

REM de l'Est

Phase de développement

CHOIX DU MODE POUR
L'EST DE MONTRÉAL

Étude comparative de
modes lourds de
transport collectif



Référence CDPQ Infra et Coentreprise : [[03-AECSYS-ETU_DEV_GEC_GE00_T00_0307-00_00]

Préparé pour :
CDPQ Infra Inc.

Rapport émis le :
2021-04-26

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

Historique de révision

Révision	00
Date	2021-04-26
Préparé par	JO
Révisé par	PK
Approuvé par	MS
Commentaires	1 ^{re} édition

Préparé par :



Joaquin Ortiz, Planificateur des transports
Coentreprise AECOM-SYSTR

Révisé par :



Pascal Kerhoas, Directeur technique
Coentreprise AECOM-SYSTR

Approuvé par :



Marc Seffacene, Directeur de projet
Coentreprise AECOM-SYSTR



Identification DU DOCUMENT

CHOIX DU MODE POUR L'EST DE MONTRÉAL

Étude comparative de modes lourds de transport collectif

Référence CDPQ Infra et Coentreprise :
[[03-AECSYS-ETU_DEV_GEC_GE00_T00_0307-
00_00]

Table *des* matières

1. INTRODUCTION.....	4
2. ÉTAT DE L'ART POUR LE CHOIX DU MODE	5
2.1 IDENTIFICATION DES CARACTÉRISTIQUES DES MODES À ANALYSER	6
2.2 TRACÉ RETENU POUR LE MODE STRUCTURANT	7
3. DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSPORT PERTINENTS POUR LE PROJET.....	12
3.1 LE MÉTRO LÉGER AUTOMATIQUE	12
3.2 LE TRAMWAY	17
3.3 LE TRAM-TRAIN.....	21
4. ANALYSE COMPARATIVE DES MODES POUR LE CAS DE MONTRÉAL.....	24
4.1 CONDITIONS HIVERNALES	24
4.2 CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES TROIS MODES ANALYSÉS.....	25
4.3 COMPARAISON/EVALUATION DES TROIS MODES ANALYSÉS POUR LE REM DE L'EST	27
5. RECOMMANDATION.....	31

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Achalandage simulé pour les trois modes analysés, PPAM et à l’horizon 2044.....	6
Tableau 2-2 : Caractéristiques du tracé associé au mode métro léger automatique analysé (horizon 2044).....	8
Tableau 2-3 : Caractéristiques du tracé associé au mode tramway analysé (horizon 2044).....	9
Tableau 2-4 : Caractéristiques du tracé associé au mode tram-train analysé (horizon 2044).....	10
Tableau 3-1 : Les caractéristiques générales du métro léger automatique.....	14
Tableau 3-2 : Les caractéristiques du matériel roulant métro léger automatique.....	15
Tableau 3-3 : Systèmes de métro léger automatique équipés de CBTC dans le monde.....	16
Tableau 3-4 : Les caractéristiques générales du tramway.....	20
Tableau 3-5 : Les caractéristiques du matériel roulant tramway.....	21
Tableau 4-1 : Caractéristiques des modes métro léger automatique, tramway et tram-train appliquées au cas de Montréal.....	25
Tableau 5-1 : Caractéristiques de l’exploitation des trois modes analysés, PPAM et à l’horizon 2044.....	31

Liste des figures

Figure 2-1 : Diagramme général du choix du mode en fonction du pphpd et de la vitesse commerciale.....	6
Figure 2-2 : Tracé des deux lignes du REM de l'Est en mode métro léger automatique.....	8
Figure 2-3 : Tracé des deux lignes du REM de l'Est en mode tramway.....	9
Figure 2-4 : Tracé des deux lignes du REM de l'Est en mode tram-train.....	11
Figure 3-1 : Exemple de métros légers automatiques dans le monde (source : SYSTRA et l'UITP).....	12
Figure 3-2 : Exemples du matériel roulant métro léger automatique dans le monde (source : SYSTRA).....	13
Figure 3-3 : Exemple des portes palières des systèmes de métro léger automatique (source : SYSTRA).....	17
Figure 3-4 : Photos du tramway en France, source SYSTRA.....	18
Figure 3-5 : Exemple de tramways dans le monde (source : SYSTRA).....	19
Figure 3-6 : Exemples de trams-trains dans le monde, source SYSTRA.....	23
Figure 3-7 : Exemple de trams-trains dans le monde.....	23

1. INTRODUCTION

CDPQ Infra développe actuellement l'ingénierie de référence pour le projet REM de l'Est, un réseau composé de deux branches qui se rejoignent sur un tronçon central de type métro léger pour l'est du territoire de l'île de Montréal.

CDPQ Infra a aussi développé des études de prévision d'achalandage pour ce réseau en considérant trois options d'insertion urbaine de l'infrastructure de transport et de densité du nombre de stations qui se déclinent en trois types de vitesses commerciales, qu'on appelle ci-après « mode métro léger automatique, mode tramway et mode tram-train ».

L'objectif de cette note est d'identifier les modes ferroviaires urbains qui desserviront le mieux l'achalandage généré à long terme selon les trois modes analysés, les comparer d'un point de vue technique et de conclure avec une recommandation générale sur le mode le plus adapté pour réaliser une offre de transport répondant aux besoins du territoire considéré.

L'approche méthodologique considère quatre étapes :

- Description de l'état de l'art pour le choix du mode;
- Identification des capacités de transport¹ et vitesses commerciales de chaque mode analysé;
- Identification des modes ferroviaires urbains qui répondent aux critères décrits ci-avant;
- Description analytique des concepts généraux, des performances et des capacités de transport de chaque mode identifié, et;
- Comparaison et évaluation des critères associés à chaque mode dans le contexte spécifique du projet.

En général, l'insertion urbaine du mode métro léger est réalisée en site propre intégral par une structure aérienne sur un viaduc ou souterraine via la réalisation d'un tunnel. Les modes tramway et tram-train sont conçus avec une insertion au sol, ce qui serait notamment le cas le long du boulevard René-Levesque pour le projet du REM de l'Est. Néanmoins, pour que la comparaison du mode métro léger avec les modes tramway et tram-train soit équitable du point de vue des performances de transport, CDPQ Infra a considéré une insertion souterraine sur la branche Nord pour les trois modes et, dans le cas de la branche Est, une insertion au sol pour le tramway et une insertion aérienne pour le tram-train. Dans plusieurs villes du monde, l'insertion aérienne et souterraine du tramway ou du tram-train est courante².

Il est à noter que le réseau tel que prévu sera exploité avec un tronc commun dans le centre-ville et deux antennes, une vers l'Est et une vers le Nord. Cette configuration oblige à ce que les intervalles de service sur les deux antennes représentent toujours la moitié de l'intervalle pratiqué sur le tronc commun. C'est une contrainte à prendre en compte pour la définition de la capacité de transport de chaque mode.

¹ Capacité de transport : nombre des passagers que le mode peut transporter dans une direction et pendant une heure (pphpd)

² Par exemple, les trams-trains de Porto (Portugal) et Randstadrail (Rotterdam), le tramway de Brussels

2. ÉTAT DE L'ART POUR LE CHOIX DU MODE

La conception d'une infrastructure de transport urbain suppose l'analyse de plusieurs facteurs qui déterminent le choix du mode ferroviaire le plus adapté aux conditions des déplacements et aux caractéristiques du milieu urbain que dessert une telle infrastructure.

La condition la plus importante qui justifie le choix du mode est le volume d'achalandage que doit satisfaire une telle ligne lors de son exploitation commerciale. A des fins de dimensionnement d'une ligne, l'achalandage doit être exprimé en passagers par heure et par direction ou pphpd, sachant que l'heure en question doit être l'heure de pointe du système de transport collectif. La performance d'une ligne s'exprime fondamentalement via la vitesse commerciale qu'elle peut atteindre, c'est-à-dire la vitesse résultant du rapport entre les distances parcourues et les temps de parcours entre les terminus de chaque antenne et celui du tronç commun.

Le diagramme ci-dessous présente la relation entre la capacité de transport mesurée en pphpd, la vitesse commerciale, l'ordre de grandeur des coûts d'immobilisation et les modes structurants qui répondent le mieux à ces paramètres.

