de la circulation et l'accessibilité des modes actifs sur l'ensemble du territoire	- Site propre exclusif (surélevé) - Pas de conflit avec d'autres modes de transport	- Site propre exclusif (souterrain) - Pas de conflit avec d'autres modes de transport
Points durs	Plusieurs points durs : pentes fortes, emprise restreinte, franchissement des ouvrages et sites patrimoniaux	Plusieurs points durs : pentes fortes, emprise restreinte, franchissement des ouvrages et sites patrimoniaux	Plusieurs points durs : pentes fortes, emprise restreinte, franchissement des ouvrages et sites patrimoniaux	Information insuffisante pour déterminer les points durs

3.3 FIABILITÉ DES SYSTÈMES

Les performances de tout système résident également dans sa fiabilité et sa régularité. Un moyen de transport collectif doit avoir des passages réguliers et respecter les horaires préétablis. La **fiabilité** (ensemble des performances techniques du système de transport dans son milieu) et la **régularité** (ponctualité et fréquence des dessertes entre stations) désignent la capacité globale d'un système de transport collectif à offrir une qualité de service et à permettre aux usagers d'organiser leurs activités au quotidien.

Le choix d'un système de transport est conditionné par le contexte climatique, dans un objectif de performance en termes d'exploitation et d'entretien des voies ou infrastructures. En effet, la province du Québec et sa capitale sont soumises à des hivers rigoureux avec des températures moyennes oscillant entre -10 et -20 C°. Ponctuellement, cette température peut atteindre les -30 C° ou au-delà. Cette période hivernale s'accompagne de chutes de neige abondantes, avec un cumul annuel s'établissant à 400 cm certaines années. Cela a naturellement un impact sur la fiabilité des systèmes en surface.

Notons que nombre de villes exposées à des conditions climatiques hivernales extrêmes (pensons à l'Europe du Nord et Europe orientale) maintiennent l'exploitation de leur tramway en périodes prolongées de chute de neige et de gel. Des engins dédiés de déneigement (véhicule sur rail alimenté par la LAC et munis de lames chasse-neige) circulent hors période d'exploitation et évitent l'accumulation de neige sur la plateforme tout en évitant la formation de glace sur le fil de contact. Ces opérations nécessitent une logistique coordonnée avec l'entretien de la voirie afin d'évacuer la neige des voies routières où les lames l'auront repoussée, mais les arrêts d'exploitation sont très rares et réduits au minimum par des exploitants rompus à ces aléas.

Les systèmes de monorail surélevés sont assujettis à des perturbations lors des tempêtes de neige et en cas de froid. Le risque est cependant plus faible pour les systèmes suspendus.

La Ville de Québec et le RTC consacrent une part importante de leur budget pour assurer la circulation et le fonctionnement continu des transports en commun routiers. Le RTC verra probablement ses coûts d'entretien augmenter pendant l'hiver³⁸ par rapport aux mois d'été pour assurer la fiabilité des systèmes en surface.

Les points forts et les points faibles en termes de fiabilité pour chaque mode sont identifiés ci-dessous en plus d'impact de l'hiver :

○ Tramway :

- une certaine régularité, sous réserve d'un site propre intégral et de priorité aux carrefours. Le caractère « ouvert » de la plateforme tramway fait qu'il reste toujours soumis aux aléas de la voirie et de la vie urbaine;
- des embouteillages pouvant impacter la régularité du système au niveau des intersections;
- vitesse commerciale inférieure par rapport aux autres modes.

³⁸ En raison du déneigement, de l'augmentation de la fréquence de nettoyage des rames, du chauffage des centres d'entretien, ceci nécessite ainsi du personnel supplémentaire par rapport à l'été.

- Train léger sur rail :
 - vitesse d'exploitation 2 fois plus élevée que le tramway;
 - très bonne régularité et fiabilité.
- Monorail :
 - vitesse d'exploitation 2 fois plus élevée que le tramway.
- Métro souterrain
 - vitesse d'exploitation 2 fois plus élevée que le tramway;
 - régularité³⁹ et fiabilité optimales.

Le métro souterrain est le mode qui offre la meilleure régularité et fiabilité de ces quatre modes. Le train léger qui a également une bonne fiabilité peut toutefois souffrir de certaines irrégularités en hiver, tout comme le tramway. Cependant, ces irrégularités peuvent être évitées pour ces deux modes par les mesures appropriées énumérées aux chapitres 2.1 et 2.2. Il y a trop peu d'exemples de monorail en exploitation dans des territoires avec des hivers similaires à ceux de Québec. Il est possible que le monorail subisse régulièrement des irrégularités pendant l'hiver, comme le montre l'exemple de Moscou (chapitre 2.3).

