

RÉVISION ET VALIDATION DE L'ANALYSE COMPARATIVE DES MODES LOURDS SUR RAIL RÉALISÉE PAR SYSTRA POUR LE RSTC DE QUÉBEC

Octobre 2019

Robert Gagné et Jacques Roy
Professeurs HEC Montréal

HEC MONTRÉAL



PLAN DE LA PRÉSENTATION

- 1- Introduction et mandat
- 2- Les quatre modes considérés
- 3- Les deux modes retenus pour l'analyse: tramway et métro
- 4- Analyse comparative de villes comparables
- 5- Conclusion

INTRODUCTION

- Notre mandat consiste à produire une contre-expertise de la méthodologie et de l'analyse faite par SYSTRA Canada dans le mandat que lui a confié la Ville de Québec de réaliser une analyse comparative des modes structurant de transport.
- Nous avons eu plusieurs échanges avec SYSTRA afin de commenter la méthodologie utilisée et les résultats préliminaires obtenus. Nous croyons que ces échanges ont permis de bonifier le rapport final de SYSTRA.
- Nous estimons que les informations contenues dans le rapport de SYSTRA nous permettent de porter un jugement éclairé sur l'analyse des modes lourds sur rail considérés dans cette étude. Nous avons toutefois cru bon de fournir des informations et explications supplémentaires afin de mieux informer le lecteur.

2.

ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES QUATRE SYSTÈMES DE TRANSPORT RETENUS

L'analyse porte sur les quatre modes de transport suivants:

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

LE TRAMWAY



- Système urbain sur rails
- Très populaire à travers le monde (388 villes, 53 pays)
- Le conducteur adapte sa conduite à son environnement
- Sa performance, et donc son attractivité, repose sur le taux de priorité qui lui est accordé aux carrefours
- Capacité variant de 2 600 à 6 000 passagers/heure
- S'intègre bien au milieu urbain avec une distance interstation de 400 mètres qui permet une desserte de proximité
- Des plans d'entretien adaptés permettent son fonctionnement dans des conditions hivernales difficiles

LE TRAIN LÉGER SUR RAIL (SLR)



- Mode de transport en commun urbain et interurbain
- Capacité pouvant atteindre 25 000 passagers/heure
- En site propre exclusif et fermé, avec ou sans conducteur (automatique)
- Peut circuler comme un métro ou comme un train de banlieue
- Nécessite un plan d'entretien hivernal

LE MONORAIL



- Mode de transport surélevé et guidé sur un rail unique
- Généralement utilisé sur de courtes distances
- Ses infrastructures surélevées lui permettent de s'affranchir des interactions avec les autres modes
- Peut être monté sur un rail central ou suspendu
- Stations sont dotées d'ascenseurs ou d'escaliers mécaniques
- Fort impact visuel, futuriste pour certains
- Capacité de 4 000 à 30 000 passagers/heure
- Peut représenter des défis pour s'adapter aux conditions hivernales



LE MÉTRO (SOUTERRAIN)



- Mode de transport rapide généralement utilisé dans les zones à forte densité urbaine et démographique
- Très forte présence à travers le monde (157 villes)
- Infrastructure entièrement dédiée
- Capacité jusqu'à 40 000 personnes/heure
- Nouveaux projets adoptent un fort niveau d'automatisation (partielle ou complète)
- Pas besoin de mesures particulières en hiver



ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES QUATRE MODES

Une première analyse a permis à SYSTRA d'éliminer deux des quatre modes de transport considérés sur la base des critères suivants :

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

L'INSERTION ET LES DIFFICULTÉS DE CONSTRUCTION

- Sur la base de ce critère, c'est le métro qui l'emporte car sa construction en site propre exclusif souterrain n'engendre pas de conflits avec d'autres modes de transport. Cependant, l'étude de SYSTRA souligne le manque d'informations sur la nature des terrains traversés et leur comportement lors de travaux, ce qui ne permet pas de garantir la faisabilité technique d'un tunnel sur l'intégralité du tracé.
- Le monorail qui est surélevé n'entre pas en conflit avec les autres modes mais son insertion dans la ville de Québec peut être problématique en raison du caractère patrimonial et classé de ce site exceptionnel.
- Le tramway s'intègre bien dans un milieu urbain et est très accessible. Il s'insère dans un site dédié et/ou banalisé nécessitant une gestion de la circulation.
- Quant au train léger sur rail, son insertion est la plus difficile car il doit être intégralement séparé du trafic de surface et nécessite une gestion importante de la circulation.