Selon les études de prévisions qui ont été élaborées par la société STEER sur les principaux corridors urbains de l'Est de l'île de Montréal, la demande de transport collectif serait inférieure à 10 000 pphpd à long terme (2044). Les modes métro lourd et BHNS ont donc été écartés de l'analyse.

Les prévisions d'achalandage élaborées couvrent une fourchette entre 3 000 et 7 500 pphpd à long-terme selon trois conditions spécifiques d'insertion urbaine. Sur la base du diagramme suivant, ce sont les modes tramway, tram-train et métro léger qui répondront le mieux aux besoins de déplacement de la population desservie.

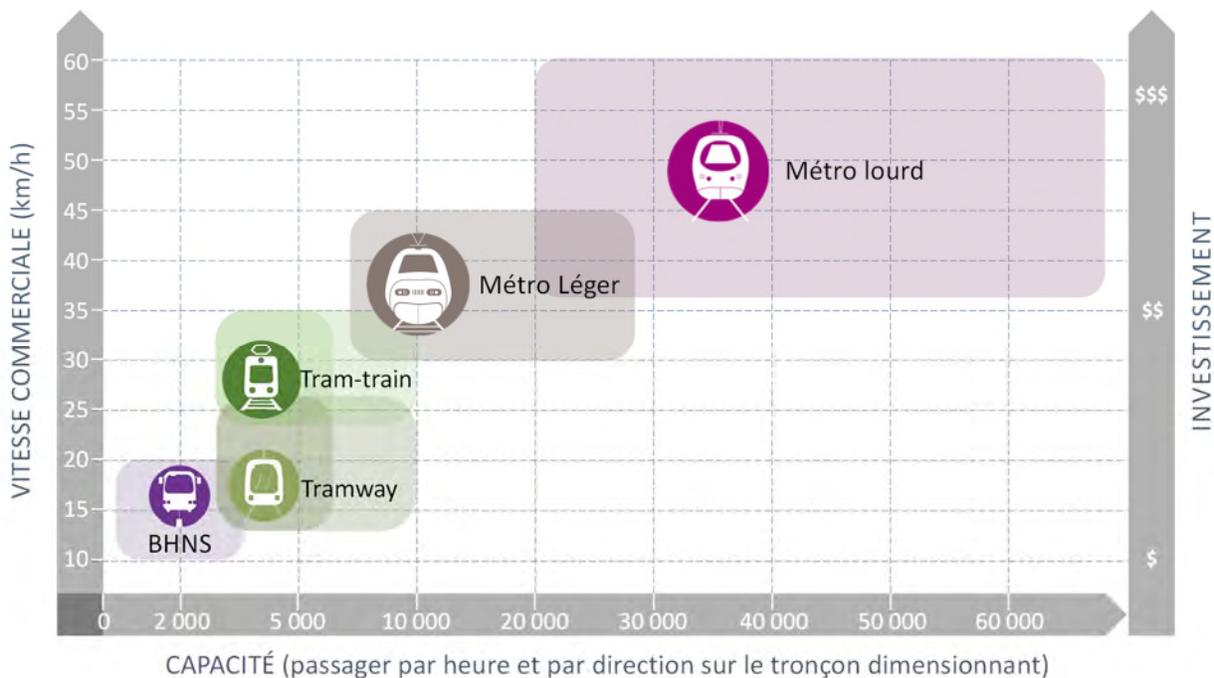


Figure 2-1 : Diagramme général du choix du mode en fonction du pphpd et de la vitesse commerciale³

2.1 IDENTIFICATION DES CARACTERISTIQUES DES MODES A ANALYSER

Selon les trois options de prévisions d'achalandage développées par la société STEER à l'horizon 2044, la demande dimensionnante du projet sera le pphpd identifié à partir de la charge maximale sur le tronç commun pour les passagers se déplaçant vers le centre-ville pendant les trois heures de la période de pointe du matin (PPAM).

Dans le tableau suivant, on observe les résultats des prévisions d'achalandage pour chaque mode. Successivement sont présentés, la charge maximale correspondant à l'achalandage sur le tronç commun pendant trois heures, le pphpd correspondant à l'heure de pointe, les montées totales correspondant au nombre de passagers qui embarquent dans les deux lignes pendant les trois heures de pointe du matin et, enfin, les vitesses commerciales pour chaque mode calculées en prenant en compte le nombre de stations, le temps d'arrêt en station, les contraintes de circulation sur les intersections à feux et la performance du matériel roulant (temps d'accélération jusqu'à la vitesse maximale, puis la décélération et l'arrêt).

Dans ce tableau, on constate une corrélation directe entre l'attractivité des modes de transport mesurée en pphpd et leur vitesse commerciale. On en conclut donc que le besoin d'achalandage réel de la population à l'horizon simulé, et non pas pondéré par des facteurs limitants d'attractivité, est le résultat de la modélisation avec la vitesse commerciale la plus élevée. Les résultats des modes concurrents présentent un achalandage réduit du fait de leur perte d'attractivité.

Tableau 2-1 : Achalandage simulé pour les trois modes analysés, PPAM et à l'horizon 2044

	Métro léger automatique	Tramway	Tram-train
Charge maximale PPAM tronç commun	17 484	7 107	12 533
Pphpd ⁴	7 518	3 056	5 389
Montées totales	40 496	18 791	33 271
Vitesse commerciale (km/h)	42,7	28,9	35,6

Source : STEER et SYSTRA

De manière plus détaillée, on observe que pour :

- Le mode métro léger automatique : la vitesse commerciale globale simulée de 42,7 km/h s'inscrit au niveau du seuil supérieur de ce mode. En relation à sa capacité de transport, l'achalandage simulé de 7 518 pphpd entre dans la fourchette établie dans la figure 2.1 (pphpd entre 7 000 et 28 000 pphpd).

³ Source : SYSTRA

⁴ Utilisant un coefficient de passage de la période de pointe du matin (PPAM) vers l'heure de pointe.

- Le mode tramway : la vitesse commerciale globale simulée de 28,9 km/h excède légèrement celle observée dans la plupart des systèmes tramway dans le monde (entre 13 km/h et 26 km/h)⁵. Cette vitesse commerciale élevée est due à l'insertion souterraine de la branche Nord où la vitesse moyenne est de 36,6 km/h. La prévision d'achalandage pour le tramway de 3 056 pphpd correspond bien à la capacité de transport de ce mode d'entre 2 600 et 6 000 pphpd (exceptionnellement jusqu'à 10 000 pphpd⁶).
- Le mode tram-train : la vitesse commerciale globale simulée de 36,6 km/h s'inscrit dans le seuil supérieur de la fourchette de 24 à 35 km/h⁷. En relation à la capacité de transport du tram-train, l'achalandage simulé de 5 389 pphpd s'inscrit également dans la fourchette de capacité de ce mode (entre 2 600 et 6 000 pphpd (exceptionnellement 10 000 pphpd).

2.2 TRACE RETENU POUR LE MODE STRUCTURANT

Trois alternatives de solution pour la mise en place de deux branches structurantes sur le territoire de l'est de l'île de Montréal ont été identifiées, tant du point de vue de leurs tracés et la typologie d'insertion que pour leurs vitesses commerciales associées au nombre des stations et à la présence des sites propres exclusifs avec ou sans l'interférence des intersections à feux.

Les tracés des deux antennes identifiées, chacune avec environ 18 km et 21 km de longueur, se déroulent sur trois corridors principaux à l'est de l'île de Montréal où se concentre la plupart de la population résidant sur ce territoire. Une description de chaque option est présentée dans cette section.

On notera que le choix a été fait pour cette étude d'adopter des types d'insertion similaires pour chacun des modes sur le tronçon nord, afin de ne pas déséquilibrer la comparaison : aussi le mode tramway et le tram-train, traditionnellement insérés au niveau du sol, ont été considérés pour les besoins de cette étude en souterrain, de manière analogue au mode métro léger.