³⁹ Pour un métro automatique et sans conducteur, la disponibilité du système est de 99,99 %, à comparer avec des taux de 96-98 % pour des métros avec conducteur.

3.4 DISPONIBILITÉ TECHNOLOGIQUE

Par la disponibilité technologique, il faut entendre un système pouvant être proposé par plusieurs constructeurs.

Le développement important de gammes de tramways, métro souterrain et train léger sur rail par les nombreux constructeurs (chapitre 2), et leurs stades de maturité respectifs, présente des risques considérablement limités pour ces types de matériel roulant. Plusieurs technologies de pose de voies sont désormais disponibles et bien maîtrisées pour le tramway et le train léger sur rail tout comme les technologies tunneliers pour le système métro. Les multiples constructeurs proposant une offre dans le monde permettent de créer un contexte concurrentiel pour le marché de matériel roulant de ces trois systèmes.

Par rapport au tramway, au train léger sur rail et au métro souterrain, le monorail est sans doute le plus fragile en termes de concurrence technologique, car il s'agit d'une technologie propriétaire même s'il est assez répandu à travers le monde. Les deux principaux industriels (chapitre 2) concernés ne fabriquent pas de matériels compatibles avec le système concurrent. Ainsi, une ville équipée d'un monorail Hitachi ne pourra pas décider d'acheter un matériel Bombardier pour le renouvellement de son parc, car cela présupposerait d'importantes adaptations de l'infrastructure de la ligne en place, laquelle ne serait alors plus compatible avec le parc d'origine. Aussi, le monorail revêt-il un certain risque technologique, car si l'un des constructeurs décidait de mettre fin à son activité sur le secteur, l'ensemble des villes dotées de ce type de technologie se retrouveraient sans solution pour se procurer de nouveaux matériels roulants.

Tramway, train léger sur rail et métro souterrain bénéficient d'un contexte concurrentiel élargi à la différence du monorail qui repose sur un nombre limité de constructeurs dotés de systèmes non compatibles et est ainsi assujéti à une menace pour la maintenabilité / durabilité à long terme.

3.5 COÛTS DES SYSTÈMES

Les **coûts des systèmes** se composent des coûts d'investissement, de renouvellement, d'exploitation et d'entretien. Les coûts de renouvellement doivent intégrer autant le renouvellement de l'infrastructure et des systèmes que les matériels roulants.

On constate communément que la part de l'infrastructure (y compris la voie) dans le coût des projets de transport varie de 50 à 60 %, le matériel roulant comptant pour 15 à 25 %, la part restante étant dédiée aux systèmes.

Ainsi, un projet souterrain profond comme peut l'être un métro devant franchir un obstacle naturel (ex : colline) sera confronté à l'incertitude sur la nature des sols qui n'est pas connue au préalable et qui se précise à l'avancement des études. Cette incertitude sera levée après une campagne de sondages géologiques, laquelle permettra d'opter pour une technique de creusement. Ces éléments d'incertitudes conduisent à une fourchette d'estimation allant du simple au double, mais qui ne peut être réduite et affinée qu'après une étude d'avant-projet détaillée.

Les projets de tramways sont exposés à d'autres causes de surcoûts qui appartiennent tant au domaine technique que de l'aménagement de la ville. Techniquement, le tramway demande une préparation de sa plateforme, essentiellement des déviations de réseaux occupant le sous-sol peu profond, voire l'enterrement de réseaux aériens. Ajoutant à ces éventualités la nécessité de travaux préliminaires de voirie afin de permettre l'accès au chantier tout en maintenant au mieux les circulations de surface, l'incertitude sur le coût prévisionnel du projet ne peut que croître.

