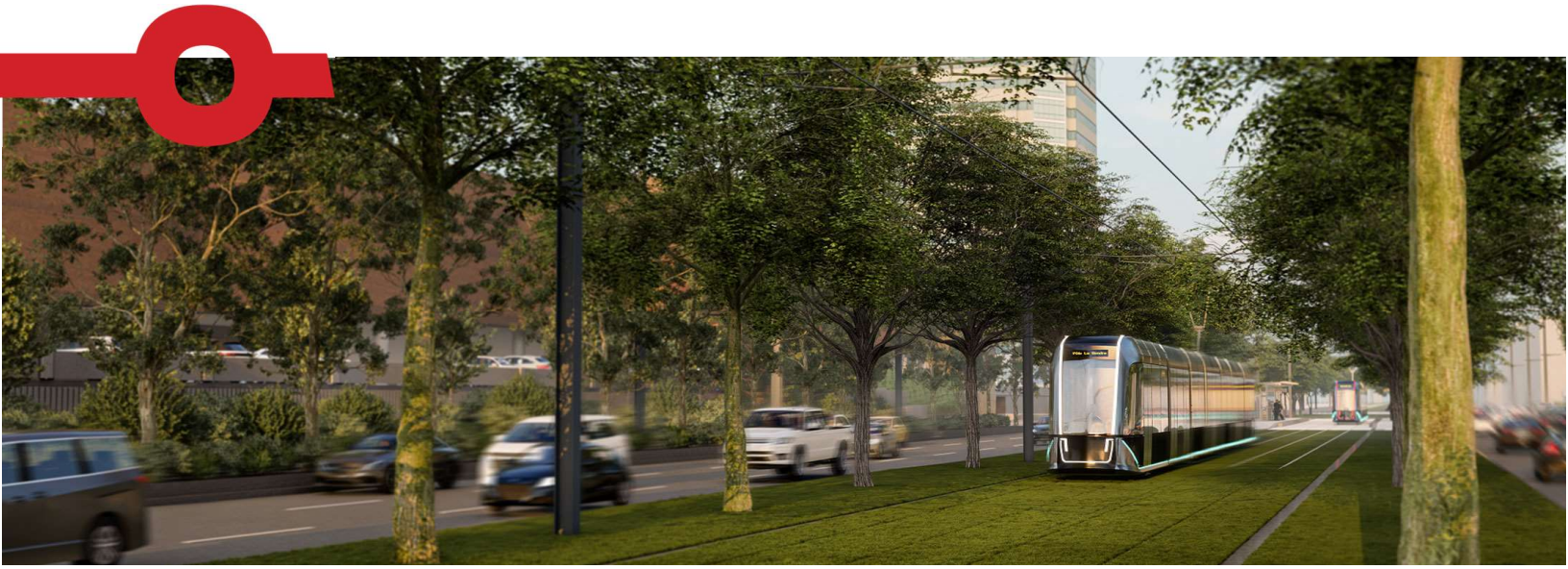
Référence : FR01T19A18-G-EDK0-MT-GE00-0004-G

TRAMWAY DE QUÉBEC

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



RTC VILLE DE QUÉBEC SYSTRA CANADA

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-G
N° du document client	N/A

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	2020-04-09	Intégration des remarques du MTQ et du MELCC	LA	DR	EL/RT
D	2021-03-16	Mise à jour suite à la réduction de la portée du projet au Terminus de la 41e Rue	LA	PT	EL
E	2021-03-16	Mise à jour suite à la réduction de la portée du projet au Terminus de la 41e Rue et trémie René-Lévesque proche de l´avenue Turnbull	LA	PT	EL
F	2022-03-29	Mise à jour du document suite à la modification du tracé vers D´Estimauville	LA	PT	EL
G	2022-04-20	Mise à jour du dossier	LA	PT	EL

Préparé par : **Louis Alligier**, Chargé d'études — Signature

Révisé par : **Pascal Texier**, Responsable Infrastructure — Signature

Approuvé par : **Éric Le Hir**, Chargé de projet principal — Signature

SYSTRA CANADA • Division Transport
1100, boul. René-Lévesque Ouest, 10e étage • Montréal • Québec • Canada • H3B 4N4 | Tél. : +1 514 985 0930 • Téléc. : +1 514 985 0929

