

Référence : FR01T19A18-G-EDK0-MT-GE00-0004-C



RÉSEAU STRUCTURANT DE TRANSPORT EN COMMUN

MANDAT 9.4 - BILAN GES DU TRAMWAY EN PHASE TRAVAUX ET EN PHASE EXPLOITATION



MÉMOIRE TECHNIQUE Mandat 9.4 - Bilan GES du tramway en phase travaux et en phase exploitation

IDENTIFICATION DU DOCUMENT

N° du document SYSTRA Canada	FR01T19A18-G-EDK0-MT-GE00-0004-C
N° du document client	S.O.

RÉV.	DATE	MODIFICATION	PRÉPARÉ PAR	RÉVISÉ PAR	APPROUVÉ PAR
A	2019-07-18	Version préliminaire	LA	ST	EL/RT
B	2019-08-27	Intégration des remarques	LA	ST	EL/RT
C	2020-10-16	Intégration des remarques du MTQ et du MELCC	LA	DR	EL/RT

Préparé par :

Louis Alligier
Chargé d'études

Signature

Révisé par :

Didier Rancourt
Spécialiste – Études environnementales

Signature

Approuvé par :

Éric Le Hir
Chargé de projet

Signature

Romain Taillandier, ing.
Responsable, transport urbain

Signature

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	3
2.	MÉTHODOLOGIE	4
2.1	SYNTHÈSE DES POSTES D'ÉMISSION PRIS EN COMPTES	4
2.2	FACTEURS D'ÉMISSION UTILISÉS	9
2.3	CALCUL DES QUANTITÉS EXCAVÉES	11
2.4	CALCUL DES QUANTITÉS D'APPORTS DE MATÉRIAUX	13
3.	CALCUL DES ÉMISSIONS DE GES LIÉES AU PROJET	15
4.	CONCLUSION	19

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Synthèse des postes pris en compte pour le calcul des émissions de GES	4
Tableau 2 :	Facteurs d'émission retenus pour le calcul	9
Tableau 3 :	Consommation unitaire et facteurs d'émission par type de véhicule/engin	11
Tableau 4 :	Hypothèses de calcul pour l'excavation des tunnels	12
Tableau 5 :	Hypothèses de calcul pour l'excavation des stations	12
Tableau 6 :	Déblais excavés (source : Ville de Québec, hypothèses SYSTRA)	13
Tableau 7 :	Matériaux de construction utilisés pour la construction du tramway et distance d'acheminement (source : Ville de Québec)	14
Tableau 8 :	quantités de remblais utilisés pour la construction du tramway selon l'usage (source : Ville de Québec)	14
Tableau 9 :	Émissions de GES (TCO ₂ cumulées) regroupés par macro postes aux différents horizons d'évaluation (2026, 2041) et pour les années où le bilan GES devient positif hors incertitude sur la phase travaux, en fourchette basse et en fourchette haute	15

LISTE DES FIGURES

Figure 3-1 :	Évolution des émissions de GES (TCO ₂ cumulées) par macro-poste en phases travaux (2022-2025) et exploitation (2026 – 2041) hors incertitude liée à la phase travaux	17
Figure 3-2 :	Évolution des émissions de GES (TCO ₂ cumulées)	18

GLOSSAIRE

CO2	Dioxyde de carbone
CCE	Centre d'entretien et d'exploitation
gCO₂e	Grammes Dioxyde de carbone équivalent
GES	Gaz à Effet de Serre
KT	Kilo Tonnes
KWh	Kilowatt-heure
RSTC	Réseau Structurant de Transport en Commun
RTC	Réseau de Transports de la Capitale
TCO₂	Tonnes Dioxyde de carbone
TW	Tramway
VP	Véhicules de promenade

1. INTRODUCTION

Cette note porte sur le calcul des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) liées aux phases travaux et exploitation du projet de création d'une ligne de tramway dans la Ville de Québec. Ce calcul est réalisé à partir des données disponibles concernant les détails du projet (tracé, quantité de matériaux utilisés, techniques d'excavations) et les prévisions de trafic. Ces données sont complétées par des hypothèses portant sur l'organisation de la logistique du chantier (distance des sites de stockage matériaux et des sites fournisseurs).

La méthode décrite dans l'annexe à la directive du MELCC et portant sur les émissions de GES est appliquée : les différents postes listés sont considérés et les calculs d'émission de CO₂ sont réalisés à partir des formules proposées lorsque les données nécessaires à leur mise en œuvre sont disponibles, et à partir de sources et de méthodes fiables lorsque ces données ne sont pas disponibles.

Le principe retenu est donc de cibler les émissions liées à la fabrication et au transport des principaux matériaux de construction (béton pour tunnel, la plate-forme et trottoir, bordures de granite, graves, enrobés, acier, cuivre), aux engins utilisés sur le chantier (excavation, remblais, pavage et fondation, déboisement), au changement d'affectation des terres lié au déboisement, à l'utilisation d'explosif et au transfert modal (trafic supplémentaire réalisé en tramway et diminution correspondante du trafic réalisé en bus et en véhicule particulier¹).

Sur la base des données disponibles et des hypothèses émises et hors incertitudes liées à l'estimation des quantités de matériaux et de déblais et des facteurs d'émission² :

- La **phase travaux** du projet génère une **dépense cumulée** de l'ordre **156 KT de CO₂** : les émissions de GES attribuables à la production des matériaux de construction représentent le premier poste d'émission (79 %), avec une contribution prédominante du béton et de l'acier (respectivement 53 % et 30 % des émissions du poste production matériaux).
- Le transport des matériaux de construction et des matériaux excavés (9 %) ainsi que le déboisement (10 %) représentent les deux autres postes significatifs.
- La **phase exploitation** génère à **horizon 2041** un **gain cumulé** de l'ordre de **216 KT de CO₂**, le point neutre en prenant en compte les émissions de la phase travaux hors incertitude étant atteint en 2038. Le report des usagers des véhicules particuliers vers le mode tramway compense très largement les émissions liées à la circulation des tramways.