Un projet de tramway porte généralement une autre dimension que celle strictement définie par le besoin de mobilité : il est l'opportunité d'une requalification urbaine plus ou moins conséquente. A minima, les travaux d'insertion de la plateforme se limiteront au gabarit libre d'obstacle, en quel cas les réseaux seront déviés à la juste lisière extérieure de ce gabarit, voire insérés sous le gabarit. Pour autant, l'ambition d'embellir la ville et de rééquilibrer les espaces publics entre ses utilisateurs peut conduire à une réfection du corridor de tramway de façade à façade, incluant le remplacement des revêtements de chaussée et de trottoir, du mobilier urbain, de la végétation. C'est ainsi que la fourchette d'incertitude sur le coût d'un projet de tramway peut aisément varier du simple au double qui se précise en fonction de l'avancement de la conception. Citons l'exemple du projet T3 Sud de Paris dont le coût kilométrique fut pudiquement éludé des affichages officiels après qu'il eut suscité questionnements et critiques de la part des opposants qui n'avaient pourtant pas de projet alternatif viable. Ce projet a offert l'opportunité de rénover une emprise de parfois plus de 40 m de façade à façade et son coût sort largement de la fourchette indiquée ci-après.

En contrepartie, là où circulaient des bus articulés en site propre, mais sans synchronisation avec les feux de carrefour, et transportant 40 000 personnes par jour, le tramway qui les a remplacés transportait plus de 170 000 personnes par jour quelques années après sa mise en exploitation.

On peut légitimement rechercher d'autres facteurs d'attractivité que le simple report modal dans ce succès et penser qu'ils sont en partie portés par la valorisation qualitative du transport dans un environnement amélioré.

Ces réflexions conduites sur le cas du monorail nécessitent un rappel de l'origine du concept de ce mode. Les promoteurs de cette solution sont partis du constat évoqué précédemment de la distribution des coûts entre les composantes d'un projet de transport ; ils ont pris le parti de s'attaquer à la part la plus importante selon un raisonnement classique d'ingénieurs : réduire le coût du génie civil ! Pour ce faire, ils ont choisi l'infrastructure supposée la moins coûteuse, un viaduc, à laquelle ils ont appliqués des procédés d'optimisation. Ainsi, le viaduc réduit à des poutres simples, préfabriquées en forme de T inversé (laquelle forme est naturellement un optimal en termes de résistance des matériaux) a-t-il dicté la nature du matériel roulant apte à y circuler. Le roulement pneu permettant de faire l'économie d'une voie ferrée sujette à l'usure et exigeante en termes de nivellement, l'organe a ainsi créé la fonction, mais au prix de systèmes exclusifs (incompatibilité entre les fabrications), à la flexibilité d'exploitation faible (nombre réduit d'appareils permettant les changements de voie) et faisant l'impasse sur les critères d'insertion d'un viaduc dans une ville. Les coûts annoncés pour ce mode de transport sont alors peu significatifs en raison du très faible nombre de réalisation en milieu urbain.

Le critère coût est un des critères les plus importants dans le choix du système de transport. Il ne doit pas être disproportionné par rapport au service rendu à la collectivité (achalandage), et doit être compatible avec les capacités de financement du projet.

Le tableau ci-dessous récapitule les coûts d'investissement des quatre modes étudiés. La couleur verte signifie que le coût d'investissement ou coût d'entretien / d'exploitation est le moins élevé, la couleur jaune signifie que le coût d'investissement ou coût d'entretien / d'exploitation n'est pas le plus élevé ni le moins élevé et la couleur rouge signifie que le coût d'investissement ou coût d'entretien / d'exploitation est le plus élevé.

Tableau 3-1 : Récapitulatif des coûts d'investissements et coûts d'exploitation ⁴⁰

	Tramway	Train Léger sur Rail	Monorail	Métro souterrain
Coût d'investissement	de 25 à 45 M\$/km	de 45 à 65 M\$/km	de 45 à 70 M\$/km	de 100 à 200 M\$/km
Coût d'exploitation	de 10 à 15 \$/veh.km	de 15 à 24 \$/veh.km	de 6 à 16 \$/veh.km	de 11 à 17 \$/veh.km

Les coûts d'investissement comprennent les coûts moyens des systèmes incluant les coûts de la plateforme, des voies, des courants faibles, du Poste de Commande Centralisé (PCC), de l'alimentation en énergie de traction et de la signalisation. Le monorail inclut naturellement le coût d'un viaduc et le métro souterrain le coût du tunnel, car sans ceux-ci les deux modes ne seraient pas réalisables. Les coûts d'investissements comprennent, également les coûts moyens qui sont spécifiques à chaque projet et qui varient selon le contexte : études, maîtrise d'ouvrage, acquisition foncière et libération d'emprises, déviation de réseaux, travaux préparatoires, voirie hors site propre, espaces publics, équipements urbains,

⁴⁰ Sources: base de données SYSTRA (Projets SYSTRA dans le monde & benchmarks) & CEREMA (anciennement CERTU) : Référentiel pour le choix des systèmes de transports collectifs à haut niveau de service; Choisir un mode de transport capacitaire; Quels indicateurs de suivi de l'efficience des services de transports; Choisir son système de transport au service d'un réseau et d'un projet de territoire.

opérations induites et aléas. Même si les fourchettes de prix présentés peuvent apparaître relativement larges et dispersés compte tenu du nombre de paramètres influençant le coût de tels ouvrages, il convient de noter que ces chiffres pourtant excluent toutes les valeurs extrêmes, à savoir les valeurs hautes et basses.