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION ____ 3

2. MÉTHODOLOGIE ____ 4

2.1 SYNTHÈSE DES POSTES D'ÉMISSION PRIS EN COMPTE 4

2.2 INTÉGRATION DES GAINS D'ÉMISSIONS GES ANNUELS SUR LA CIRCULATION DES CAMIONS DANS LE BILAN GES. FACTEURS D'ÉMISSION UTILISÉS 10

2.3 CALCUL DES QUANTITÉS EXCAVÉES 12

2.4 CALCUL DES QUANTITÉS D'APPORTS DE MATÉRIAUX 15

2.5 DIMENSIONNEMENT D'UNE STRATÉGIE DE VÉGÉTALISATION 16

3. CALCUL DES ÉMISSIONS DE GES LIÉES AU PROJET ____ 18

4. CONCLUSION ____ 22

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 10

Tableau 3 : Consommation unitaire et facteurs d'émission par type de véhicule/engin 11

Tableau 4 : Hypothèses de calcul pour l'excavation du tunnel 13

Tableau 5 : Hypothèses de calcul pour l'excavation des stations 13

Tableau 6 : Déblais excavés (source : Ville de Québec, hypothèses SYSTRA) 14

Tableau 7 : Matériaux de construction utilisés pour la construction du tramway et distance d'acheminement (source : Ville de Québec) 15

Tableau 8 : Quantités de remblais utilisés pour la construction du tramway selon l'usage (source : Ville de Québec) 16

Tableau 9 : Répartition des coupes d´arbres et estimation de la compensation 17

Tableau 10: 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 19

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 20

Figure 3-2 : Évolution des émissions de GES (TCO_2 cumulées) en phase travaux et en phase exploitation de 2022 à 2041 hors incertitude liée à la phase travaux 21

GLOSSAIRE

CO_2	Dioxyde de carbone
CCE	Centre d'entretien et d'exploitation
gCO_2e	Grammes dioxyde de carbone équivalent
GES	Gaz à effet de serre
KT	Kilo Tonnes
KWh	Kilowatt-heure
Ml	Mètre linéaire
TQ	Tramway de Québec
RTC	Réseau de transport de la Capitale
TCo_2	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 tramway 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 au stade de la conception de référence. 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).

Les calculs ont été mis à jour en intégrant l'évolution du tracé qui compte désormais deux nouveaux tronçons (branche D'Estimauville) : il passe désormais par la 4e Rue, la 4e Avenue et le chemin de la Canardière pour prendre fin sur le boulevard Sainte-Anne en reliant le Pôle Le Gendre au Pôle D'Estimauville. La longueur totale de plateforme est également réduite suite à l'évolution du tracé : elle passe de 22 425 ml à 19 696 ml.

Il convient de préciser que bien que la mise en service du projet soit prévue en 2028, le bilan GES considère une mise en service en 2026 pour rester cohérent par rapport aux études réalisées depuis le début de projet et aux hypothèses prises (notamment les études achalandage et circulation sont faites en considérant un scénario avec une mise en service en 2026).

La méthode décrite dans l'annexe à la directive du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) et portant sur les émissions de GES est appliquée : les différents postes listés sont considérés et les calculs d'émission de CO_2 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 plateforme tramway 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 autobus et en véhicule particulier[1]).

Sur la base de la modification du tracé, 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'émission[2] :

- La **phase travaux** du projet génère une **dépense cumulée** de l'ordre **127 KT de CO_2-eq** : les émissions de GES attribuables à la production des matériaux de construction représentent le premier poste d'émission (77%), avec une contribution prédominante du béton et de l'acier (respectivement 52% et 32% des émissions du poste production matériaux). Il apparaît à ce stade

[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.

nécessaire d'intégrer, quand elles seront disponibles avec l'avancée des études, des données actualisées sur les quantités de matériaux notamment pour l'acier qui a un impact fort sur les émissions de GES. Le transport des matériaux de construction et des matériaux excavés (de l'ordre de 10%) ainsi que le déboisement (11%) représentent les deux autres postes significatifs.

La **phase exploitation** génère à **horizon 2041** un **gain cumulé** de l'ordre de **216 KT de CO_2-eq**, le point neutre en prenant en compte les émissions de la phase travaux hors incertitude étant atteint 11 ans après la mise en service. Le report des usagers des véhicules particuliers vers le mode tramway compense très largement les émissions liées à la circulation des tramways.