¹ Données d'entrées basées sur les résultats du modèle d'achalandage du RTC mis à jour en août 2020.

² Tant l'estimation des facteurs d'émissions permettant le calcul des émissions de GES que les quantités de matériaux de construction ou de déblais à évacuer ne peuvent être garanties comme exactes. Une fourchette basse (-30 % des émissions de GES en phase travaux) et une fourchette haute (+30 % des émissions de GES en phase travaux) ont été définies pour pallier cette incertitude et les résultats intégrant ces deux fourchettes sont présentés à la suite de ce rapport.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 SYNTHÈSE DES POSTES D'ÉMISSION PRIS EN COMPTE

Le tableau ci-après présente les différents postes abordés pour le calcul des émissions de GES dans le cadre de la portée de l'étude définie précédemment en accord avec la typologie présentée dans l'annexe à la directive du MELCC.

Tableau 1 : Synthèse des postes pris en compte pour le calcul des émissions de GES

N° Annexe MELCC / identifiant de poste	Postes	Prise en compte
MATCO	Émissions de GES attribuables à la production de matériaux de construction	Oui
	Béton, granite, grave, enrobé, acier, cuivre	
B-1	Émissions de GES attribuables aux systèmes de combustion fixes	Oui
	Utilisation de génératrices de courant	
B-2	Émissions de GES attribuables aux systèmes de combustion mobiles	Oui
	<ul style="list-style-type: none"> • Opérations d'excavation (pelleteuse, pelleteuse-chargeuse) Opérations de terrassement (pelleteuse, compacteur, rouleau vibrant, niveleuse) et de pavage (finisseur) • Opérations de fondation (pompe à béton) • Opérations de déboisement (abatteuse, ébrancheuse, débardeur, porteur) 	
B-3	Émissions de GES attribuables à l'utilisation d'énergie électrique	Oui
	Chauffage des stations, des aiguillages Consommation électrique des bâtiments	
B-4	Émissions de GES attribuables au transport des matériaux de construction, d'excavation et de remblais	Oui
	Béton, granite, grave, enrobé, acier, cuivre, explosifs, déblais inertes, déblais pollués, remblais	
B-5	Émissions de GES attribuables aux activités de déboisement	Oui
	Changement d'affectation des terres valorisant la suppression de puits de carbone	
B-6	Émissions de GES liées à l'utilisation d'explosifs	Oui
	émissions de GES découlant principalement de la détonation et liées à la masse de combustible fossile et à son contenu en carbone	
B-7	Émissions indirectes évitées attribuables au transfert modal	Oui
	Gains d'émission liés au report des usagers du mode VP vers le mode TC	

N° Annexe MELCC / identifiant de poste	Postes	Prise en compte
B-8	Émissions liées aux impacts des projets routiers sur le flux de déplacement entre zones d'origine et zones de destination ainsi que sur la congestion routière	
	<ul style="list-style-type: none"> • La valorisation des émissions indirectes évitées attribuables au transfert modal est basée sur la comparaison des véhicules*kilomètres parcourus par mode (automobile, bus, tramway, métrobus) en référence et en scénarios. La diminution du nombre de véhicules routier en projet sur l'ensemble du réseau routier du modèle d'achalandage est valorisée dans le cadre du poste B7. • L'impact de la diminution du trafic sur la consommation des véhicules particuliers en scénario est pris en compte pour le type de véhicule « camion », à partir du travail réalisé par le MTQ³, basé sur MOVES, qui a apporté une assistance technique. 	Oui

- Le poste MATCO correspond aux **émissions de GES attribuables à la production de matériaux de construction** : ce poste a été créé pour valoriser les émissions de GES liées à la production des matériaux tels le cuivre, l'acier ou le béton. La méthode de calcul consiste à multiplier les quantités de matériaux par les facteurs d'émission correspondants.
- Le poste B1 correspond aux **émissions de GES attribuables aux systèmes de combustion fixes** : ce poste a été utilisé pour valoriser les émissions de GES liées à l'utilisation de génératrices de courant d'appoint qui seront utilisées dans le tunnel. Le calcul détaillé dans l'outil remis avec le rapport repose sur la quantification de la consommation de carburant de ces génératrices, puis par sa multiplication par le facteur d'émission correspondant. La quantification de la consommation est basée sur l'utilisation de 10 génératrices 4 heures par jour, 30 jours par mois durant 34 mois. Ce poste, intégré au bilan GES, a un impact négligeable : il représente 0,5 % des tonnes de CO2 équivalent générées en phase travaux.
- Le poste B2 correspond aux **émissions de GES attribuables aux systèmes de combustion mobiles** : ce poste a été utilisé pour valoriser les émissions de GES liées à l'activité des engins nécessaires au déroulement des travaux. Quatre principales catégories d'opérations ont été considérées, car pouvant faire l'objet d'hypothèses :
 - Les **opérations d'excavation** mettant en œuvre des pelleteuses et des pelleteuses-chargeuses, qu'il s'agisse des opérations de marinage à la suite de l'excavation à l'explosif ou de l'excavation de la plate-forme et de la voirie;
 - Les **opérations de terrassement** (pelleteuse, compacteur, rouleau vibrant, niveleuse) et de pavage (finisseur);
 - Les **opérations liées à la mise en œuvre de béton** nécessitant l'utilisation de la pompe à béton (le transport en camion-toupie est chiffré dans la rubrique B4);

³ Dossier 3211-08-015 – Réponse à la deuxième série de questions et commentaires pour le projet de construction d'un tramway sur le territoire de la ville de Québec dans le cadre du projet de réseau structurant de transport en commun, QC-2-10

- Les **opérations liées au déboisement** nécessitant la mise en œuvre d’abatteuses, d’ébrancheuse, de débardeur et de porteur.