Les coûts d'exploitation comprennent les coûts moyens d'opérations d'entretien et d'exploitation des équipements et des infrastructures de transport d'une ligne en moyenne. Les coûts supplémentaires causés par l'hiver ne sont pas inclus dans ces coûts. Les coûts supplémentaires occasionnés par l'hiver ne sont pas inclus dans ces coûts d'exploitation. Ceux-ci peuvent doubler pendant la saison d'hivernale pour les modes en surface.

L'image ci-dessous illustre le lien entre le coût du système et le budget du projet pour les quatre modes analysés. C'est-à-dire, combien de kilomètres linéaires il est possible de construire avec 2,2 G\$ à Québec. Pour chacun des modes, la complexité de construction et insertion (acquisitions foncières, déviation des réseaux, ouvrages d'art, ouvrages souterrains) est considérée égale au mode tramway du projet RSTC. Les portions grisées représentent la portion du coût du tunnel (3,5 km) du coût total de l'investissement.

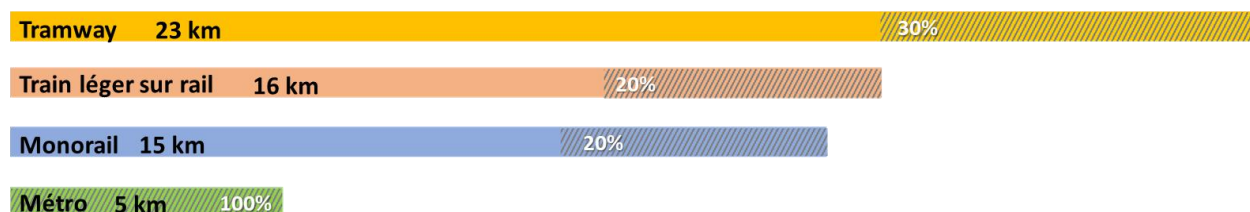


Figure 3-13 : Kilomètres linéaires constructibles de 4 modes de transport lourd sur rail pour un même montant d'investissement, source : SYSTRA

Le métro souterrain est considérablement plus cher que les trois autres systèmes. Il est possible de construire avec le même montant d'investissement (2,2 G\$) près de 5 fois plus de kilomètres de tramway que de métro souterrain, et 35 % plus de kilomètres de tramway que de monorail ou de train léger sur rail.

3.6 SYSTÈMES RETENUS À LA SUITE DE LA COMPARAISON PRÉLIMINAIRE DES MODES DE TRANSPORT LOURDS SUR RAIL

Les critères permettant de choisir un système de transport en commun sont nombreux. Ils dépendent du contexte social, économique, politique de la ville, des objectifs de la mobilité et des objectifs propres à la conception d'un projet de transport.

Le métro souterrain peut apporter le meilleur service en ce qui concerne les fréquences, la vitesse et la régularité. À l'inverse, la performance du tramway est conditionnée par le degré d'ouverture de la plateforme (site propre exclusif, infranchissable ou non, site partagé ou banalisé avec d'autres circulations) et les conditions de priorité au niveau des franchissements de carrefour (priorité aux feux). Le train léger sur rail crée une barrière dans la ville et nécessite des mesures importantes de gestion de la circulation et de franchissement du site propre exclusif. Le monorail est le mode le moins adapté aux conditions climatiques de Québec, ce qu'a montré l'exemple de Moscou.

L'accessibilité pour l'usager est meilleure pour les modes tramway et train léger sur rail et moindre pour les modes métro et monorail du fait qu'ils sont surélevés ou souterrains. Pour ces derniers, il est nécessaire d'installer des équipements spécifiques pour accéder aux quais (ascenseurs, escalier mécanique, escaliers, etc.)