2.2.1 Tracé mode métro léger automatique

Les caractéristiques notables du tracé pour le mode métro léger automatique analysé sont les suivantes :

- Tronc commun : insertion aérienne le long du boulevard René-Lévesque et de la rue Notre-Dame jusqu'à la hauteur du boulevard l'Assomption;
- Branche Nord : insertion aérienne le long du boulevard de l'Assomption et souterraine le long du boulevard de Lacordaire jusqu'au Cégep Marie-Victorin à Montréal-Nord, et;
- Branche Est : insertion aérienne le long de l'avenue Souigny et de la rue Sherbrooke Est jusqu'au terminus Pointe-aux-trembles.

⁵ Source SYSTRA : benchmark des vitesses commerciales en corrélation avec les distances inter-stations de 86 systèmes de tramway et tram-train dans le monde, 2020.

⁶ Cette capacité de 10 000 pphpd est obtenue en couplant deux rames de tramway. Les conditions du tissu urbain doivent permettre d'en avoir un matériel roulant si long.

⁷ Idem.

Le tableau suivant présente de façon synthétique les principales caractéristiques du tracé :

Tableau 2-2 : Caractéristiques du tracé associé au mode métro léger automatique analysé (horizon 2044)

	Tronc commun	Branche nord	Branche est	Total
Nombre de stations	8	8	7	23
Distance inter-station moyenne (m)	995	1 267	1 900	1 360
Type d'insertion	Aérienne	Aérienne / Souterraine	Aérienne	
Pphpd	7 518	4 927	4 548	
Vitesse commerciale (km/h)	36,4	41,1	46,9	42,7
Intervalle service	2 min	4 min	4 min	

La figure ci-après présente le tracé retenu pour le projet REM de l'Est en mode métro léger automatique.

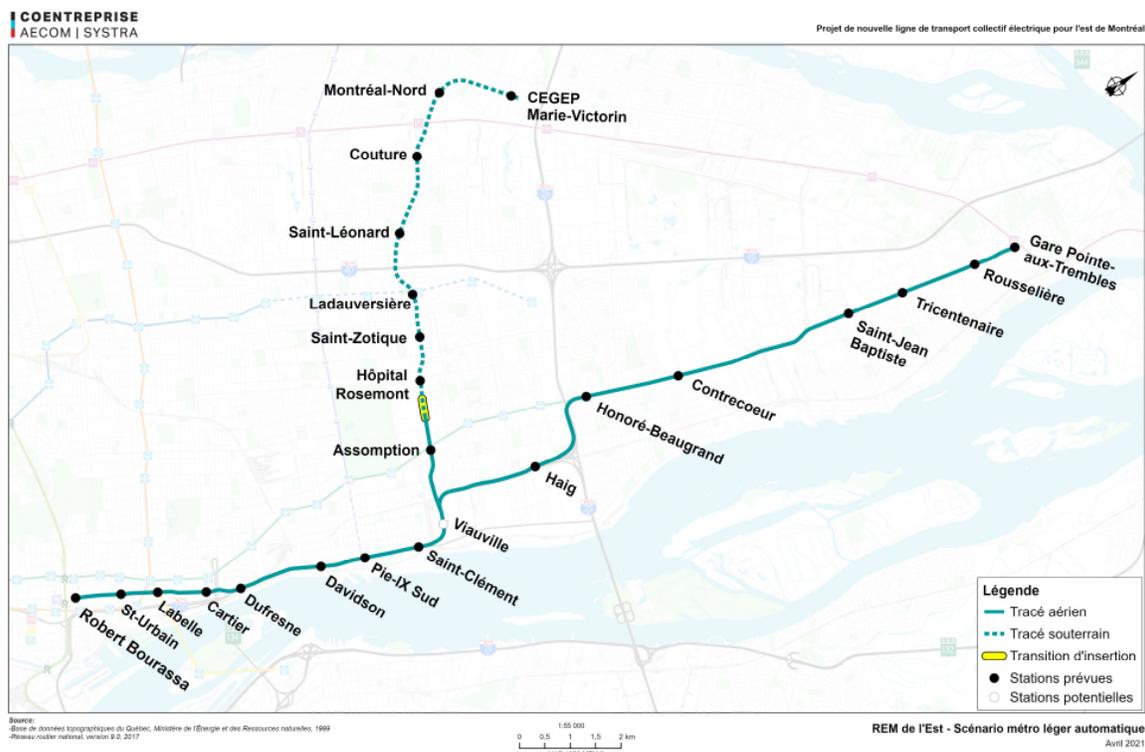


Figure 2-2 : Tracé des deux lignes du REM de l'Est en mode métro léger automatique

2.2.2 Tracé mode tramway

Les caractéristiques notables du tracé pour le mode tramway analysé sont les suivantes :

- Tronc commun : insertion au sol le long du boulevard René-Lévesque et de la rue Notre-Dame jusqu'à la hauteur du boulevard l'Assomption;

- Branche Nord : insertion au sol le long du boulevard de l'Assomption (entre la station potentielle Viauville et la station Pyramides) et en souterrain le long du boulevard de Lacordaire jusqu'au Cégep Marie-Victorin à Montréal-Nord, et;
- Branche Est : insertion aérienne le long de l'avenue Souigny et au sol le long de la rue Sherbrooke Est jusqu'au terminus Pointe-aux-Trembles.

Le tableau ci-après présente de façon synthétique les principales caractéristiques du tracé :

Tableau 2-3 : Caractéristiques du tracé associé au mode tramway analysé (horizon 2044)

	Tronc commun	Branche nord	Branche est	Total
Nombre de stations	12	9	12	33
Distance interstation moyenne (m)	668	1 136	1 209	956
Type d'insertion	Au sol	Au sol / Souterraine	Au sol / aérienne	
Pphpd	3 056	2 431	2 829	
Vitesse commerciale (km/h)	25,8	36,6	30,4	28,9
Intervalle de service	3 min 45''	7 min 30''	7 min 30''	

La figure suivante présente le tracé retenu pour le projet REM de l'Est en mode tramway.

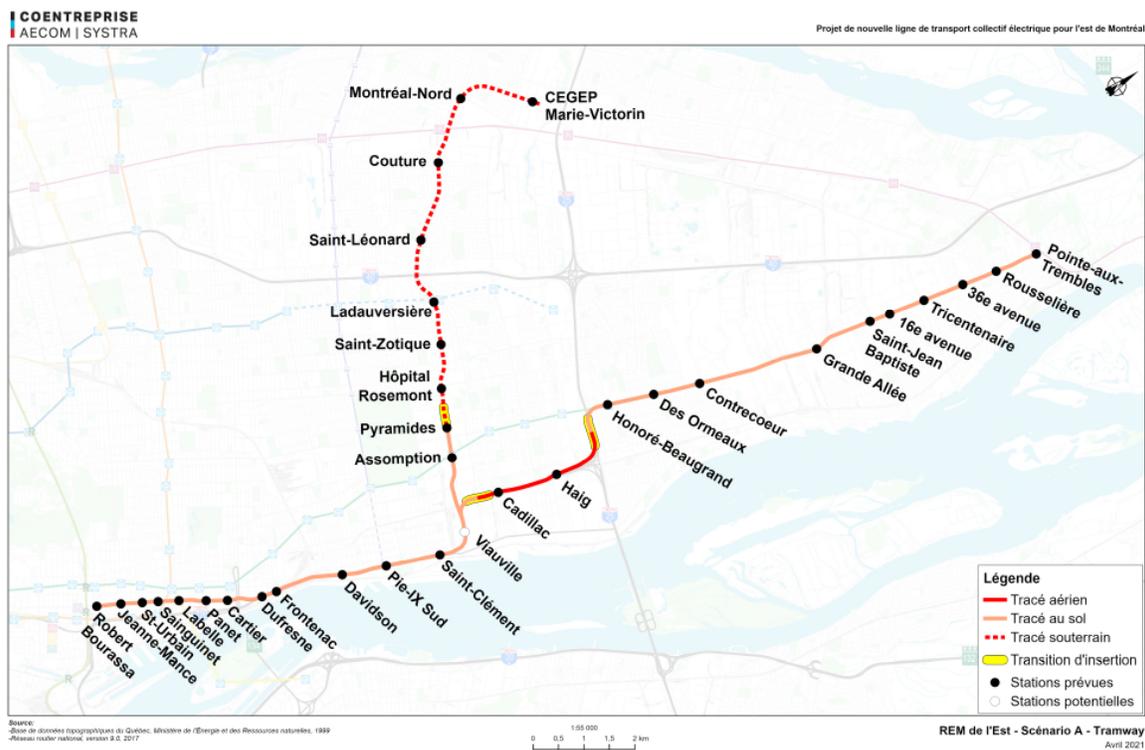


Figure 2-3 : Tracé des deux lignes du REM de l'Est en mode tramway

2.2.3 Tracé mode tram-train

Les caractéristiques notables du tracé pour le mode tram-train analysé et de son exploitation sont les suivantes :