Ce poste a également été utilisé pour valoriser les émissions de GES liées aux activités de maintenance. Deux principales catégories ont été prises en compte :

- Les **opérations de déneigement** de la plate-forme, réalisées en utilisant des engins rail-route sur la base de 76 jours de chute de neige annuels, 6 heures de circulation par jour et par sens, soit 269 km parcourus par jour pour un total de 20 559 km/an;
- Les **opérations d’inspection de la LAC**, réalisées la nuit en utilisant un engin rail-route sur la base de 45 km parcourus par mois pour un total de 540 km/an.

La méthode de calcul consiste à quantifier les consommations de carburant de chacun de ces engins et à les multiplier par les facteurs d’émission correspondants présentés dans l’annexe à la directive du MELCC.

- Le poste B3 correspond aux **émissions de GES attribuables à l’utilisation d’énergie électrique** : ce poste a été pris en compte pour valoriser la consommation d’énergie électrique en phase exploitation du chauffage des stations et des aiguillages, ainsi que celle du centre d’entretien, des locaux des sous-stations (hors alimentation du tramway prise en compte dans le poste B7) et des autres locaux d’exploitation. La méthode de calcul est basée sur des hypothèse de consommation électrique unitaire (chauffage des stations et chauffage des aiguillages) et sur des hypothèses de consommation électrique par m² (locaux) basées sur les données concernant le tramway de Göteborg. Compte tenu du mode de production national (énergie hydraulique), l’impact de ce poste, intégré au bilan GES, est négligeable : il totalise moins de 0,1% des émissions de GES en phase exploitation. Sur la base de ce constat et en l’absence de données sur le dimensionnement des installations de chantier, la simulation de l’impact de la consommation de bases vie en phase travaux n’a pas été chiffrée.
- Le poste B4 correspond aux **émissions de GES attribuables au transport des matériaux de construction, d’excavation et de remblais** : ce poste a été utilisé pour valoriser l’ensemble des émissions liées au transport des matériaux d’excavation, de construction et de remblais conformément aux instructions de l’annexe à la directive du MELCC. La méthode de calcul consiste à quantifier les consommations de carburant liées aux kilomètres parcourus pour le transport de ces matériaux et à les multiplier par les facteurs d’émission correspondants présentés dans l’annexe à la directive du MELCC.
- Le poste B5 correspond aux **émissions de GES attribuables aux activités de déboisement** : la méthode de calcul préconisée dans l’annexe à la directive du MELCC a été appliquée. Elle est reproduite ci-après.

$$\text{Émissions de GES (tonnes}_{CO_2}) = N_H \times t_{MSh} \times (1 + T_x) \times CC \times \frac{44}{12}$$

Où :

N_H = Nombre d’hectares déboisés;

t_{MSh} = Tonnes de matières sèches par hectare;

T_x = Taux de biomasse souterraine par rapport à la biomasse aérienne;

CC = Contenu en carbone du bois, en tonnes de carbone par tonne de matières sèches;

44/12 = Ratio masse moléculaire de CO₂ par rapport à la masse moléculaire de C.

- Le poste B6 correspond **aux émissions de GES liées à l'utilisation d'explosifs**. La méthode préconisée dans l'annexe à la directive du MELCC et reproduite ci-après n'a pas été appliquée en l'absence d'informations disponibles : le facteur d'émission utilisé - 0.17 tCO₂eq/t explosif - est communément utilisé par les constructeurs d'explosif et provient de la documentation du constructeur Dyno Nobel pour la référence Titan 5000 Blend. Il est appliqué sur la base d'une hypothèse de facteur de chargement de 1.2 kg d'explosif par m³ d'excavation.

$$E_{CO2_Exp} = \sum_{n=1}^{n=12} 3,664 \times (FFexp_n \times CC_n) \times 0,001$$

Où :

ECO2_Exp = Émissions annuelles de CO2 dues à la consommation de combustibles fossiles utilisés dans les explosifs en tonnes par année;

FFexp_n = Masse de combustible fossile contenue dans les explosifs utilisés dans le mois n, exprimée en kilogramme de combustible;

CC_n = Contenu en carbone moyen du combustible fossile utilisé dans l'explosif au mois n, exprimé en kilogramme de carbone par kilogramme de combustible fossile;

n = Mois;

3,664 = Ratio de poids moléculaire du CO2 par rapport au carbone;

0,001 = Facteur de conversion de kilogrammes à tonnes.

- Le poste B7 correspond **aux émissions indirectes évitées attribuables au transfert modal**. La méthode appliquée repose sur la mise en œuvre de prévisions de trafic et le calcul du delta de véhicules*kilomètres générés entre la situation de référence et la situation de projet aux horizons 2026 (mise en service) et 2041 pour 4 modes distincts : automobile, bus, métrobus et tramway.