Les nuisances pendant la phase de construction peuvent être moindres pour le métro souterrain selon le type de tunnel (profond ou semi-profond), car il n'est pas nécessaire de fermer autant de voies de circulations le long du tracé que lors de la construction d'un train léger sur rail ou d'un tramway. Les nuisances lors des travaux du monorail sont également moindres par rapport au train léger sur rail ou tramway, en raison de l'installation relativement rapide des piles. Cependant, le monorail repose sur un nombre limité de constructeurs et est assujéti à une menace pour la durabilité à long terme.

Le tableau ci-dessous résume la comparaison des 4 modes selon l'analyse présentée antérieurement. La couleur verte = très favorable, la couleur jaune = moyen, la couleur orange = faible et la couleur rouge = défavorable.

Tableau 3-2 : Comparaison des 4 modes selon analyse antérieure

	Tramway	Train Léger sur Rail	Monorail	Métro souterrain
Conditions d'insertion	+	---	-	+++
Fiabilité des systèmes dans des conditions hivernales	+	+	---	+++
Disponibilité technologique	+++	+++	---	+++
Coûts	+++	---	+	---
	↓ SYSTÈME RETENU	↓ SYSTÈME NON RETENU	↓ SYSTÈME NON RETENU	↓ SYSTÈME RETENU

Compte tenu des résultats d'analyse des quatre modes basés sur l'insertion et effort de construction, la fiabilité des systèmes, la disponibilité technologique et les coûts, on peut conclure que le tramway et le métro souterrain sont les deux modes les plus adaptés au contexte de la ville de Québec. La section suivante se propose de comparer plus précisément ces deux modes l'un par rapport à l'autre.

4. COMPARAISON DES SYSTÈMES TRAMWAY ET MÉTRO SOUTERRAIN

Dans cette partie de la présente étude sont comparés les deux modes de transport en commun retenus à la suite de l'analyse présentée dans le chapitre précédent : **tramway** et **métro souterrain**.

L'objectif est d'identifier le système (offre de transport) qui satisfait le mieux la demande à court terme et à long terme. Ainsi, les principaux éléments différenciant entre le tramway et le métro souterrain porteront sur :

- La capacité au regard de l'achalandage (le lien entre la charge dimensionnante en heure de pointe et la capacité offerte par chacun des modes selon différentes fréquences);
- L'évolutivité du système (capacité à absorber une montée en charge importante de l'achalandage).

4.1 CAPACITÉ DU SYSTÈME AU REGARD DE L'ACHALANDAGE ATTENDU

La **capacité** du système de transport doit être en adéquation avec l'achalandage attendu (ne devant pas dépasser la capacité du système en heure de pointe) sur la future ligne (capacité du matériel roulant et niveau de confort). Cela implique que l'offre devra être satisfaisante avec une fréquence attractive.

La capacité va dépendre, pour chaque système, de 3 paramètres principaux :

- Du matériel roulant choisi : des capacités unitaires différentes selon la largeur, longueur de la rame, et selon la possibilité de couplage de rames;
- Du taux de confort⁴¹ dans la rame : nombre de personnes par m²;
- De l'intervalle de passage entre 2 rames, et qui se situera entre :
 - l'intervalle minimal théorique (en dessous duquel le système ne saura pas descendre) qui dépendra, pour le tramway, des conditions d'insertion sur le site, et, pour le métro souterrain, du type de conduite (manuelle ou automatique);

⁴¹ Places assises par rapport au nombre total de places

l'intervalle nécessaire pour « écouler la demande » exprimée en passagers par heure par direction (PPHPD)

SCENARIO TRAMWAY EN QUELQUES CHIFFRES	
• Tracé (km)	23
• Mise en service	2026

Le scénario du tramway a pour point de départ la 76e Rue (au nord de la ville de Québec) et le point d'arrivée est à la station de l'avenue Le Gendre (à l'ouest de la ville de Québec). Le tramway dessert trois pôles d'échanges : Saint-Roch (1), Université Laval (2), Sainte-Foy Ouest (3). Le tracé du tramway est long de 23 km, dont 3,5 km en souterrain.



Figure 4-1 : Tracé du scénario tramway, source : RSTC et SYSTRA

SCENARIO METRO COURT ET LONG EN QUELQUES CHIFFRES	
• Scénario métro tracé court (km) (en rouge)	16,3
• Scénario métro tracé long (km) (en jaune)	20,5
• Mise en service	2026

Deux scénarios de métro sont analysés : un tracé long et un tracé court. Le point de départ du tracé long est à la 41ème rue (au nord de la Ville de Québec) et le point d'arrivée est à la station de l'avenue Le Gendre (à l'ouest de la ville de Québec). Le tracé est 20,5 km long. Les deux scénarios desservent trois pôles d'échanges : Saint-Roch (1), Université Laval (2), Sainte-Foy Ouest (3). Le tracé court relie le Pôle Saint-Roch à l'Avenue Le Gendre et est 16,3 km long.