L'évolution de la politique municipale de reboisement urbain visant à compenser l'abattage de **1 584 arbres d´alignement** prévus le long du tracé est également prise en compte : le ratio de compensation est désormais proche de 20 arbres plantés pour 1 arbre coupé avec un objectif affiché de plantation d'environ **30 000 arbres**, largement supérieur aux **3 492 arbres** estimés sur la base des services environnementaux rendus (captation de carbone, dépollution de l'air, enrichissement de la biodiversité). **Cette mise à jour débouche sur un gain de 583 t CO_2-eq par an**. Ce gain additionnel permettrait d'atteindre l'équilibre en 2034, soit 8 ans après la mise en service, en considérant toujours une mise en service en 2026 pour rester cohérent avec les bilans GES précédents.

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, graves, 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
	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, graves, 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	
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**	Oui
	La valorisation des émissions indirectes évitées attribuables au transfert modal est basée sur la comparaison des véhicules*kilomètres parcourus par mode (automobile, autobus, tramway, Métrobus) en référence et en scénario. 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 MTQ[3], basé sur MOVES, qui a apporté une assistance technique.	

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.

[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

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 plateforme 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);
- 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 plateforme tramway, 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 18 057 km/an en lieu et place des 20 559 km/an estimés précédemment en raison de la diminution de la longueur totale de la plateforme détaillée dans la suite du document ;
- Les **opérations d'inspection de la ligne aérienne de contact (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'exploitation et d'entretien, des locaux des sous-stations de traction (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 hypothèses 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[4] en phase travaux n'a pas été chiffrée. Cette consommation (éclairage, chauffage) représentera en outre moins de 3% du total des émissions de GES en phase travaux.

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.

$$Émissions\ de\ GES\ (tonnes_{CO2}) = N_H \times t_{MSh} \times (1 + T_x) \times CC \times \frac{44}{12}$$

Où :
NH = Nombre d'hectares déboisés;
tMSh = Tonnes de matières sèches par hectare;
Tx = 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 tCO_2eq/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 m^3 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;
FFexpn = Masse de combustible fossile contenue dans les explosifs utilisés dans le mois n, exprimée en kilogramme de combustible;
CCn = 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

[4] Une base vie correspond à un bâtiment préfabriqué positionné sur un chantier et comprenant des sanitaires, un espace pour les pauses / repas …

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, autobus, 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 autoconducteur 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 autoconducteur 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, autobus) en se basant sur l'horaire Hastus de l'automne 2017.
    - Le tramway et le Métrobus utilisent les ratios des Métrobus pour la période hors pointe, mais offrent 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*km jour complet)		2041 (v*km jour complet)	
	Référence	TQ	Référence	TQ
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	-	8 325	-	8 325

La modification du tracé entraîne une diminution des distances parcourues en tramway, la longueur de la plateforme passant de 22 425 ml à 19 696 ml[5]. Le trafic diminue en conséquence de l'ordre de 12% avec un passage de 9 478 v*km à 8 325 v*km.

[5] Ce linéaire est calculé de la manière suivante : 19 690,86 ml (Pk de fin de ligne TW20) + 5,40 ml (Pk négatif en début de TW01) = 19 696 ml arrondis

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 en autobus pour une journée type (automne 2017). Ce facteur est ensuite appliqué par hypothèse à l'ensemble des modes (automobile, Métrobus, autobus, tramway) en situation de référence et en situation de projet. Le tableau ci-après détaille le calcul du facteur d'annualisation.

Journée type	Nombre jours	Heures	Facteur / Semaine	Facteur pondéré
Semaine	246	4304	100%	246
Samedi	61	2092	49%	30
Dimanche	58	2012	47%	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 (autobus, 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 Ministère des Transports du Québec (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 de 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 »;