La méthodologie appliquée pour obtenir des véhicules*km pour ces deux horizons est la suivante :

- Pour la pointe du matin :
 - Pour les véhicules particuliers : pour chaque paire origine-destination, multiplication de la demande auto-conducteur du scénario par la distance de cette paire OD.
 - Pour le réseau de transport collectif :
 - Calcul d'un nombre de voyages pour chaque ligne en divisant l'amplitude de service de la période par l'intervalle de la ligne : cette amplitude est de 90 minutes pour les lignes express et de 180 minutes pour les autres lignes.
 - Multiplication du nombre de voyages par la longueur du tracé pour connaître le nombre de kilomètres parcourus.
- Pour les périodes de pointe du soir et la période hors pointe :
 - Pour les véhicules particuliers : utilisation du ratio période x/pointe du matin en se basant sur le nombre de déplacements mode auto-conducteur dans l'enquête origine-destination 2017.
 - Pour le réseau de transport collectif :
 - Utilisation d'un ratio période x/pointe du matin du nombre de voyages par type de service (express, métrobus, bus) en se basant sur l'horaire Hastus de l'automne 2017.
 - Le tramway et métrobus utilise les ratios des métrobus pour la période hors pointe, mais offre le même service en période de pointe du soir qu'en période de pointe du matin.

Ces données permettent d'estimer un trafic à la journée, exprimé en véhicules*kilomètres. Le tableau ci-après présente les valeurs de trafic retenues pour les horizons 2026 et 2041, exprimées en véhicules*kilomètres en jour complet.

Mode	2026 (v*kilomètre jour complet)		2041 (v*kilomètre jour complet)	
	Référence	RSTC	Référence	RSTC
Automobile	17 252 783	16 795 600	18 086 527	17 597 673
Métrobus		2 718		2 718
Autobus	105 608	135 311	105 608	135 311
Tramway		9 478		9 478

Le passage à un trafic annuel est basé sur l'utilisation d'un facteur d'annualisation de 303 jours par an, calculé à partir du service planifié bus pour une journée type (automne 2017). Ce facteur est ensuite appliqué par hypothèse à l'ensemble des modes (automobile, Métrobus, bus, tramway) en situation de référence et en situation de projet. Le tableau ci-après détaille le calcul du facteur d'annualisation.

Journée type	Nombre	Heures	Facteur / Semaine	Facteur pondéré
Semaine	246	4 304	100,0%	246
Samedi	61	2 092	48,6%	30
Dimanche	58	2 012	46,7%	27
Total	365			303

Les données de trafic pour chaque mode entre les horizons 2026 et 2041 sont reconstituées en calculant un taux de croissance annuel moyen à partir des trafics de ces deux années, puis en l'appliquant à l'année n pour obtenir la valeur de trafic l'année n+1 jusqu'en 2040.

Les trafics annuels par mode en situation de projet sont ensuite soustraits aux trafics annuels par mode en situation de référence afin de calculer le delta de trafic annuel sur la période 2026-2041, c'est-à-dire les circulations de véhicules supplémentaires (bus, tramway, métrobus) et les diminutions de circulation (automobile). Par conséquent, l'impact sur la congestion du projet est valorisé pour les véhicules automobiles dans le cadre de ce poste B7 : la diminution du trafic s'accompagne d'une diminution des émissions de GES.

La méthodologie appliquée pour calculer des émissions de GES consiste alors à multiplier le delta de trafic au niveau de chaque mode par le facteur d'émission.

- Le poste B8 correspond aux **émissions liées aux impacts des projets routiers sur le flux de déplacement entre zones d'origine et zones de destination ainsi que sur la congestion routière**. Il est chiffré comme expliqué précédemment pour les véhicules automobiles dans le cadre du poste B7, à partir du delta de trafic en véhicules*kilomètres. Le travail complémentaire mené par le MTQ à partir du logiciel MOVES (Motor Vehicle Emissions Simulation) et des données de trafic en référence et en scénario aux horizons 2026 et 2041, permet d'isoler l'impact d'une diminution de la congestion routière

sur la consommation de camions en période de pointe du matin (PPAM) et en période de pointe du soir (PPPM). Pour éviter des doubles comptes, la diminution des émissions de GES liée à la diminution du trafic automobile en projet liée au report modal, aussi estimée dans le travail du MTQ, n'est donc pas retenue.

Pour pouvoir utiliser ces estimations pour la catégorie « camion », les hypothèses de travail et la méthode suivantes ont été appliquées :

- Estimation des poids (%) de trafic en période de pointe du matin et du soir et en hors pointe pour le trafic automobile à partir des données d'achalandage;
- Calcul au prorata de cette pondération et à partir des volumes d'émissions de GES en PPAM et PPEM, d'un volume d'émission hors pointe en référence et en projet aux horizons 2026 et 2041 pour le trafic automobile et camion;
- Application du facteur d'annualisation utilisé pour le calcul du poste B7 à la somme des trafics par période (PPAM + hors pointe + PPPM);
- Limitation du scope à la catégorie « camion »;
- Intégration des gains d'émissions GES annuels sur la circulation des camions dans le bilan GES.

2.2 FACTEURS D'ÉMISSION UTILISÉS

Le tableau ci-après présente les facteurs d'émission utilisés pour calculer les tonnes de GES en phase travaux et exploitation. Ces facteurs d'émission sont issus de l'annexe à la directive du MELCC et leur source est précisée.