- Tronc commun : insertion au sol le long du boulevard René-Lévesque jusqu'à la station Dufresne, en exploitation similaire à celle d'un tramway, puis aérienne le long de la rue Notre-Dame jusqu'à la hauteur du boulevard l'Assomption, en exploitation similaire à celle d'un métro conventionnel;
- Branche Nord : insertion aérienne le long du boulevard de l'Assomption et souterraine le long du boulevard Lacordaire jusqu'au Cégep Marie-Victorin à Montréal-Nord, en exploitation similaire à celle d'un métro conventionnel, et;
- Branche Est : insertion aérienne le long de l'avenue Souigny et la rue Sherbrooke Est jusqu'au terminus Pointe-aux-Trembles, en exploitation similaire à celle d'un métro conventionnel.

Le tableau suivant présente de façon synthétique les principales caractéristiques du tracé :

Tableau 2-4 : Caractéristiques du tracé associé au mode tram-train analysé (horizon 2044)

	Tronc commun	Branche nord	Branche est	Total
Nombre de stations	11	8	7	26
Distance interstation moyenne (m)	729	1 267	1 900	1 213
Type d'insertion	Au sol / aérienne	Aérienne / Souterraine	Aérienne	
Pphpd	5 389	3 855	3 908	
Vitesse commerciale (km/h)	30,7	41,8	45,2	35,6
Intervalle de service	3 min 45''	7 min 30''	7 min 30''	

La figure suivante présente le tracé retenu pour le projet REM de l'Est du mode tram-train.

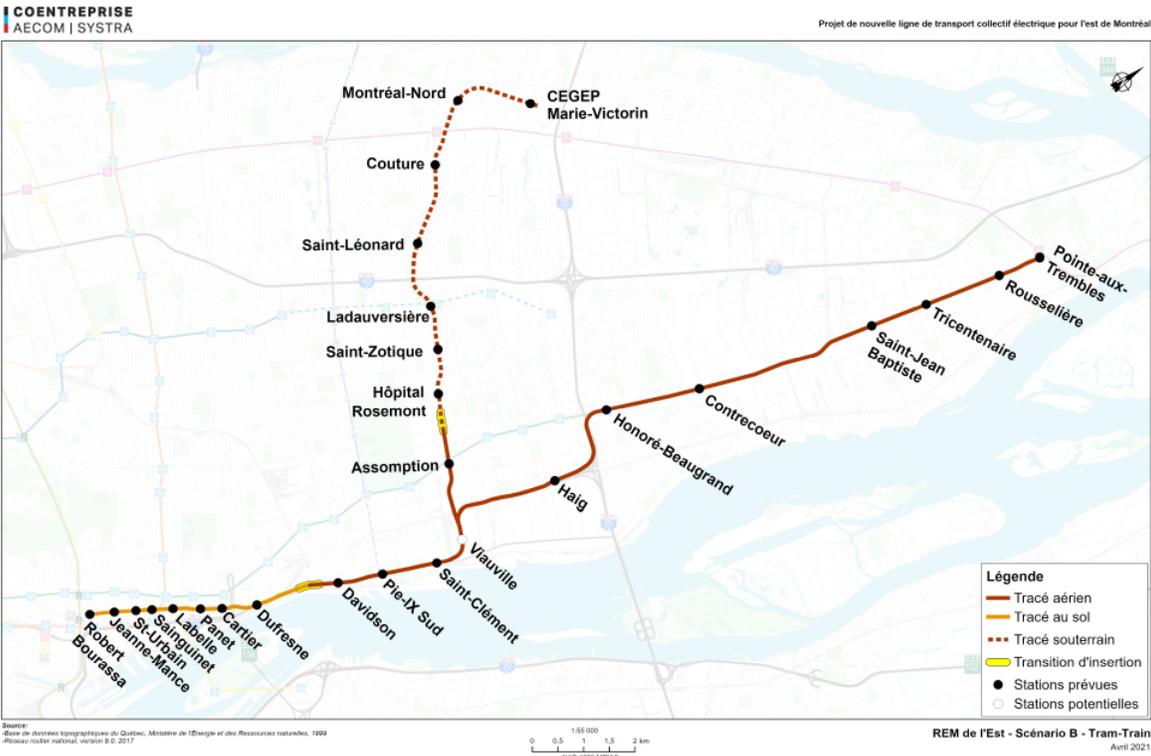


Figure 2-4 : Tracé des deux lignes du REM de l'Est en mode tram-train

3. DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSPORT PERTINENTS POUR LE PROJET

Ce chapitre décrit les principales caractéristiques techniques des systèmes de transport pour les modes métro léger automatique, tramway et tram-train identifiés précédemment. Cette description met en lumière les principales caractéristiques de ces modes dans l'objectif de les comparer entre eux. Cette description est synthétique, générique et non exhaustive afin de se concentrer sur les principaux indicateurs différenciant ces modes.

3.1 LE METRO LEGER AUTOMATIQUE

Le système de « métro léger automatique » est un mode de transport en commun urbain/interurbain sur fer ou sur pneus ayant une vitesse commerciale variant entre 30 et 45 km/h. Il dispose d'une capacité allant jusqu'à 28 000 passagers par heure par direction (pphpd) selon la longueur et la largeur du matériel roulant. Le mode métro léger automatique peut être considéré comme un système de moyenne capacité⁸ qui nécessite des voies entièrement dédiées, soit en viaduc, en souterrain ou au sol à cause des automatismes de conduite 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).



Ligne Yurikamome sur pneus à Tokyo (haut)
Métro léger de Kuala Lumpur

Métro léger de Copenhague (haut)
Métro léger Docklands à Londres

Canada Line à Vancouver (haut)
Métro léger M2 à Lausanne

Figure 3-1 : Exemple de métros légers automatiques dans le monde (source : SYSTRA et l'UITP)

⁸ Selon l'UITP, on peut classer le mode métro automatique en trois sous-modes selon la capacité du matériel roulant (MR) considérant un taux de confort de 4 passagers/m² : de petite capacité « Automated People Mover » (MR de 300 passagers ou moins), de moyenne capacité « Automated Guided Transit » ou métro léger automatique (MR de 300-900 passagers) et de haute capacité ou métro automatique (MR de plus de 700 passagers)

Le métro léger automatique sur rail ou sur pneus 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. Il est alimenté par caténaire ou troisième rail.

L'espacement entre les rames n'est pas géré par un conducteur (à vue) mais, dans la plupart des cas, par un système de contrôle des trains basé sur une communication entre les trains et le sol ou système CBTC (Communication based train control). Ce système requiert des équipements spécifiques de signalisation sur la voie ainsi qu'un balisage des trains. Ce système de conduite des trains est capable de fonctionner sans conducteur (automatique) tout comme le métro. Il offre les intervalles les plus courts, soit jusqu'à 90 secondes entre deux rames.

Le système de métro léger automatique est généralement utilisé pour transporter un grand nombre de passagers des communautés périphériques vers les quartiers centraux. Dans de nombreux cas, les lignes de métro léger automatique peuvent atteindre une vitesse maximale de 90 km/h, sauf dans les centres-villes où les arrêts sont plus rapprochés.

3.1.1 Le matériel roulant et ses caractéristiques générales

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

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 métro léger automatique constitue une réponse à ces besoins par sa polyvalence, étant capable de circuler comme un métro conventionnel ou comme un train desservant la périphérie d'une ville, avec des arrêts tous les 500 m à 2 000 m.

Le tableau suivant présente les caractéristiques générales du système de métro léger automatique.