LA FIABILITÉ DES SYSTÈMES

- Sur ce critère, c'est le métro qui l'emporte avec sa plus grande vitesse d'exploitation, sa régularité et sa fiabilité, même en hiver.
- Le train léger et le tramway offrent une bonne régularité mais ils peuvent être affectés par les conditions hivernales de grande ampleur si les mesures nécessaires de prévention ne sont pas adoptées.
- De plus, le tramway peut subir les aléas du réseau routier et de la vie urbaine et sa vitesse commerciale est inférieure à celle des autres modes.
- Le monorail jouit d'une vitesse d'exploitation élevée, tout comme le SLR et le métro, mais il pourrait subir des irrégularités de service durant l'hiver comme le démontre l'exemple de Moscou, une des seules villes ayant exploité un monorail et offrant des conditions hivernales semblables à celles de Québec. Le monorail n'est d'ailleurs plus en service à Moscou, notamment à cause des difficultés d'exploitation en hiver.

LA DISPONIBILITÉ TECHNOLOGIQUE

- Ce critère consiste à savoir si un système de transport peut être offert par plusieurs constructeurs.
- À ce chapitre, le tramway, le train léger sur rail et le métro profitent d'un contexte concurrentiel suffisamment large et diversifié.
- Par contre le monorail n'est offert que par un nombre limité de constructeurs avec des systèmes non compatibles, ce qui représente une menace pour la maintenabilité et la durabilité à long terme.

LES COÛTS DES SYSTÈMES

- Le tableau ci-dessous, tiré de l'étude de SYSTRA, récapitule les coûts associés aux quatre modes étudiés.
- On constate que le métro est considérablement plus dispendieux que les autres modes alors que le tramway est le mode qui requiert le moins d'investissements.

	Tramway	Train léger sur rail	Monorail	Métro
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

TABLEAU RÉCAPITULATIF

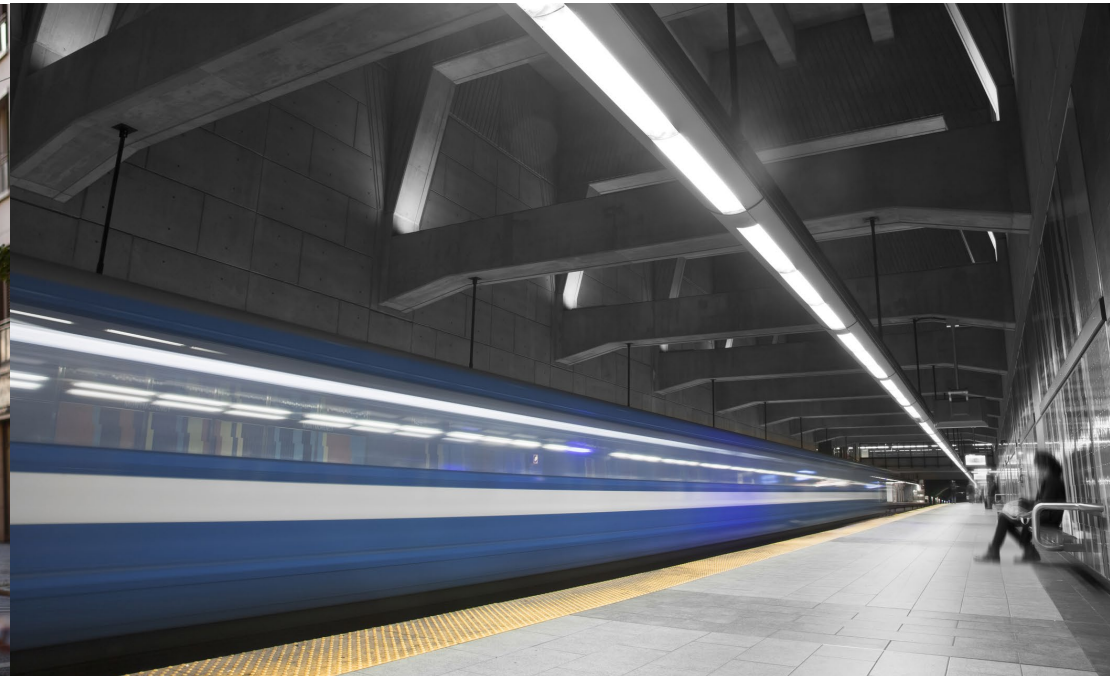
Le tableau suivant, tiré de l'étude de SYSTRA, résume l'analyse préliminaire des quatre modes et nous permet de conclure que le train léger sur rail et le monorail devraient être exclus pour permettre une analyse plus approfondie des deux modes dominants.