2.2 INTÉGRATION DES GAINS D'ÉMISSIONS GES ANNUELS SUR LA CIRCULATION DES CAMIONS DANS LE BILAN GES. 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_2eq/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_2eq/litre	Rapport d'inventaire national (RIN) 1990-2016. Partie II. Tableau A6-12 – Emission Factors for Energy Mobile Combustion Sources.
Consommation électrique : Tramway, autobus électrique	1,7	gCO_2eq/kWh	Rapport d'inventaire national (RIN) 1990-2016. Partie II. Tableau A13-6 s.
Déboisement : suppression puits de carbone	1 365	tCO_2eq/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_2eq/t explosif	https://www.dynonobel.com/apac/~/media/Files/Dyno/ResourceHub/Technical%20Information/Asia%20Pacific/BulkExplosives/TITAN%205000%20Matrix.pdf
Béton	320	$kgCO_2eq/m3$	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	$kgCO_2eq$/kg	Ademe base carbone 2014
Graves	0,01	$kgCO_2eq$/kg	Ademe base carbone 2014
Enrobés	0.05	$kgCO_2eq$/kg	Ademe base carbone 2014
Acier	1 268	$kgCO_2eq$/t	Acier pour treillis et armature :https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/Protocole-ISO.pdf, Annexe 4, p33

	Facteur d'émission	Unité	Source
Cuivre	1 445	$kgCO_2eq/t$	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 autobus 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 autobus diesel représentent 19 % du parc, les autobus hybrides 77,5% du parc, et les autobus électriques 3,5 %;
  - En 2041, les autobus électriques représentent 85 % du parc, les autobus hybrides 15% et les autobus diesel ont totalement disparu.
- 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		
Autobus	65	l/100 km		
Autobus hybride	56	l/100 km		
Autobus électrique	1,8	kWh/km		
Tramway	19,2	kWh/km		

Véhicule / engin	Consommation	Unité	Productivité	Unité
Pelleteuse	13	l/h	75	m3/h
Pelleteuse-chargeuse	8	l/h	75	m3/h
Niveleuse	20	l/h	1 250	m2/h
Compacteur	12,6	l/h	5 325	m2/h
Rouleau vibrant	3,3	l/h	20 900	m2/h
Finisseur	9,6	l/h	2 295	m2/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	m3/h

2.3 CALCUL DES QUANTITÉS EXCAVÉES

La longueur du tunnel est portée à 1 815 ml hors trémie d'accès par rapport à l'hypothèse précédente de 2 700 ml afin de prendre en compte les caractéristiques du projet et la réduction du nombre de stations en souterrain.

Le nombre de stations souterraines évolue également pour passer de 4 stations (Cartier, Grand Théâtre, Centre des congrès et Place D'Youville) à 2 stations (colline Parlementaire, D'Youville). Le nombre de stations de surface évolue en parallèle avec la modification de tracé en passant de 30 stations à 27.

Les déblais liés à l'excavation des puits de stations, des stations et du tunnel de la 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 de la colline Parlementaire;
- Le calcul du volume de déblais pour les 2 stations souterraines 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 puits d'aération. Le volume estimé pour les stations repose sur l'hypothèse de 2 quais d'une largeur de 2 mètres sur 50 mètres de long et de 3 mètres de hauteur.

Tableau 4 : Hypothèses de calcul pour l'excavation du tunnel

	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	87	m2	
Longueur du tunnel	1 815	m	Source : Ville de Québec (mars 2022) - Bureau de projet de la ville de Québec.
Volume excavé (en place)	157 162	m3	
Coefficient de foisonnement	1,6		Source : hypothèse SYSTRA sur base Ligne Rouge, Lot 2 (2014)
Volume à évacuer (foisonné)	248 316	m3	
Masse volumique dynamitée	1,7	t/m3	Source : hypothèse SYSTRA
Tonnage à évacuer	422 137	t	

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

Stations	Station 1	Station 2
Localisation	Colline Parlementaire	D'Youville
Profondeur (m)	25	30
Surface du puits de station (m^2)	275	275
Volume excavé (en place) (m^3)	6 875	8 250
Volume station (en place) (m^3)	600	600
Coefficient de foisonnement	1,6	1,6
Volume à évacuer (foisonné) (m^3)	11 000	13 200
Masse volumique dynamitée	1.7	1.7
Tonnage à évacuer	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. Ces estimations intègrent l'impact de la modification du tracé avec la branche d'Estimauville.