Kinki Sharyo, Green Line à Dubaï



Bombardier, Pujiang Line à Shanghai



CCCR, South Island Line à Hong Kong

Figure 3-2 : Exemples du matériel roulant métro léger automatique dans le monde (source : SYSTRA)

Tableau 3-1 : Les caractéristiques générales du métro léger automatique⁹

Les caractéristiques générales du métro léger automatique
Intégralement séparé du trafic de surface
Pente maximale : 5 % en extérieur et 6% en tunnel, 12 % pour un métro sur pneus (pente limitée par des conditions hivernales, voir section 4.2)
Courbes de rayon supérieur à 150 m
Potentiellement sans conducteur (automatique : GoA3 ou GoA4)
Distance entre les stations : 500 m à 2 000 m
Alimentation électrique : caténares (le plus souvent 750V ou 1500V) – ou 3e rail
Fréquence : jusqu' à un train toutes les 1,5 minute par direction
Capacité : jusqu'à 28 000 ¹⁰ passagers par heure par direction selon la longueur et la largeur du matériel roulant
Vitesse commerciale : de l'ordre de 30 à 45 km/h
Matériel roulant (MR) : 2 à 6 voitures de 40 à 90 m (en exploitation de rames couplées : 2 x 45 m)
Coût du MR : 4,5 à 7 M CA\$ par rame ¹¹
Durée de vie du MR ¹² : ~ 40 ans
Coût d'investissement : de 65 à 250 M CA\$/km
Coût d'exploitation et d'entretien d'une ligne en moyenne : de 15 à 24 CA \$/veh.km/an

Spécificités techniques

Les caractéristiques suivantes sont données à titre indicatif et basées sur des modèles de constructeurs : Allemand « Siemens », Canadien « Bombardier » absorbé par le Français Alstom, et Japonais Hitachi, les quatre leaders sur le marché du secteur des transports en commun sur rails. Il existe d'autres constructeurs¹³ 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 En considérant un taux de confort de 4 pax/m²

¹¹ Matériel roulant de 40m (valeur basse) ou 90m (valeur haute)

¹² La base pour les calculs comparatifs

¹³ CAF (Espagne), ROTEM et WOOJIN (Corée), KINKI SHARYO, MITSUBISHI et KAWASAKI (Japon) CRCC-CHANGCHUN et CRCC-QINGDAO SIFANG (Chine)

On peut citer en exemple, les modèles de :

1. « S series » de Bombardier
2. « Inspiro » de Siemens
3. « Metropolis » de Alstom
4. « Driverless » de Hitachi

Tableau 3-2 : Les caractéristiques du matériel roulant métro léger automatique

	Innovia Métro Bombardier	Inspiro Siemens	Métropolis Alstom	Driverless Hitachi
Réseau	Millenium et Expo	Riyadh L1 et 2	REM	M1/M2 Copenhague
Longueur (m)	33,4 (2 voitures)	40,2 (2 voitures)	38,1 (2 voitures)	39,0 (3 voitures)
Largeur (m)	2,65	2,77	2,94	2,65
Hauteur (m)	inconnue	3,25	3,90	3,40
Masse à vide (t)	inconnue	inconnue	Inconnue	Inconnue
Écartement (mm)	1435	1435	1435	1435
Alimentation (V)	650	750/1500	1500	750
Vitesse maximale (km/h)	80	80/100	100	100
Capacité assise (nbre de passagers) (niveau de confort : 4 passagers / m ²)	21 (par voiture)	30 (par voiture)	32 (par voiture)	16 (par voiture)
Capacité totale (nbre de passagers)	130 (par voiture)	150 (par voiture)	150 (par voiture)	77 (par voiture)

3.1.2 Le contrôle des trains et les portes palières

Associés à l'automatisme et la performance de ce mode, le CBTC et les portes palières constituent deux des piliers du système de signalisation, contrôle des trains et sécurité de l'exploitation. Compte tenu que les rames du métro léger automatique ne sont pas conduites par un chauffeur, la présence de portes palières à chaque station améliore la performance et la sécurité des usagers au moment de l'embarquement / débarquement des trains.

Selon l'UITP¹⁴, des 31 systèmes de métro léger automatiques dans le monde, 21 comportent un système CBTC et les 10 restantes sont équipées avec un autre système de contrôle des trains. De même, 24 systèmes de métro léger automatique sont équipées de portes palières dans ses stations (voir suivant tableau).

Tableau 3-3 : Systèmes de métro léger automatique équipés de CBTC dans le monde¹⁵

N°	Ligne/Ville/Pays	Fournisseurs du CBTC	Fournisseurs autres systèmes de contrôle	Stations équipées avec portes palières
1	Ligne South Island/Hong-Kong	Alstom		5
2	Ligne Pujiang/Chine	Bombardier		6
3	Ligne Port/Kobe/Japon		Kobelco	12
4	Ligne Rokko/Kobe/Japon		Kobelco	6
5	Ligne Nanko Port Town/Osaka/Japon	Autres		10
6	Ligne Yurikamome/Tokyo/Japon		Kobelco	16
7	Ligne Nippori-Toneri/Tokyo/Japon		Kobelco	13
8	Ligne Kanazawa Seaside/Yokohama/japon		Kobelco	14
9	Ligne 4/Busan/Corée du Sud		Kobelco	14
10	Ligne 3/Daegu/Corée du Sud	Autres		30
11	Ligne Kelana Jaya/Kuala Lumpur/Malaisie	Thales		5
12	Ligne Wenhui/Taipei/Taiwan	Bombardier		24
13	Métro léger Docklands/Londres/Angleterre	Thales		0
14	M1-M2/Copenhague/Danemark		Ansaldo STS	22
15	Ligne D/Lyon/France	Alstom		0
16	U2/Nuremberg/Allemagne	Siemens		0
17	U3/Nuremberg/Allemagne	Siemens		0
18	Ligne 1/Brescia/Italie		Ansaldo STS	17
19	Ligne M5/Milan/Italie		Ansaldo STS	19
20	Ligne 1/Turin/Italie		Siemens	21
21	M2/Lausanne/Suisse	Alstom		14
22	Ligne Verte/Dubaï/EAU	Thales		20
23	Monorail Palm Jumeirah/Dubaï/EAU	Autres		4
24	Ligne Rouge/Dubaï/EAU	Thales		29
25	Ligne Expo/Vancouver/Canada	Thales		0
26	Ligne Millenium/Vancouver/Canada	Thales		0
27	Ligne Canada/Vancouver/Canada	Thales		0

¹⁴ Union Internationale des Transports Publics.

¹⁵ UITP, Fully Automated Metro Operation 2018.

N°	Ligne/Ville/Pays	Fournisseurs du CBTC	Fournisseurs autres systèmes de contrôle	Stations équipées avec portes palières
28	REM/Montréal/Canada	Alstom		26
29	Lignes 1 et 2 de Riyadh	Siemens		35
30	Lignes 4, 5 et 6 de Riyadh	Alstom		23
31	Ligne 3 de Riyadh	Bombardier		20

Ligne 1 du métro léger de Turin¹⁶Métro léger M2 à Lausanne¹⁷Métro léger de Copenhague¹⁸

Figure 3-3 : Exemple des portes palières des systèmes de métro léger automatique (source : SYSTRA)

3.2 LE TRAMWAY

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).

La forte évolution du marché, le contexte de plus en plus concurrentiel (regroupement de constructeurs, arrivée de nouveaux acteurs), ont conduit à un élargissement des matériels proposés. Un large éventail de modules de base sont disponibles pour s'adapter aux besoins des projets.

Le système de guidage des tramways fer est basé sur le contact roue/rail. Ce contact constitue une interface sensible et nécessite l'entretien des pièces d'usure (reprofilage des roues du matériel roulant, et parfois rechargement du rail dans les zones soumises à de fortes contraintes). Le rail de roulement du tramway est fréquemment constitué de rails à gorge, permettant leur intégration dans un revêtement similaire à celui de la voirie, sans que les rails ne constituent un obstacle à d'autres circulations.

Le tramway 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 banalisé partagé avec la circulation automobile, aire piétonne, etc.

¹⁶ Source photo : urbanrail.net

¹⁷ Source photo : wikiwand

¹⁸ Source photo : dreamstime.com



Lyon – Plateforme infranchissable (voitures) et végétalisée



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



Tours (haut) et Montpellier – Aire piétonne

Figure 3-4 : Photos du tramway en France, source SYSTRA

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

Contrairement au métro léger automatique, 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 CBTC), qui assure l'espacement en sécurité entre les trains.