	Tramway	Train léger sur rail	Monorail	Métro
Exigences d'insertion et effort de construction	+	- - -	-	+
Fiabilité des systèmes dans des conditions hivernales	+	+	- - -	+
Disponibilité technologique	+	+	- - -	+
Coûts	+	- - -	+	- - -

Légende: (+) avantages (-) désavantages
Les modes retenus sont en vert dans le tableau.

3.

ANALYSE COMPARATIVE tramway / métro souterrain



3.1 LE TRAMWAY

a) Données de base

- Tracé prévu: 23 kilomètres
- Nombre de stations: 35
- Capacité: entre 2 600 et 6 000 passagers/heure par direction selon équipement
- Coûts de construction du projet RSTC (partie tramway seulement):
 - 2 262 M\$ (en mars 2019 selon le bureau de projet RSTC)
 - Coût moyen des systèmes de tramway de 25 à 45 M\$/km (selon SYSTRA), soit de 575 M\$ à 1 035 M\$ pour 23 kilomètres
 - L'estimation des coûts moyens d'un tramway par km selon SYSTRA exclut certains coûts, notamment les parties en tunnel spécifiques au projet de Québec et les coûts liés aux conditions hivernales (construction et exploitation)
- Coûts d'opération: coût moyen de 10 à 15 \$/véh.km (selon SYSTRA) vs environ 10\$/véh.km selon le bureau de projet RSTC (moyenne pour l'ensemble du réseau structurant incluant nouveau service de bus)

LE TRAMWAY (suite)

b) Le tramway en hiver

- Les technologies disponibles permettent de contrôler les accumulations de neige (surtout au sol) et de glace (au sol et sur les lignes aériennes). Toutefois, ces technologies augmentent les coûts de construction du projet et également les coûts d'exploitation.
- Les coûts additionnels liés aux conditions hivernales pour la construction et l'exploitation ne sont pas pris en compte dans les estimations fournies par SYSTRA car elles s'appuient sur les coûts de différents systèmes, mais ils le sont dans celles présentées par le bureau de projet RSTC.
- Malgré cette différence, les coûts d'exploitation présentés par le bureau de projet RSTC sont inférieurs aux coûts d'exploitation observés et rapportés par SYSTRA.
- Il s'agit là d'un élément qui demanderait une validation additionnelle.

LE TRAMWAY (suite)

c) Analyse de l'achalandage du tramway

- L'achalandage dépend de plusieurs facteurs: densité de population, niveau de congestion, attrait du transport public, etc...
- Le niveau d'attrait du transport public dépend lui de l'offre de transport: mode, fréquence, prix, vitesse de déplacement, niveau de confort perçu par les usagers, accessibilité (notamment le nombre de stations), etc.
- Mis ensemble, ces facteurs permettent de prévoir l'achalandage.

LE TRAMWAY (suite)

Divers scénarios d'achalandage sont prévus pour le tramway en 2026 et 2041. Ils sont calculés en considérant une rame d'une capacité de 260 passagers à raison de 3,3 passagers par mètre carré (niveau de confort relativement élevé) vs 4 passagers par mètre carré (norme européenne).

	2026			2041		
Fréquence (minutes)	3	4	5	3	4	5
Achalandage ¹	3 200	3 200	3 200	3 600	3 600	3 600
Capacité ²	5 200	3 900	3 120	5 200	3 900	3 120
Taux d'utilisation (%)	62	82	103	69	92	115

1- Passagers par heure et par direction calculés à partir de l'étude d'achalandage;

2- Capacité en heures de pointe.

LE TRAMWAY (suite)

d) Résultats

- L'achalandage ne varie pas en fonction des divers scénarios de fréquence retenus (3, 4 ou 5 minutes) car sa sensibilité aux fréquences n'a pas été mesurée.
- Le niveau de confort retenu est assez élevé à 3,3 passagers par mètre carré, ce qui surpasse la norme européenne (4,0) et la norme maximale (6,0).
- Une fréquence de passages aux 5 minutes en heure de pointe atteint ou dépasse la capacité en tenant compte du niveau de confort souhaité.
- Une fréquence de passages aux 3 ou 4 minutes en période de pointe entraîne un taux d'utilisation de la capacité allant de 62 à 92 %.
- SYSTRA recommande dans ce contexte un tramway à une fréquence de passages aux 4 minutes en heures de pointe pour une rame de 260 passagers.
- Ce système permettrait de répondre à la demande au moins jusqu'en 2041.
- Une fois la capacité presque atteinte, il est toujours possible d'augmenter la fréquence aux 3 minutes par passage en pointe, soit 69 % de la capacité en 2041.
- On pourrait aussi augmenter la capacité par couplage de véhicules.