Tableau 2 : Facteurs d'émission retenus pour le calcul

	Facteur d'émission	Unité	Source
Carburant diesel : camions, autobus, engins de déboisement	2 729	gCO ₂ eq/litre	Rapport d'inventaire national (RIN) 1990-2016. Partie II. Tableau A6-12 – Emission Factors for Energy Mobile Combustion Sources.
Carburant essence : VP	2 317	gCO ₂ eq/litre	Rapport d'inventaire national (RIN) 1990-2016. Partie II. Tableau A6-12 – Emission Factors for Energy Mobile Combustion Sources.
Consommation électrique : Tramway, bus électrique	1,7	gCO ₂ eq/KWh	Rapport d'inventaire national (RIN) 1990-2016. Partie II. Tableau A13-6 s.
Déboisement : suppression puit de carbone	1 365	tCO ₂ eq/ha	http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/pdf/4_Volume4/V4_04_Ch4_Forest_Land.pdf .
Excavation à l'explosif	0,17	tCO ₂ eq/t explosif	https://www.dynonobel.com/apac/~/_media/Files/Dyno/ResourceHub/Technical%20Information/Asia%20Pacific/BulkExplosives/TITAN%205000%20Matrix.pdf

	Facteur d'émission	Unité	Source
Béton	320	kgCO ₂ eq/m ³	Béton prêt à l'emploi 30 MPA, Donnée extraite de la base de données ecoinvent v3.1, créée par le CIRAIG (BD-ICV Québec) à partir de données de l'ABQ. source : https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/Protocole-ISO.pdf , Annexe 4, p33
Granite	0,01	kgCO ₂ eq/kg	Ademe base carbone 2014
Graves	0,01	kgCO ₂ eq/kg	Ademe base carbone 2014
Enrobés	0.05	kgCO ₂ eq/kg	Ademe base carbone 2014
Acier	1 268	kgCO ₂ eq/t	Acier pour treillis et armature : https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/Protocole-ISO.pdf , Annexe 4, p33
Cuivre	1 445	kgCO ₂ eq/t	https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?autres_metaux.htm

Les hypothèses suivantes ont été émises au sujet des véhicules pour la phase exploitation :

- La motorisation des tramways est par nature 100 % électrique;
- La motorisation des bus et des métrobus est définie sur la base d'une structure de parc qui évolue entre 2026 et 2041, sur la base d'une projection du parc autobus établie entre 2020 et 2030, et d'une hypothèse de passage à un parc 100 % électrique en 2043 :
 - En 2026, les bus diesel représentent 19 % du parc, les bus hybrides 77,5 % du parc, et les bus électriques 3,5 %;
 - En 2041, les bus électriques représentent 85 % du parc, les bus hybrides 15 % et les bus diesel ont totalement disparus.
- Les vp.km économisés le sont avec une structure de parc également évolutive :
 - En 2026, les véhicules électriques représentent près de 9 % du parc;
 - En 2041, cette part est portée à 43 % du parc.

Les engins, véhicules et autres unités de transport ont fait l'objet d'une recherche de productivité et de consommation afin de pouvoir déterminer les émissions de GES par unité d'œuvre et procéder *in fine* au calcul des émissions. Le tableau ci-après synthétise pour chaque véhicule/engin ces informations. Le tableur de calcul accompagnant cette note de synthèse détaille l'ensemble des hypothèses prises dans l'onglet « PARAMÈTRES & HYPOTHÈSES ».

Tableau 3 : Consommation unitaire et facteurs d'émission par type de véhicule/engin

Véhicule / engin	Consommation	Unité	Productivité	Unité
Porteur 4 essieux	30,8	l/100 km	20,4	T
tracteur 3 essieux + semi-remorque 3 essieux	30,8	l/100 km	31,7	T
VP	9,0	l/100 km		
VP électrique	0,17	kWh/km		
Bus	65	l/100 km		
Bus hybride	56	l/100 km		
Bus électrique	1,8	kWh/km		
Tramway	19,2	kWh/km		
Pelleteuse	13	l/h	75	m ³ /h
Pelleteuse-chargeuse	8	l/h	75	m ³ /h
Niveleuse	20	l/h	1 250	m ² /h
Compacteur	12,6	l/h	5 325	m ² /h
Rouleau vibrant	3,3	l/h	20 900	m ² /h
Finisseur	9,6	l/h	2 295	m ² /h
Abatteuse	237,7	l/ha		
Ébrancheuse	255,9	l/ha		
Débardeur	292,5	l/ha		
Porteur	383,9	l/ha		
Toupie	94	l/100 km	18	t
Pompe à béton	33,4	l/h	140	m ³ /h

2.3 CALCUL DES QUANTITÉS EXCAVÉES

Les déblais liés à l'excavation des puits de stations, des stations et du tunnel colline Parlementaire ont d'abord fait l'objet d'un calcul afin de déterminer ensuite le nombre de kilomètres parcourus pour leur transport vers un centre de stockage tampon avant leur réutilisation en remblais pour les déblais inertes (hypothèse fixée à 80 % des quantités de déblais), et vers un centre de traitement pour les déblais pollués (hypothèse fixée à 20 % des quantités de déblais).

Les tableaux ci-après détaillent, en précisant leur source, les hypothèses émises pour :

- Le calcul du volume de déblais pour le tunnel colline Parlementaire;
- Le calcul du volume de déblais pour les cinq stations ainsi que leurs puits d'accès.

L'excavation du tunnel et des stations est basée sur l'utilisation d'explosifs. Le volume estimé pour les puits de station repose sur l'hypothèse d'une surface au sol de 200 m² pour les escaliers et d'une surface de 75 m² au sol pour 2 puits d'ascenseur et 1 puit d'aération. Le volume estimé pour les stations repose sur l'hypothèse de 2 quais d'une largeur de 2 m sur 50 m de long et de 3 mètres de hauteur.