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

Type de site	Localisation	Volume à excaver en place (m3)	Volume à évacuer foisonné (m3)	Tonnage à évacuer (t)
Tunnel	Colline Parlementaire	157 162	248 316	422 137
Station	Colline Parlementaire	6 875	11 000	18 700
Station	D'Youville	8 250	13 200	22 440
Plateforme tramway	Ensemble du tracé	433 125	563 063	788 288
Chaussée	Ensemble du tracé	514 655	669 051	936 671
Trottoir	Ensemble du tracé	107 033	139 104	194 746
Lieu cyclable hors rue	Ensemble du tracé	29 881	38 845	54 383
Approche perpendiculaire	Ensemble du tracé	120 240	156 312	218 837

Concernant les exutoires des déblais liés à l'excavation du tunnel 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 plateforme de stockage avant leur réutilisation sur site situé à 10 km : chaque camion parcourt en moyenne 20 km pour faire un aller-retour entre le site du chantier et la plateforme. 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. Ces estimations intègrent l'impact de la modification du tracé avec la branche D'Estimauville.

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	383 241	t	25	25	km
Granite	12 296	t	100	100	km
Graves	485 264	t	25	25	km
Enrobés	153 703	t	25	25	km
Acier	25 023	t	100	100	km
Cuivre	59	t	100	100	km
Explosif	207	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, plateforme, voirie, remblais spécifiques au pont Mendel). Deux ponts d'étagement sont par conséquent à construire totalement : le pont d'étagement Mendel et le pont d'étagement Laurier, qui n'était pas pris en compte dans la version précédente. Les ponts d'étagement

Duplessis et Henri-IV ainsi que le pont Drouin devront être vérifiés par le consortium afin de pouvoir être utilisés par le tramway. Selon l'ouvrage, des travaux de renforcement d'ouvrage pourraient être à réaliser.

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)
Plateforme tramway	589 679	421 199
Chaussée	936 671	669 051
Trottoir	194 746	139 104
Lieu cyclable hors rue	54 383	38 845
Approche perpendiculaire	218 837	156 312
Pont Mendel	210 000	150 000

2.5 DIMENSIONNEMENT D'UNE STRATÉGIE DE VÉGÉTALISATION

En dehors du déboisement prévu sur une surface estimée de l'ordre de 10 hectares (ha) actuellement pris en compte dans le bilan GES, la réalisation du projet prévoit l'abattage d'environ 1584 arbres urbains. Ces arbres fournissent plusieurs services environnementaux, comme la captation de carbone de l'atmosphère, la dépollution de l'air, l'enrichissement de la biodiversité, etc.

La captation en carbone de ces arbres avant l'abattage n'est pas considérée perdue, sous l'hypothèse que le bois va être réutilisé (par exemple, dans le secteur de construction). Pourtant, le potentiel de captation en carbone ainsi que les autres services environnementaux de ces arbres continueraient pour le reste de leur vie, s'ils n'étaient pas abattus. Pour y compenser, de nouveaux arbres devront être plantés. Pour estimer le nombre d'arbres à planter dans le cadre du projet, une estimation à la base de l'outil fourni par l'Agence de services forestières des États-Unis a été effectuée[6]. Sur cette base, il a été estimé que pour compenser l'abattage de 1584 arbres, 3492 arbres devront être plantés (tableau suivant). Cette méthode, qui dépasse le cadre des émissions de GES, a l'avantage de produire une estimation « conservatrice » ne surestimant pas la captation et la séquestration de carbone :

- L'effectif des arbres à planter est considéré comme constitué d'arbres jeunes : les arbres jeunes sont moins performants que les arbres matures concernant les services écosystémiques, ce qui conduit à planter 2,2 arbres jeunes pour 1 arbre abattu;

[6] Tree Replacement Calculator ;Développé par David J. Nowak, US Forest Service, NY; Tim Aevermann, Federal Institute for Population Research, Germany

- Les arbres jeunes ont a contrario un taux d'absorption de CO_2-eq plus élevé que les arbres matures : les arbres plantés capteront et séquestreront sur les premières années plus de CO_2-eq que les arbres qui auront été abattus.
- L'estimation de captation et séquestration est ensuite réalisée en utilisant un ratio moyen basé sur un arbre mature [7] : le gain d'émissions calculé constitue par conséquent une « fourchette basse ».