LE TRAMWAY (suite)

e) Conclusions sur le tramway

- Avec ses 23 kilomètres et ses 35 stations (moyenne d'environ 660 mètres entre les stations), le projet de tramway permet de satisfaire la demande prévue bien au-delà de 2041. Ainsi, avec une fréquence aux 3 minutes, le taux d'utilisation de la capacité prévu en 2041 est de 69%.
- À titre de comparaison, la ligne verte du métro de Montréal s'allonge sur 22 kilomètres et compte 27 stations (moyenne de 800 mètres entre les stations) alors que la ligne orange, toujours à Montréal, s'allonge sur 30 kilomètres pour 31 stations (moyenne de 1 km entre les stations). Le tramway proposé présente donc un niveau d'accessibilité tout à fait comparable au métro de Montréal, voire même supérieur. De plus, la plupart des stations prévues sont en surface, ce qui procure un avantage certain en terme d'accessibilité et de temps de correspondance.
- La vitesse du tramway dépendra entre autres du système de gestion de la circulation mis en place. L'attribution de passages prioritaires aux intersections aura un impact considérable sur la vitesse, particulièrement en pointe.
- Le coût estimé du projet de tramway par le bureau de projet du RSTC, clés en mains, s'élève à 2 262 M\$ (mars 2019), incluant les coûts additionnels qu'entraîne une opération hivernale et la construction de deux tunnels.

3.2 LE MÉTRO SOUTERRAIN

a) Données de base

- Tracés prévus: 16,3 km (court) et 20,5 km (long)
- Nombre de stations: indéterminé
- Capacité: entre 20 000 à 40 000 passagers/heure par direction selon équipement
- Coûts moyens du projet (partie métro seulement):
 - Moyenne de 100 à 200 M\$/km (selon SYSTRA)
 - De 1 630 à 3 260 M\$ pour 16,3 kilomètres (court)
et de 2 050 M\$ à 4 100 M\$ pour 20,5 km (long)
- Moyenne des coûts d'opération: de 11 à 17\$/véh.km (selon SYSTRA)

LE MÉTRO SOUTERRAIN COURT

Divers scénarios d'achalandage sont prévus pour le métro court en 2026 et 2041. Ils sont calculés en considérant une rame d'une capacité de 900 passagers, soit 6 voitures de 150 passagers à raison de 3,3 passagers par mètre carré (niveau de confort relativement élevé) vs 4 passagers par mètre carré (norme européenne).

	2026			2041		
Fréquence (minutes)	3	4	5	3	4	5
Achalandage ¹	3 600	3 600	3 600	4 200	4 200	4 200
Capacité ²	18 000	13 500	10 800	18 000	13 500	10 800
Taux d'utilisation (%)	20	27	33	23	31	39

1- Passagers par heure et par direction calculés à partir de l'étude d'achalandage;

2- Capacité en heures de pointe.

LE MÉTRO SOUTERRAIN COURT (suite)

b) Résultats métro court (16,3 km)

- Tout comme pour le tramway, l'achalandage ne varie pas en fonction des divers scénarios de fréquence retenus car sa sensibilité aux fréquences n'a pas été mesurée.
- Le niveau de confort retenu est assez élevé à 3,3 passagers par mètre carré, ce qui surpasse la norme européenne (4,0) et la norme maximale (6,0).
- Pour une rame de 6 voitures (capacité de 900 passagers par heure et par direction), le taux d'utilisation maximal obtenu en pointe est de 39% en 2041 pour une fréquence aux 5 minutes.
- En coupant la rame de moitié (3 voitures), on arrive à un taux d'utilisation de 78% en 2041 pour une fréquence aux 5 minutes.
- En 2026, au moment de la mise en service, une rame coupée de moitié présenterait un taux d'utilisation de 66% en heure de pointe, toujours en supposant une fréquence aux 5 minutes.
- Le métro court, même en utilisant une rame de seulement 3 voitures, apparaît clairement surdimensionné, du moins pour les 15 premières années d'opération.