Tableau 4 : Hypothèses de calcul pour l'excavation des tunnels

	Tunnel	Unité	Source
Localisation	Colline parlementaire		
Diamètre du front de taille	10,5	m	Source : hypothèse SYSTRA pour un tunnel métro voie double monotube avec deux passages cheminement piétons, diamètre extérieur
Surface du front de taille	86,6	m ²	
Longueur du tunnel	2 700	m	Source : Ville de Québec (mars 2019) - Réseau structurant de transport en commun de Québec, Dossier d'affaires, version 6, p.48
Volume excavé (en place)	233 793	m ³	
Coefficient de foisonnement	1,6		Source : hypothèse SYSTRA sur base Ligne rouge, Lot 2 (2014)
Volume à évacuer (foisonné)	369 394	m ³	
Masse volumique dynamitée	1,7	t/m ³	Source : hypothèse SYSTRA
Tonnage à évacuer	627 969	t	

Tableau 5 : Hypothèses de calcul pour l'excavation des stations

Stations	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4
Localisation	Avenue Cartier	Grand-Théâtre	Centre des congrès	Place d'Youville
Profondeur (m)	15	20	25	30
Surface du puits de station (m ²)	275	275	275	275
Volume excavé (en place) (m ³)	4 725	5 500	6 875	8 250
Volume station (en place) (m ³)	600	600	600	600
Coefficient de foisonnement	1,6	1,6	1,6	1,6
Volume à évacuer (foisonné) (m ³)	7 650	8 800	11 000	13 200
Masse volumique dynamitée	1,7	1,7	1,7	1,7
Tonnage à évacuer	12 852	14 960	18 700	22 440

Le tableau ci-après détaille les estimations de quantité de déblais pris en compte dans le calcul des émissions liées au transport vers des plateformes de stockage pour les déblais inertes et vers des lieux de disposition pour les déblais pollués.

Tableau 6 : Déblais excavés (source : Ville de Québec, hypothèses SYSTRA)

Type de site	Localisation	Volume à excaver en place (m ³)	Volume à évacuer foisonné (m ³)	Tonnage à évacuer (t)
Tunnel	Colline parlementaire	233 793	369 394	627 969
Station	Avenue Cartier	4 725	7 560	12 852
Station	Grand-Théâtre	5 500	8 800	14 960
Station	Centre des congrès	6 875	11 000	18 700
Station	Place d'Youville	8 250	13 200	22 440
Plate-forme	Ensemble du tracé	470 925	612 203	857 084
Chaussée	Ensemble du tracé	593 805	771 947	1 080 725
Trottoir	Ensemble du tracé	114 321	148 617	208 064
Lieu cyclable hors rue	Ensemble du tracé	23 564	30 633	42 886
Approche perpendiculaire	Ensemble du tracé	143 100	186 030	260 442

Concernant les exutoires des déblais liés à l'excavation des tunnels et des stations, l'hypothèse suivante a été faite en l'absence de données permettant d'avoir une estimation a priori des distances à parcourir :

- Les déblais inertes sont acheminés vers une plate-forme de stockage avant leur réutilisation sur site située à 10 km : chaque camion parcourt en moyenne 20 km pour faire un aller-retour entre le site du chantier et la plate-forme. Le volume de déblais inerte est estimé par hypothèse à 80% du volume global de déblais excavés.
- Les déblais pollués sont acheminés vers un centre de traitement dont la distance a été fixée par hypothèse à 250 km du chantier. Le volume de déblais pollués est estimé par hypothèse à 20 % du volume global de déblais excavés.

Ces hypothèses spécifiques pourront être ajustées le cas échéant dès lors que des informations plus précises seront disponibles.

2.4 CALCUL DES QUANTITÉS D'APPORTS DE MATÉRIAUX

Le tableau ci-après détaille les estimations de quantités de matériaux de construction prises en compte dans le calcul des émissions liées au transport en approvisionnement ainsi qu'une hypothèse préliminaire des distances de parcours entre le chantier et les sites de production/distribution.

Tableau 7 : Matériaux de construction utilisés pour la construction du tramway et distance d’acheminement
(source : Ville de Québec)

Matériaux de construction	Quantité	Unité	Distance aller	Distance retour	Unité
Béton	495 000	t	25	25	km
Granite	14 000	t	100	100	km
Graves	552 500	t	25	25	km
Enrobés	175 000	t	25	25	km
Acier	32 081	t	100	100	km
Cuivre	68	t	100	100	km
Explosif	311	t	25	25	km

Le tableau suivant présente les quantités d’apports en remblais nécessaires au chantier. L’hypothèse formulée repose sur l’utilisation des déblais inertes produits lors de l’excavation des différentes parties du chantier (tunnel, puits de station, plate-forme, voirie, remblais spécifique au pont Mendel).

Tableau 8 : quantités de remblais utilisés pour la construction du tramway selon l’usage (source : Ville de Québec)

Type d’usage	Quantité à acheminer (t)	Volume à acheminer (m3)
Plate-forme	671 382	479 559
Chaussée	1 080 725	771 947
Trottoir	208 064	148 617
Lieu cyclable hors rue	42 886	42 886
Approche perpendiculaire	260 442	186 030
Pont Mendel	210 000	150 000

3. CALCUL DES ÉMISSIONS DE GES LIÉES AU PROJET

Le tableau ci-après présente, par principaux regroupements de postes, les émissions de GES pour les horizons d'évaluation, 2026 (mise en service) et 2041, ainsi que pour 2034, 2038 et 2041 où les gains liés aux trafics compensent les pertes liées à la phase travaux (point neutre) en fourchette basse, hors incertitude et en fourchette haute.