Généralement, la vitesse commerciale moyenne observée est de l'ordre de 18 à 23 km/h en milieu urbain (selon les conditions d'insertion, le nombre de carrefours franchis, etc.), en relation avec une maille de desserte à partir de 400 m entre stations.

En raison du fort impact que la circulation routière a sur l'exploitation du tramway, même avec une protection physique du site propre, le cadencement de la marche du tramway est souvent interrompu aux carrefours à feux. Les aléas ou événements (accidents, blocages) qui peuvent survenir aux carrefours ne peuvent pas être maîtrisés, même avec un système de priorité. Pour cette raison, l'intervalle d'exploitation d'un tramway pourra difficilement être inférieur à 3 minutes et 45 secondes et sa vitesse commerciale ne pourra pas dépasser les 26 km/h, à moins que les obstacles urbains sur sa route soient supprimés. Dans ce dernier cas, l'intervalle pourrait descendre jusqu'à 3 minutes.

En termes de droit, le tramway est un véhicule généralement « prioritaire » par rapport aux autres usagers de la route¹⁹. 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.

3.2.1 Le matériel roulant et ses caractéristiques générales

Le matériel roulant « Tramway » est conçu pour une durée de vie entre 25 et 30 ans.

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 est limitée en raison de l'impossibilité de la réduction de l'intervalle de service à moins de 3 minutes dans les meilleures conditions d'insertion, des caractéristiques des tissus urbains qui imposent une restriction au couplage des rames ou le rajout des modules (distance entre les intersections traversées).

La capacité d'un système de tramway peut varier considérablement, de manière générale entre 2 600 et 6 000 pphpd 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 pphpd, 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, etc.) et impose un taux de confort de plus de 5-6 passagers/m².



Citadis d'Alstom, Tours, France



Citadis d'Alstom, Rio de Janeiro, Brésil



Citadis d'Alstom, Casablanca, Maroc

Figure 3-5 : Exemple de tramways dans le monde (source : SYSTRA)

Le tableau suivant présente les caractéristiques générales du système tramway.

¹⁹ 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.

Tableau 3-4 : Les caractéristiques générales du tramway²⁰

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 % (pente limitée par des conditions hivernales, voir section 4.2)
Rayon de courbure minimal de 25 m, exceptionnellement 18m.
Priorité aux intersections
Distance entre les stations : +/- 400 m
Alimentation électrique : Ligne aérienne de contact ou batteries (le plus souvent 750 V) nb : des systèmes d'alimentation par le sol (APS) existent, mais ne peuvent être appliqués aux conditions climatiques de Québec
Fréquence : jusqu'à un tramway toutes les 3 minutes et 45 secondes par direction en fonction des types d'insertion
Capacité : entre 2 600 et 6 000 ²¹ passagers par heure par direction ; exceptionnellement 10 000 pphpd
Vitesse commerciale : 15-23 km/h, selon le niveau de protection de la plateforme
Véhicules articulés, rames couplées
Coût du matériel roulant (MR) : 3 à 6 M CA\$ par rame (simple)
Durée de vie du MR ²² : 25 à 30 ans
Coût d'investissement : de 25 à 100 M CA\$/km
Coût d'exploitation et d'entretien d'une ligne en moyenne : de 10 à 15 CA \$/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 constructeurs : Canadien « Bombardier » absorbée par le Français « Alstom », Finlandais/Tchèque « Škoda Transtech » et Espagnol « CAF », qui sont les principaux constructeurs sur

²⁰ 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.

²¹ En considérant un taux de confort de 4 pax/m².

²² La base pour les calculs comparatifs.

le marché du secteur des transports en commun sur rail. D'autres constructeurs²³ existent en plus des quatre présentés ci-dessous.

Les modèles suivants sont pris en exemple :

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

Tableau 3-5 : 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	48	51,9
Écartement (mm)	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 (nombre de passagers)	66	88	68	70
Capacité totale (nombre de passagers) (niveau de confort : 4 passagers / m ²)	237	213	240	304

3.3 LE TRAM-TRAIN

Le système tram-train correspond à un tramway qui circule sur des infrastructures ferroviaires et au sol dans un milieu urbain dense.

Les caractéristiques de lignes de tram-train peuvent être différentes suivant leur tracé, leurs performances (capacité de transport, intervalle, vitesse commerciale) et leur exploitation.

²³ 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 lignes comprennent habituellement à la fois des circulations empruntant des emprises "ferroviaires" et des emprises en insertion "tramway" classiques. Il s'agit d'un mode de transport avec conducteur.

Selon les configurations et l'insertion urbaine, une ligne de tram-train peut être à forte prédominance "tramway" ou "ferroviaire".

Les vitesses de circulation sont rapides sur la partie ferroviaire (proches de celle du métro automatique) et plus lentes sur la partie en insertion tramway (proches ou équivalentes à celles du tramway).

Selon les caractéristiques ou l'existence d'un réseau ferré historique exploité par des trains, les trams-trains peuvent circuler seuls sur la ligne ou alternés avec d'autres matériels roulants, c'est le principal intérêt de ce mode.

En fonction des zones du tracé, le tram-train :

- Circule à grande vitesse dans une emprise fermée, isolée des autres utilisateurs selon une conduite basée sur la signalisation ferroviaire ou évolue à plus basse vitesse dans un environnement ouvert en appliquant le principe de la marche à vue;
- Traverse à grande vitesse des intersections protégées par les passages à niveaux ferroviaires ou des carrefours routiers classiques à plus basse vitesse.

Le tram-train permet de desservir sur une même ligne, des zones denses en insertion urbaine de type tramway classique et des zones peu denses avec des stations plus éloignées les unes des autres sur une emprise ferroviaire fermée permettant de circuler plus rapidement.

Concernant la capacité du système, la portion exploitée comme un tramway conditionne la capacité de l'ensemble du système. En effet, la capacité d'une ligne de tram-train est comprise entre 2 600 et 6 000 pphpd selon la longueur et la largeur du matériel roulant. Exceptionnellement, la capacité va jusqu'à 10 000 pphpd avec un taux de confort de 5-6 passagers/m², en couplant deux rames de 34 m chacune, si les conditions urbaines du tronçon exploité comme un tramway peuvent accueillir une telle longueur des rames, comme dans le cas du tram-train de Porto. 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 tram-train constitue une réponse à ces besoins par sa polyvalence, étant capable de circuler comme un tramway ou comme un train de banlieue, avec des arrêts tous les 400 m à 2 000 m.



Tram-train T2 en région parisienne, insertion ferroviaire (haut) et urbaine (bas)

Tram-train Randstadrail au Pays-Bas, insertion en viaduc (haut) et insertion urbaine (bas)

Tram-train de Porto, insertion ferroviaire (haut et insertion urbaine (bas)²⁴

Figure 3-6 : Exemples de trams-trains dans le monde, source SYSTRA

3.3.1 Le matériel roulant et ses caractéristiques générales

Le matériel roulant « Tram-train » est fondamentalement le même que celui du mode tramway, avec des caractéristiques de confort, d’agencement intérieur, et d’insertion urbaine au niveau du sol équivalentes aux projets tramways.

Ce matériel roulant est apte à circuler à la fois sur des voies tramway en milieu urbain et sur une emprise isolée, en viaduc, en souterrain ou au sol.



Stadler, tram-train de Aarhus, Danemark

CAF, tram-train de Cadiz, Espagne

Alstom, tram-train T11, Île de France

Figure 3-7 : Exemple de trams-trains dans le monde

²⁴ Source photo : <http://transporturbain.canalblog.com>

4. ANALYSE COMPARATIVE DES MODES POUR LE CAS DE MONTRÉAL

L'intérêt de cette section est de développer une comparaison de la performance de chaque mode dans des conditions hivernales et des principales caractéristiques de performance dans le contexte particulier du projet de CDPQ Infra à Montréal (pente maximale, type de conduction/contrôle, intervalles minimaux, capacité de transport, vitesses commerciales, alimentation électrique et le matériel roulant).