LE MÉTRO SOUTERRAIN LONG

Divers scénarios d'achalandage sont prévus pour le métro long en 2026 et 2041. Ils sont calculés en considérant une rame d'une capacité de 900 passagers, soit 6 voitures de 150 passagers à raison de 3,3 passagers par mètre carré (niveau de confort relativement élevé) vs 4 passagers par mètre carré (norme européenne).

	2026			2041		
Fréquence (minutes)	3	4	5	3	4	5
Achalandage ¹	3 700	3 700	3 700	4 200	4 200	4 200
Capacité ²	18 000	13 500	10 800	18 000	13 500	10 800
Taux d'utilisation (%)	21	27	34	23	31	39

1- Passagers par heure et par direction calculés à partir de l'étude d'achalandage

2- Capacité en heures de pointe.

LE MÉTRO SOUTERRAIN LONG (suite)

c) Résultats métro long (20,5 km)

- Le métro long attire peu de nouveaux passagers par rapport au métro court.
- Tout comme le métro court, et même en utilisant une rame de seulement 3 voitures, le métro long apparaît clairement surdimensionné, du moins pour les 15 premières années d'opération.
- Pour mémoire, la ligne bleue du métro de Montréal fonctionne avec des rames de 6 voitures alors que le reste du réseau fonctionne avec des rames de 9 voitures.
- Un système de métro est généralement composé de 6 à 12 voitures.

LE MÉTRO SOUTERRAIN

d) Conclusions sur le métro souterrain

- Qu'il s'étende sur 16,3 km ou sur 20,5 km, le métro souterrain apparaît clairement surdimensionné compte tenu de l'achalandage anticipé, même en 2041.
- Selon SYSTRA, un métro souterrain pourrait être optimal selon deux scénarios en pointe:
 - 1) Une rame de seulement 2 voitures (300 passagers) aux 4 minutes entraînerait un taux d'utilisation de 80 % en 2026 et de 93 % en 2041 dans le cas d'un métro court selon nos calculs; ces taux seraient sensiblement les mêmes pour le métro long, soit 82 % en 2026 et 93 % en 2041.
 - 2) Une rame de 6 voitures (900 passagers) aux 13 minutes.
- Aucun métro du monde n'opère dans de telles conditions.
- Les coûts d'opération d'un métro souterrain se comparent à ceux d'un tramway.
- Sur la base des coûts moyens observés ailleurs, les coûts de construction sont de 4 à 5 fois plus élevés, selon SYSTRA.

LE MÉTRO SOUTERRAIN (suite)

d) Conclusions sur le métro souterrain (suite)

- Ainsi, selon les coûts moyens observés par SYSTRA, les coûts d'un métro souterrain de 16,3 km pourraient se situer entre 1 630 M\$ et 3 260 M\$ alors que les coûts maximum d'un tramway de 23,6 km seraient de 1 062 M\$.
- Comme les coûts pour la partie tramway à Québec sont estimés à 2 262 M\$, on peut raisonnablement supposer qu'une analyse plus détaillée d'un scénario métro conclurait à des coûts pour un métro souterrain à Québec significativement plus élevés que la fourchette de 1 630 M\$ à 3 260 M\$ basée sur les observations moyennes de SYSTRA.
- À titre de comparaison, le projet de prolongement de la ligne bleue à Montréal est à ce moment-ci estimé à 4 500 M\$ pour 5,8 km et 5 stations, soit 776 M\$/km.
- À Toronto, le projet d'expansion «Ontario Line» est estimé à 10 900 M\$ pour 15,5 km et 15 stations, soit 703 M\$/km.
- Il semble y avoir beaucoup d'incertitude concernant les coûts de construction d'un métro souterrain et les estimations fournies par SYSTRA, calculées sur la base d'observations de projets réalisés ailleurs, nous apparaissent très optimistes.
- En prenant la moyenne de la ligne bleue à Montréal et de la Ontario Line à Toronto, soit environ 740 M\$/km, un métro de 16,3 km à Québec pourrait coûter plus de 12 000 M\$.

4.

ANALYSE DE VILLES AYANT UN TRAMWAY OU UN MÉTRO

- Pour compléter l'analyse comparative des modes tramway et métro, nous présentons une analyse sommaire des caractéristiques de villes ayant adopté des systèmes de transport comportant un tramway ou un métro.
- Cette comparaison nous permet d'observer que les villes ayant des caractéristiques semblables à celles de Québec ont plutôt tendance à adopter le tramway alors que celles ayant choisi le métro ont toutes des densités de population plus élevées que Québec.