Deux fourchettes ont été définies pour pallier l'incertitude liée au calcul des émissions de GES en phase travaux compte tenu des nombreuses hypothèses nécessaires à ce stade du projet. Sur la base des données d'entrées actuellement disponibles :

- La fourchette basse s'établit à -30 % des émissions de GES en phase travaux : le point neutre est atteint en **2034**, soit **9 ans** après la mise en service ;
- La fourchette haute s'établit à + 30 % des émissions de GES en phase travaux : le point neutre est atteint au terme de la période d'évaluation en **2041**, soit **16 ans** après la mise en service.
- Hors incertitude, le point neutre est atteint en **2038**, soit **13 ans** après la mise en service.

Tableau 9 : Émissions de GES (TCO2 cumulées) regroupés par macro postes aux différents horizons d'évaluation (2026, 2041) et pour les années où le bilan GES devient positif hors incertitude sur la phase travaux, en fourchette basse et en fourchette haute

N° Annexe MELCC	Horizons	2026	2034	2038	2041
	Postes	TCO2 cumulées	TCO2 cumulées	TCO2 cumulées	TCO2 cumulées
	Travaux	-156 184	-156 184	-156 184	-156 184
MATCO	Émissions de GES attribuables à la production de matériaux de construction	-123 759	-123 759	-123 759	-123 759
B-1	Émissions de GES attribuables aux systèmes de combustion mobile	-757	-757	-757	-757
B-2	Émissions de GES attribuables aux systèmes de combustion mobile	-1 717	-1 717	-1 717	-1 717
B-4	Émissions de GES attribuables au transport des matériaux de construction, d'excavation et de remblais	-15 797	-15 797	-15 797	-15 797
B-5	Émissions de GES attribuables aux activités de déboisement	-14 101	-14 101	-14 101	-14 101
B-6	Émissions de GES liées à l'utilisation d'explosifs	-53	-53	-53	-53
	Exploitation	12 671	112 407	169 855	216 582
B-2	Émissions de GES attribuables aux systèmes de combustion mobile	-17	-155	-225	-276
B-3	Émissions de GES attribuables à l'utilisation d'énergie électrique	-11	-97	-140	-173

N° Annexe MELCC	Horizons	2026	20334	2038	2041
	Postes	TCo2 cumulées	TCo2 cumulées	TCo2 cumulées	TCo2 cumulées
	Travaux	-156 184	-156 184	-156 184	-156 184
B-7	VP	26 160	218 868	301 529	356 532
B-7	Bus	-13 790	-109 178	-135 610	-144 804
B-7	Tramway	- 93	-841	-1 215	-1 495
B-7	Métrobus	-3	-23	-33	- 40
B-8	Effet de la décongestion sur les émissions de GES des véhicules en circulation : Camions	424	3 834	5 549	6 839
	Solde hors incertitude	-143 513	-43 777	13 671	60 398
	Fourchette basse travaux (-30%)	-96 658	3 078	60 526	107 254
	Fourchette haute travaux (+30%)	-190 368	-90 632	-33 184	13 543

Les graphiques ci-après présentent les chroniques d'émission cumulées de GES en phase travaux et en phase exploitation de manière détaillée et agrégée ainsi que le solde d'émission (delta phase travaux / phase exploitation).