Figure 4-2 : Tracé des scénarios métro souterrains, source : RSTC et SYSTRA

L'analyse de la capacité au regard de l'achalandage attendu du scénario tramway est basée sur le modèle d'achalandage réalisé par le RTC (modèle de choix modal réalisé par INRO) datant de juillet 2019⁴². Les deux scénarios métro sont modélisés par INRO et se basent sur le même modèle d'achalandage que celui du tramway. Les résultats du modèle correspondant aux horizons 2026 et 2041 pour chaque scénario sont présentés dans le tableau ci-après.

⁴² La méthodologie de la modélisation d'achalandage est détaillée dans le rapport d'achalandage – données mises à jour produit par RTC (2019) et dans le rapport Réseau structurant de transport en commun - Audit du modèle de prévision de l'achalandage du RTC produit par SYSTRA (2019)

Tableau 4-1 : L'achalandage de 3 scénarios modélisés en 2026 et 2041

	Scénario tramway	Scénario métro court	Scénario métro long
Passagers par heure par direction (pphpd) en 2026	3 200	3 600	4 200
Passagers par heure par direction (pphpd) en 2041	3 600	3 700	4 200

Les résultats de l'achalandage et le lien avec la capacité ont été testés selon différentes hypothèses de fréquence de services (3 min, 4 min et 5 min). Ils sont présentés d'abord pour le scénario tramway et ensuite pour les deux scénarios de métro.

Les tableaux ci-après illustrent, de manière synthétique, le lien entre la capacité des systèmes, la fréquence et l'achalandage attendu (capacité unitaire du véhicule x fréquence en heure de pointe / achalandage en heure de pointe par sens).

La capacité globale du système de transport tramway évalué est de 260 passagers, équivalent à un taux de confort de 3,3 personnes/m² considéré comme charge normale⁴³ à Québec pour un matériel roulant de 43 mètres de long et 2,65 mètres de large.

Tableau 4-2 : Scénario tramway : taux d'occupation des rames à l'heure de pointe sur la section la plus chargée, avec taux de confort 3,3 personnes / m²

Capacité / fréquence	2026			2041		
	3mn	4mn	5mn	3mn	4mn	5mn
Avec capacité de 260 passagers	62%	82%	103%	69%	92%	115%
Passagers par heure par direction	3 200	3 200	3 200	3 600	3 600	3 600
Capacité en heure de pointe	5 200	3 900	3 120	5 200	3 900	3 120

La fréquence optimale vis-à-vis l'achalandage attendu semble de 4 minutes en 2026 et 3 minutes en 2041 laissant une réserve si l'achalandage croît plus qu'estimé.

Pour les scénarios de métro, une capacité de 150 passagers par voiture x 6 équivalant à une capacité de 900 passagers est évaluée⁴⁴. Cela signifie que la capacité globale du système en heure de pointe avec une fréquence de 3 minutes est 18 000 passagers ; avec une fréquence de 4 minutes, la capacité est de 11 000 passagers ; avec une fréquence de 5 minutes, la capacité est de 9 000 passagers.

⁴³ La charge maximale est équivalente à un taux de confort de 3,7 passagers/m² égal à 280 passagers par rame et la charge exceptionnelle est équivalente à un taux de confort de 4 passagers/m² égal à 300 passagers par rame. À titre d'exemple, la charge normale utilisée en Europe est de 4 passagers/m², la charge maximale est de 6 passagers/m² et charge exceptionnelle est 8 passagers/m².

⁴⁴ Par exemple, à Montréal, la ligne bleue est exploitée par 6 rames et les lignes orange et verte par 9 rames de 152 m de long.

Tableau 4-3 : Scénario métro court et métro long : taux d'occupation des rames à l'HP sur la section la plus chargée, avec taux de confort 3,3 personnes / m²

	Capacité / fréquence	2026			2041		
		3mn	4mn	5mn	3mn	4mn	5mn
Scénario métro court	Capacité de 900 passagers	20%	27%	33%	23%	31%	39%
	Passagers par heure par direction	3 600	3 600	3 600	4 200	4 200	4 200
	Capacité en heure de pointe	18 000	13 500	10 800	18 222	13 500	10 800
Scénario métro long	Capacité de 900 passagers	21%	27%	34%	23%	31%	39%
	Passagers par heure par direction	3 700	3 700	3 700	4 200	4 200	4 200
	Capacité en heure de pointe	18 000	13 500	10 800	18 000	13 500	10 800

La capacité d'un métro de 900 passagers présentant 6 voitures de capacité de 150 personnes est surdimensionnée par rapport à la demande identifiée, avec des intervalles inférieurs ou égaux à 5 min pour les deux scénarios de métro.