PETITES VILLES AYANT ADOPTÉ LE MÉTRO

On constate que parmi les plus petites villes, en termes de population, qui ont adopté le métro, aucune ne présente une densité de population inférieure à celle de Québec.

Ville	Population		Densité (hab./km ²)
	Ville	Agglomération	
Québec (pour comparer)	531 902	805 061	1 171
Oslo (Norvège)	673 469	1 000 467	1 374
Catane (Italie)	311 620		1 732
Cleveland (USA)	396 678	1 780 673	1 972
Brescia (Italie)	196 745	672 822	2 200
Gênes	580 097		2 400
Lausanne	139 056	420 000	3 400
Rennes	222 104	727 357	4 400

Source: Données les plus récentes disponibles selon de multiples sources.
Elles peuvent varier selon la région considérée.

EXEMPLES DE VILLES AYANT ADOPTÉ LE TRAMWAY

On constate que plusieurs villes françaises ayant adopté le tramway possèdent des caractéristiques semblables à celles de la ville de Québec.

Agglomérations	Population	Densité (hab./km ²)
Toulouse	948 433	4 100
Québec (pour comparer)	805 061	1 171
Bordeaux	783 081	1 354
Nantes	638 931	1 221
Strasbourg	491 409	1 456
Montpellier	465 070	1 103
Grenoble	443 123	819

Source: Données les plus récentes disponibles selon de multiples sources.

5.

CONCLUSION

5.1 Analyse préliminaire

- Dans son étude, SYSTRA a réalisé une première analyse des quatre modes lourds sur rail en fonction des critères suivants: 1) l'insertion et les difficultés de construction, 2) la fiabilité des systèmes dans les conditions hivernales de Québec, 3) la disponibilité technologique, et 4) les coûts des systèmes.
- Sur la base de cette analyse, le train léger sur rail et le monorail ont été exclus et seuls le tramway et le métro ont été retenus pour une analyse plus approfondie.
- Le train léger sur rail a été éliminé surtout à cause des difficultés d'insertion dans le corridor urbain proposé et des coûts élevés d'investissement et d'exploitation. Il crée aussi une barrière étant donné qu'il est sur un site propre exclusif.
- Quant au monorail, il a été exclu en vertu de l'incertitude quant à sa fiabilité dans les conditions hivernales et du peu de fournisseurs offrant cette technologie. Son insertion dans un milieu patrimonial comme Québec peut aussi être problématique.

CONCLUSION (suite)

5.2 Analyse comparative tramway et métro

- Une analyse plus poussée du tramway et du métro révèle que les deux modes peuvent répondre à la demande et aux besoins des usagers.
- Il s'avère cependant que le métro est nettement surdimensionné par rapport à l'achalandage prévu en 2026 et en 2041.
- Le métro est également beaucoup plus coûteux que le tramway et il ne pourrait certainement pas être construit dans le cadre du budget prévu et ce, même si une version plus courte était proposée.
- En s'appuyant sur des projets récents de métro à Montréal et à Toronto, les investissements requis pour un métro à Québec seraient tout simplement exorbitants.

CONCLUSION (suite)

5.3 Analyse comparative d'autres villes dans le monde

- Nous avons cru bon de comparer les caractéristiques de Québec (population et densité de population) à celles d'autres villes ayant déployé des services de tramway et de métro.
- On observe que, même en considérant les plus petites agglomérations, aucune ville ayant adopté le métro ne présente une densité de population inférieure à celle de Québec.
- Par ailleurs, on trouve de nombreux exemples d'agglomérations françaises de taille semblable qui ont adopté le tramway comme élément central de leur réseau structurant.
- Enfin, de nombreuses villes ayant des hivers semblables à ceux de Québec (Stockholm, Oslo et Helsinki) ont construit ou sont en train de construire des tramways.

CONCLUSION (suite)

- Après avoir revu et complété l'analyse de SYSTRA, nous appuyons leur recommandation et validons le choix du tramway comme mode de transport structurant pour la ville de Québec.
- À notre avis, le tramway est un mode de transport tout à fait adapté au contexte du corridor proposé car il s'adapte bien au milieu urbain et répond correctement aux besoins des usagers à moyen et long terme, tout en respectant le budget disponible.
- Quant au métro, il pourrait également répondre à la demande mais il est surdimensionné par rapport à l'achalandage prévu à moyen et long terme. Les investissements requis pour sa construction sont pour le moment difficiles à évaluer avec précision mais, à la lumière des projets récents, on peut s'attendre à ce que ses coûts soient exorbitants par rapport à ceux du tramway.