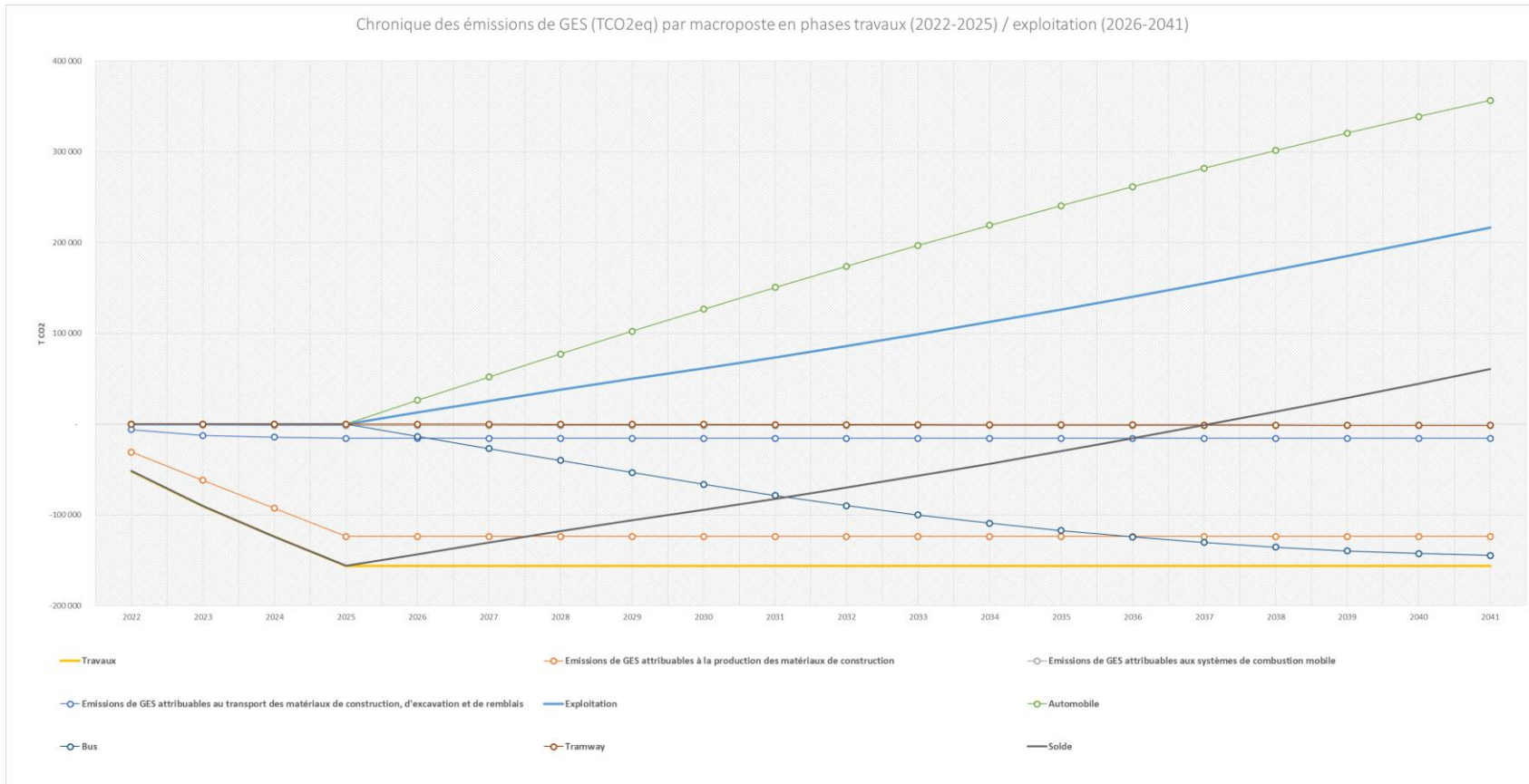


Figure 3-1 : Évolution des émissions de GES (TCO₂ cumulées) par macro-poste en phases travaux (2022-2025) et exploitation (2026 – 2041) hors incertitude liée à la phase travaux

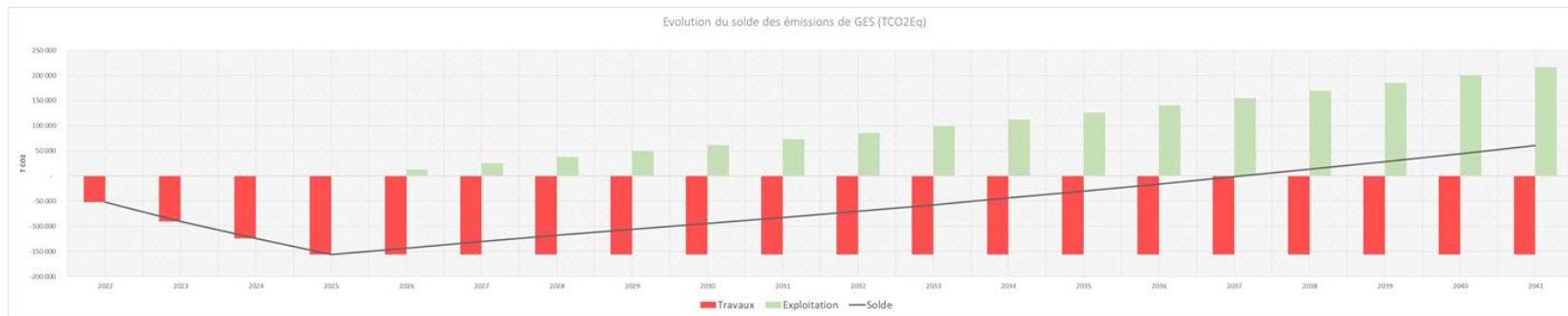


Figure 3-2 : Évolution des émissions de GES (TCO₂ cumulées) en phase travaux et en phase exploitation de 2022 à 2041 hors incertitude liée à la phase travaux

En phase travaux :

- Les matériaux de construction (Émissions de GES attribuables aux systèmes de combustion fixes) représentent à ce stade le premier poste d'émission de CO_{2-eq} 79 % des émissions en phase travaux, le béton totalisant 53 % des émissions liées aux matériaux de construction et l'acier 33%. Cette prédominance du béton met en avant l'intérêt d'utiliser des ciments à basse empreinte carbone pour optimiser le bilan GES du tramway.
- Les activités de transport des matériaux de construction, d'excavation et de totalisent 10 % des émissions de la phase travaux;
- Le déboisement représente à ce stade le troisième poste d'émission de CO_{2-eq} avec 9 % des émissions de la phase travaux;
- Les émissions liées aux systèmes de combustion fixes sont en proportion peu significatives, représentant moins de 1 des émissions de la phase travaux;
- Les émissions liées aux systèmes de combustion mobiles sont en proportion peu significatives, représentant 1 % des émissions de la phase travaux.

En phase exploitation :

- Si les émissions de GES liées à la montée en puissance des services tramway et Métrobus augmentent sur la période 2026 - 2041, la diminution des kilomètres parcourus en VP, liée au report vers le tramway d'une partie des usagers, permet de dégager un bilan positif au terme de la première année de mise en service en considérant uniquement les émissions de GES liées à l'exploitation.

4. CONCLUSION

Sur la base des postes d'émission de GES pris en compte, des hypothèses formulées sur la réalisation des travaux et des hypothèses de trafic :

- Le projet de tramway apparaît positif en GES ;
- Il faut attendre 13 ans en « scénario médian » hors incertitudes pour que les gains d'émission en phase exploitation liés à la diminution de la circulation des VP (km parcourus) compensent les émissions en phase travaux, alors même que les émissions de GES générées par les bus et les VP diminuent tendanciellement en raison de la diffusion progressive de la motorisation électrique;
- En retenant une hypothèse conservatrice et la fourchette haute de l'évaluation des émissions de GES (majoration de 30 des émissions pour tenir compte de l'incertitude des méthodes utilisées), il faut attendre 16 ans pour que le bilan devienne positif, soit 2041, la borne supérieure de l'intervalle d'évaluation.