En considérant qu'une réserve de capacité résiduelle de 10 % est un minimum souhaité à tout moment pour l'exploitation du véhicule tramway ou métro souterrain à l'heure de pointe (pour absorber l'effet hyperpointe, ou des irrégularités de la ligne), il est constaté, sur la base de ces résultats :

- Qu'un tramway avec une capacité de 260 passagers avec une fréquence de 5 min est insuffisant pour répondre à l'achalandage sur le court terme et le long terme;
- Qu'un tramway avec une capacité de 260 passagers est optimal pour répondre à l'achalandage sur le court terme avec une fréquence de 4 min;
- Qu'un tramway avec une capacité de 260 passagers est optimal pour répondre à l'achalandage sur le long terme avec une fréquence de 3 min;
- Qu'un métro de 6 voitures de capacité de 150 passagers (900 passagers) avec une fréquence de 5 min est surdimensionné;
- Qu'un métro de 2 voitures de capacité de 150 passagers (300 passagers) avec la fréquence de 4 min est « optimal »⁴⁵.
- Qu'un métro de 6 voitures de capacité de 150 passagers (900 passagers) avec la fréquence de 13 min⁴⁶ est optimal par rapport à la demande à écouler, mais peu attractif pour l'utilisateur.

À noter que ces calculs issus du modèle de prévision d'achalandage tiennent bien compte des évolutions socio-économiques, mais ne tiennent pas compte d'autres facteurs exogènes impossibles à modéliser tels que l'évolution des comportements, la conjoncture économique, le prix de pétrole, etc.

La capacité du système au regard de l'achalandage est compatible avec le système de tramway contrairement au système de métro qui est surdimensionné par rapport aux besoins de Québec.

⁴⁵ Taux d'occupation des rames pour le scénario court en 2026 est égale à 77 %, en 2041 à 81 % ; Taux d'occupation des rames pour le scénario long en 2026 est égale à 84 %, en 2041 à 87 %

⁴⁶ Le taux de charge du métro scénario long avec une fréquence de 9mn est de 94% en 2026 et 98% en 2041.

4.2 ÉVOLUTIVITÉ DU SYSTÈME

L'évolutivité d'un système dépend de trois facteurs qui sont :

- La possibilité d'augmenter la fréquence tout en restant dans les conditions réalistes d'exploitation, c'est-à-dire sans dégradation de la régularité entre les véhicules ;
 - celle-ci est possible pour les deux systèmes, dans une limite théorique de fréquence supérieure ou égale à 3 min pour le tramway et 1,5 min pour le métro souterrain,
 - pour le système tramway, en cas de fréquence trop importante, des difficultés d'exploitation sont prévisibles le long du tracé, parce que le tracé traverse plusieurs artères principales de la ville. Garantir une priorité aux feux tricolores deviendra difficile.
- La possibilité d'augmenter la capacité des rames par couplage de véhicules;
 - celle-ci est possible pour les deux modes, à condition qu'en phase de conception, le dimensionnement des quais pour accueillir les véhicules couplés soit anticipé et que les capacités de financement de la ville le permettent.
- L'évolutivité du système peut également s'entendre dans le sens du prolongement de la ligne, de l'automatisation du métro souterrain ou éventuellement du tramway en site propre intégral (dépendant de développements technologiques), de l'intermodalité et interconnexion entre plusieurs modes existants ou futurs. Ceux-ci sont possibles pour les deux systèmes. Cependant, l'extension d'une ligne de tramway est plus facile et moins coûteux à réaliser après la mise en service qu'une ligne de métro souterrain. L'ajout de nouvelles stations est incomparablement plus facile dans le cas d'un tramway que dans celui d'un métro souterrain.

L'évolutivité pour les deux systèmes est faisable.

Du point de vue de l'achalandage estimé à long terme sur le corridor d'étude, le système métro souterrain reste surdimensionné par rapport au tramway.