4.1 CONDITIONS HIVERNALES

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

Il est essentiel de bien organiser le déneigement de l'infrastructure pour assurer la performance opérationnelle.

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

1. Les systèmes d'aiguillages doivent être réchauffés, par exemple, par des résistances électriques ou par des brûleurs à propane.
2. Les conditions de gel du sol doivent être suivies pour que l'infrastructure ne subisse pas de dommages dus aux gels et dégels (risque de déformation).
3. 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. Une attention particulière devra cependant être portée sur la cohabitation du déneigement de la voie ferrée et celle des voies routières pour éviter le transfert de la neige d'un endroit vers l'autre dans le cas d'un tramway ou d'un tram-train en insertion banalisée. Si les chutes de neige sont très importantes, plusieurs systèmes existent pour déneiger la voie. Le premier consiste à mettre en 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.
4. Il est essentiel d'empêcher l'entassement de neige dans les gorges du rail pour les tramways (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.
5. Par rapport à un métro léger, un tram ou un tram-train sera moins tolérant à des chutes de neige d'amplitude moyenne, et des interventions pour déneigement du rail à gorge devront être requises plus fréquemment que pour un métro.
6. La ligne aérienne de contact (LAC) ne nécessite pas de gestion hivernale particulière si l'amplitude horaire du réseau 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 Montréal est de 20 h (circulation entre 5AM à 1AM).
7. Les centres d'entretien doivent être clos et chauffés afin que les rames soient dégivrées.

8. Le matériel roulant doit être spécialement équipé pour empêcher la formation de gel dans les rames.

À titre d'exemple, la ville d'Edmonton (Canada) disposera d'un réseau de tramway fonctionnant lors de périodes hivernales (Valley Line). Le matériel roulant (Bombardier Flexity Freedom à plancher bas est équipé de dispositifs particuliers pour circuler dans des conditions extrêmes. Les tramways circuleront pendant les chutes de neige et les grands froids. Le matériel roulant Škoda Transtech du tramway de Helsinki (Finlande) est aussi équipé pour être exploité en conditions extrêmes : 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.

4.2 CARACTERISTIQUES GENERALES DES TROIS MODES ANALYSES

Le suivant tableau présente de façon synthétique la comparaison des principales caractéristiques des trois modes décrits ci-avant. Il est à noter que seules les caractéristiques propices pour les conditions hivernales sont prises en compte, ainsi que les conditions générées par le site à Montréal.

Tableau 4-1 : Caractéristiques des modes métro léger automatique, tramway et tram-train appliquées au cas de Montréal

	Métro léger automatique	Tramway	Tram-train
Conditions de circulation	Intégralement séparé du trafic de surface	Circulation en site propre à privilégier (performance du système), mais possibilité d'avoir des sites partagés avec les véhicules routiers ou les piétons	Circulation mixte sur site propre et sites partagés
Pente	4 % sur rail, extérieur (pour conditions hivernales) 5 % en tunnel	5 % - 6,5 %, extérieur (pour conditions hivernales) 7,5 % en tunnel	5 % - 6,5 % (pour conditions hivernales) 7,5 % en tunnel
Type de conduction /contrôle des trains	Sans conducteur / contrôle des trains par CBTC	Marche à vue avec conducteur	Signalisation ferroviaire conventionnelle et marche à vue avec conducteur
Rayon de courbure	Supérieur à 150 m	Minimum 25 m, exceptionnellement 18m	Supérieur à 40 m
Intersections	Voie ferrée isolée du contexte urbain	Priorité aux intersections	Priorité aux intersections et voie ferrée isolée selon la section

	Métro léger automatique	Tramway	Tram-train
Conditions de circulation	Intégralement séparé du trafic de surface	Circulation en site propre à privilégier (performance du système), mais possibilité d'avoir des sites partagés avec les véhicules routiers ou les piétons	Circulation mixte sur site propre et sites partagés
Distance entre stations	800 m à 2 000 m	400 m à 600 m	400 m à 2 000 m
Intervalle minimale	1,5 minute par direction tronc commun 3 minutes par branche	3 minutes 45" par direction tronc commun 7 minutes 30" par branche	3 minutes 45" par direction tronc commun 7 minutes 30" par branche
Capacité	12 000 pphpd avec du matériel roulant de 2 voitures et un intervalle de 90 s sur le tronc commun et 6000 pphpd sur les branches	5 000 pphpd avec des rames de 40 m et un intervalle de 3 min 45" sur le tronc commun et 2 500 pphpd sur les branches	6 800 pphpd avec des rames de 40 m et un intervalle de 3 min 45" sur le tronc commun et 3 400 pphpd sur les branches
Vitesse commerciale	Environ 42 km/h	Environ 29 km/h	Environ 35 km/h
Alimentation électrique	3 ^e rail ou Caténaire (750V ou 1500V)	Ligne aérienne de contact (le plus souvent 750V)	Ligne aérienne de contact ou caténaire (le plus souvent 750V en centre-ville/1500Vcc)
Matériel roulant	Véhicules articulés de 2 voitures d'environ 40 m	Véhicules articulés d'environ 40 m	Véhicules articulés d'environ 60 m

Source : SYSTRA

4.3 COMPARAISON/EVALUATION DES TROIS MODES ANALYSES POUR LE REM DE L'EST

Principaux éléments discriminants en défaveur du tramway :

- La vitesse commerciale faible entraîne un mode de transport peu attractif (perte de plus de 50 % de l'achalandage).
- L'intervalle minimal sur tronçon central entre 3,45 et 4 min entraîne 7 min 30'' au mieux sur les branches. Réduire l'intervalle à moins de 3 min 45 entraînerait des impacts majeurs sur les conditions de circulations du centre-ville de Montréal. La circulation routière sur les axes majeurs traversant René-Lévesque nécessite le maintien de leur capacité.
- La capacité (2 500 pphpd) offerte sur les branches ne permet pas de répondre à la demande. En effet, malgré la baisse d'achalandage lié à une attractivité plus faible, la demande reste supérieure à la capacité ultime sur les branches.
- Nécessité de priorités aux feux et modification de plusieurs intersections (fermetures ou obligations de tourner à droite) avec impacts importants pour les axes traversants.

Critères	Métro léger		Tramway		Tram-Train (ligne mixte)	
	Qualitatif	Quantitatif	Qualitatif	Quantitatif	Qualitatif	Quantitatif
Vitesse commerciale et achalandage	Très bonne : vitesse élevée, 35 à 45 km/h	++	Faible : vitesse variant de 17 à 25 km/h selon les projets.	--	Moyenne ou bonne selon l'insertion.	+
Intervalle et régularité	Possibilité d'exploiter à des intervalles très performants de 90s. Régularité optimale car mode de transport totalement isolé.	++	Les intervalles atteignables sont de l'ordre de 3'45 à 4 minutes seulement le long du boulevard René-Levesque. Pour offrir une certaine régularité, des systèmes de priorité aux feux, actifs pour 90% des franchissements en moyenne, sont nécessaires. La régularité est très sensible aux circulations routières denses. La configuration de la ligne à deux	--	Idem au tramway pour la partie en insertion urbaine au niveau de la voirie. Les perturbations engendrées sur le tronçon en insertion urbaine se répercutent sur le reste des lignes également.	+/-

Critères	Métro léger		Tramway		Tram-Train (ligne mixte)	
	Qualitatif	Quantitatif	Qualitatif	Quantitatif	Qualitatif	Quantitatif
			branches amplifie les perturbations subies sur chaque branche en imposant des ralentissements pour régulation d'intervalle sur les deux branches.			
Accidentalité	Aucune possibilité d'accident à l'intérieur des voies	++	Risques d'accidents routiers aux intersections à feux qui peuvent bloquer le système outre les risques humains.	--	Les risques sont similaires au tramway dans la section insérée au niveau de la voirie.	--
Insertion urbaine le long du tracé	Totalement isolée des autres utilisateurs de la voirie. Nécessite de créer une infrastructure dédiée aérienne ou souterraine, et un effort architectural conséquent dans le cas d'une solution aérienne.	+-	Inséré dans le tissu urbain. Peu d'infrastructures intrusives.	++	Insertion mixte : similaire au métro léger ou au tramway selon le type d'insertion.	+-
Impact sur la circulation routière	Nul car mode isolé	++	Capacité longitudinale réduite par les voies de circulation routière transférées au tramway. Impact fort sur la capacité transversale : les capacités des mouvements sécants peuvent être réduites de 25 à 30% à l'heure de pointe.	-	Insertion mixte : similaire au métro léger ou au tramway selon le type d'insertion.	+
Accessibilité	Bonne	+	Bonne : quais au niveau de la voirie	+	Similaire au métro léger ou au tramway en fonction de l'insertion.	+