La capacité maximale du tramway de 260 passagers - plafonnée à 5 200 passagers par heure et par direction en heure de pointe avec une fréquence de 4 min à court terme et 3 minutes à long terme - est suffisante pour permettre une montée en charge de l'achalandage, sous réserve de garantir de bonnes conditions d'exploitation sur l'ensemble du tracé.

5. SYSTÈME RECOMMANDÉ

Pour résumer :

- Le tramway, avec une capacité de 260 passagers et un taux de confort de 3,3 passagers/m² est optimal pour répondre à l'achalandage sur le court terme avec une fréquence de 4 min et 3 minutes sur le long terme;
- Le métro souterrain est surdimensionné dans le contexte québécois, et serait seulement optimal avec une fréquence de 13 minutes (6 voitures soit une capacité de 900 passagers avec un taux de confort de 3,3 passagers/m²) ;
- L'évolutivité des deux systèmes est faisable, mais, du point de vue de l'achalandage estimé à long terme sur le corridor d'étude, le tramway est le plus adapté (un matériel roulant avec une capacité de 260 passagers peut accueillir jusqu'à 5 200 personnes par heure par direction avec une fréquence de 3 min). Selon l'achalandage estimé, cette évolutivité de la capacité du système de tramway est suffisante à long terme.

Le tableau ci-dessous récapitule l'analyse comparative des systèmes métro et tramway présentés dans le chapitre 3 et dans le chapitre 4. La couleur verte = très favorable, la couleur jaune = moyen, la couleur orange = faible et la couleur rouge = défavorable.

Tableau 5-1 : Analyse comparative des systèmes métro souterrain et tramway

	Tramway	Métro souterrain
Conditions d'insertion	+	+++
Fiabilité des systèmes dans les conditions hivernales	+	+++
Disponibilité technologique	+++	+++
Coûts	+++	---
Capacité du système au regard d'achalandage	+++	---
Évolutivité du système	+++	+++



SYSTEME RECOMMANDÉ



SYSTEME NON RECOMMANDÉ

Le métro souterrain présente plusieurs avantages.

Il peut apporter le meilleur service en matière de fréquence, vitesse, et confort. Son avantage est notamment sa régularité et fiabilité, car il ne subit aucun conflit avec d'autres modes de transport. Cependant, ce mode de transport a des coûts de réalisation élevés. Il est cinq fois plus coûteux que le tramway car c'est un mode entièrement souterrain nécessitant d'importants ouvrages. Par ailleurs, la nature des sols, inconnue à ce stade d'étude, reste porteuse de nombreuses incertitudes susceptible de

renchérir des coûts. Enfin, ce mode de transport est surdimensionné dans le contexte québécois. Avec l'achalandage estimé, la fréquence d'un métro « standard » (composé de 6 voitures) devrait être de 13 minutes pour être « optimale » par rapport à sa capacité. Le recours à un métro de taille réduite (petit gabarit) avec des rames courtes est toujours possible, mais pose la question de l'intérêt de ce type de système au regard de son coût rapporté au nombre de passagers transportés.

Ainsi on peut dire que le système de métro souterrain est le plus adapté dans le contexte québécois en matière d'insertion et de fiabilité mais à exclure compte tenu de son coût et de l'achalandage prévisionnel calculé pour la ville de Québec. Le tramway, en revanche, est le plus adéquat en terme de coût et aussi par rapport à l'achalandage estimé et la capacité du système.

Par conséquent, SYSTRA recommande un système tramway en tant que ligne structurante pour le projet du réseau structurant de transport en commun de la Ville de Québec (RSTC), considérant que, par rapport à d'autres systèmes, il est le seul à répondre à l'ensemble des critères (insertion, fiabilité, disponibilité technologique, coûts par rapport au budget prévu, capacité du système au regard de l'achalandage et évolutivité du système) de manière satisfaisante.

Le coût du tramway reste en adéquation avec les capacités de financement du maître d'ouvrage au contraire du métro, car avec le même montant d'investissement, il est possible de construire seulement 5 km de métro souterrain alors qu'il est possible de construire 23 km de tramway.

Le mode tramway correspond au mieux à l'achalandage en termes de capacité du système et il est un mode évolutif permettant de préserver une réserve de capacité en cas de montée en charge de l'achalandage.

La fiabilité du tramway est bonne toute l'année, y compris en hiver, à condition qu'un plan de déneigement de la plateforme et des quais soit mis en place et que soient envisagés les éléments de conception spécifiques tels que le réchauffage d'aiguillages, des centres d'entretiens clos et réchauffés, un matériel roulant bien isolé, etc.