Critères	Métro léger		Tramway		Tram-Train (ligne mixte)	
	Qualitatif	Quantitatif	Qualitatif	Quantitatif	Qualitatif	Quantitatif
Réseaux techniques urbains	Impact réduit aux piles et aux stations	+	Impact majeur tout le long du tracé	-	Similaire au métro léger ou au tramway en fonction de l'insertion.	+/-
Qualité des correspondances avec le réseau TC	Excellente avec le métro Bonne à excellente avec le bus	++	Excellente avec le bus (au même niveau de la voirie) Bonne avec le métro	+	Excellente avec le bus Bonne avec le métro	+
Impact sur la circulation routière	Nul car mode isolé	++	Capacité longitudinale réduite par les voies de circulation routière transférées au tramway. Impact fort sur la capacité transversale : les capacités des mouvements sécants peuvent être réduites de 25 à 30% à l'heure de pointe.	-	Insertion mixte : similaire au métro léger ou au tramway selon le type d'insertion.	+
Capacité d'achalandage	La possibilité d'opérer à intervalle réduit offre une flexibilité sur l'offre de transport et permet d'équilibrer au mieux le service sur chacune des branches en conservant un intervalle acceptable même en cas de desserte dissymétrique.	++	L'intervalle minimal, entre 3'45 et 4 minutes, constitue la limite majeure à la capacité d'achalandage sur tronçon commun, ce qui impose de fait une desserte symétrique sur chaque branche. De plus la sensibilité aux perturbations impose des marges d'exploitation plus grandes, d'où une perte globale d'efficacité	--	Les contraintes du tramway sur le tronçon commun au niveau de la voirie s'appliquent également au tram-train, quel que soit le mode d'insertion sur les branches.	--
Réponse à la demande	Grâce à une fréquence potentielle très élevée sur le tronçon central, on garde une très bonne capacité sur les		La capacité de 3 min 45 sur le tronçon central impose un intervalle très grand sur les branches : 7 min 30" au mieux.		Même si la vitesse commerciale est supérieure au tramway, la limite de capacité	

Critères	Métro léger		Tramway		Tram-Train (ligne mixte)	
	Qualitatif	Quantitatif	Qualitatif	Quantitatif	Qualitatif	Quantitatif
	branches (3 min sur les branches si 90 sec sur le tronçon central). Ce qui permet de répondre à la demande à long terme (capacité de 12 000 pphpd sur le tronçon central et de 6 000 pphpd sur les branches). La demande à l'horizon 2044 est estimée à 5 000 sur les branches et à 7 500 sur le tronçon central		Cette limite ne permet d'offrir que 2 500 pphpd sur les branches ce qui est insuffisant pour répondre à la demande sur chaque branche		est la même que sur le tramway. Cette limite ne permet d'offrir que 3 400 pphpd sur les branches ce qui est insuffisant pour répondre à la demande sur chaque branche	
Intégration réseau	La vitesse commerciale de bout en bout évite aux usagers de faire un transfert	++	La faible vitesse commerciale entraîne de nombreux usagers à transférer vers une ligne de métro dès que possible	--	La faible vitesse commerciale dans les sections en insertion au sol entraîne de nombreux usagers à transférer vers une ligne de métro.	+/-
Cout relatif (% entre modes)	Élevé	-	Faible	++	Moyen	+
Cout d'exploitation	Mode le moins cher en exploitation	++	Double du cout du métro sans conducteur	-	Double du cout du métro sans conducteur	-

5. RECOMMANDATION

Le choix d'un mode de transport est fonction de la capacité attendue, des paramètres influant sur l'attractivité pour les voyageurs potentiels et des contraintes physiques d'insertion.

Dans le cas du REM de l'Est, les considérations principales sont les suivantes :

- Sensibilité forte de l'achalandage aux vitesses commerciales (selon les études menées par STEER) ; le métro léger est le plus approprié. Le tram-train serait une alternative à considérer mais la perte de vitesse commerciale en centre-ville avec un insertion au sol est préjudiciable. Cette préférence vers le métro léger est appuyée par sa sensibilité quasi nulle à toute perturbation de circulation (voir le tableau de synthèse des prévisions d'achalandage ci-dessous).

Tableau 5-1 : Caractéristiques de l'exploitation des trois modes analysés, PPAM et à l'horizon 2044

Modes	Passagers par heure par direction			Capacité offerte tronc commun (pphpd)	Capacité offerte par branche (pphpd)	Vitesse commerciales (km/h)
	Tronc commun	Branche nord	Branche est			
Métro léger automatique	7 518	4 927	4 548	12 000 ²⁵	5 145	42,7
Tramway	3 056	2 431	2 829	5 000 ²⁶	2 500	28,9
Tram-train	5 389	3 855	3 908	6 800 ²⁷	3 400	35,6

On note de ce qui précède qu'une faible vitesse commerciale pour le tramway induit une perte de plus de 50 % de l'achalandage selon les simulations menées par STEER

- Les études menées par STEER démontrent un potentiel élevé de demande qui peut être servi adéquatement et en totalité par un mode métro léger automatique, l'attractivité des deux autres modes est plus faible et ils ne sont en mesure de répondre que partiellement à la demande.
- En effet, l'attractivité des modes tramway et tram-train est déjà plafonnée sur les branches Nord et Est, car aucun des deux modes ne pourra diminuer son intervalle de service en raison des contraintes de circulation sur le tronc commun, au centre-ville, où la conduite à vue s'impose.
- Configuration de la ligne en deux branches : les contraintes de régularité et de maintien d'un intervalle raisonnable sur les branches sont en faveur du métro léger. En effet, avec une fréquence maximale sur le tronçon central de 3 min 45", la fréquence atteignable sur les branches n'atteindra

²⁵ En utilisant un intervalle de 90 sec, rames de 300 passagers

²⁶ En utilisant des rames de 44 m de longueur et 2,65 m de largeur

²⁷ En utilisant deux rames de 32 m de longueur couplées

au mieux que 7 min 30". Par ailleurs la régularité de l'intervalle devient difficile à maintenir lorsqu'une ligne de tramway dépasse 25km, qui plus est en configuration à deux branches.

- En revanche, le mode métro léger automatique pourra offrir à long terme un intervalle de service minimale de 1 min 30" sur le tronç commun et de 3 minutes sur les deux branches.
- La typologie de l'achalandage entre les branches et le centre-ville pour le cas du tramway et du tram-train montre que l'achalandage spécifique à ce mode peut être assuré en centre-ville. Cependant, du fait de la configuration spécifique du REM de l'Est en deux branches et de la limite d'intervalle en découlant, le service ne pourra pas répondre adéquatement à la demande sur les branches.
- Préservation des circulations routières sur le Boulevard René-Levesque : cet axe est-ouest assure une fonction forte de desserte du centre-ville. Les flux longitudinaux et surtout les flux sécants ne peuvent être préservés que dans le cadre d'un projet de métro léger, sauf à procéder à une réorganisation en profondeur du plan de circulation routière de Montréal et de son Centre élargi et à requalifier la vocation du boulevard René-Levesque.
- Préservation de l'environnement urbain : le tramway est le mode de transport le moins visuellement intrusif. En contrepartie c'est le mode de transport qui, par la largeur de son corridor, conduit à la réorganisation la plus importante des espaces publics et des réseaux d'utilités publiques.
- Coût de construction et d'exploitation : si le métro léger est plus onéreux à construire, il est plus économique à exploiter. L'équilibre financier n'est pas considéré ici, car relevant des choix de CDPQ Infra.

En conclusion, le contexte de Montréal, la typologie en 2 branches du projet du REM de l'Est et les résultats des simulations, tant en volume qu'en sensibilité, aboutissent à la recommandation d'adopter le mode de métro léger.