Tableau 9 : Répartition des coupes d´arbres et estimation de la compensation

Diamètre ou DHP (cm)	1 à 10	10 à 20	21 à 30	31 à 40	41 à 50	51 à 60	61 à 70	71 à 80	81 à 90	91 à 100	101 et +	Total / Moyenne
Nb d'arbres à abattre	**310**	**338**	**355**	**326**	**125**	**49**	**32**	**30**	**10**	**5**	**4**	**1 584**
Diamètre ou DHP (moyennes) cm	6.1	15.8	25.8	35	44.7	55.8	65.8	75.3	86.6	94.8	117	**26.7**
Diamètre ou DHP (moyennes) pouces	2.3	5.9	9.8	13.8	17.3	21.7	25.6	29.5	33.9	37	46.1	**10.3**
À planter par arbre abattu												
Feuillus grand déploiement (d= 50mm)	0.7	0.9	2.1	4.2	5	5.9	6.4	6.2	3.3	3.6	3.9	
Conifères grand déploiement (d=130mm)	0.4	0.5	1.2	2.4	2.8	3.3	3.6	3.5	1.9	2.0	2.2	
Nb d'arbres total à planter : 3404 (85% feuillus, 15% conifères)	203	284	443	1281	584	270	191	174	31	17	15	**3 492**

Les quantités d'abattage ne tiennent pas compte des arbres morts destinés à l'abattage, des arbres en boisés et des haies/grands arbustes. Les quantités d'arbres à abattre sont une estimation selon la conception de référence et les impacts de cette conception de référence ne sont pas tous intégrés (il sera nécessaire de produire ultérieurement des ajustements pour les tronçons TW-09, TW-19 et TW-20). (SYSTRA, Mars 2022)

[7] À la base d'une captation de carbone moyenne de 22kg/CO_2 par an par arbre mature (Source : Agence de l'Environnement Européenne)

Le potentiel de captation de **3492 arbres est ainsi estimé au minimum à 77 t CO_2**-eq par an et compense par conséquent largement **l'abattage des 1584 arbres**.

La stratégie de compensation prévue par la municipalité porte désormais sur la plantation d'environ 30 000 arbres (85% feuillus et 15% de conifères), avec la répartition suivante :

- Plantation de 5 000 arbres environ dans le « façade à façade », les pôles d'échange et le centre d'exploitation et d'entretien;
- Plantation de 25 000 arbres environ hors du « façade à façade », des pôles d'échange et du centre d'exploitation et d'entretien.

L'ensemble des arbres sera planté en milieux centraux (ville) principalement dans les parcs et en arrière trottoir. Par conséquent et à partir de ces hypothèses, cette compensation ne devrait pas avoir d'effet collatéral en l'absence de suppression d'espaces naturels pouvant présenter un intérêt écologique et d'espaces agricoles. Sur ces bases, le potentiel de captation peut désormais être estimé à **660 t CO_2-eq par an** (22 kg CO_2-eq/arbre x 30 000 arbres)**, soit un gain de l'ordre de 583 t CO_2.eq** (660 t CO_2-eq – 77 t CO_2-eq) **par an par rapport à la stratégie de compensation précédente**.

Si on inclut ce gain supplémentaire de 583 t CO_2-eq par an dans l'évaluation GES du projet**, l'équilibre carbone serait atteint en 2034, soit deux ans plus tôt**.

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 8 **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 **13 ans** après la mise en service.

Hors incertitude, le point neutre est atteint **11 ans** après la mise en service.

Tableau 10: 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

N° Annexe MELCC	Horizons	2026	2033	2035	2038	2041
	Postes	tCO_2 cumulées	tCO_2 cumulées	tCO_2 cumulées	tCO_2 cumulées	tCO_2 cumulées
	Travaux	**- 127 330**	**- 127 330**	**- 127 330**	**- 127 330**	**- 127 330**
MATCO	*Émissions de GES attribuables à la production de matériaux de construction*	- 97 876	- 97 876	- 97 876	- 97 876	- 97 876
B-1	*Émissions de GES attribuables aux systèmes de combustion mobile*	- 757	- 757	- 757	- 757	- 757
B-2	*Émissions de GES attribuables aux systèmes de combustion mobile*	- 1 499	- 1 499	- 1 499	- 1 499	- 1 499
B-4	*Émissions de GES attribuables au transport des matériaux de construction, d'excavation et de remblais*	- 13 062	- 13 062	- 13 062	- 13 062	- 13 062
B-5	*Émissions de GES attribuables aux activités de déboisement*	- 14 101	- 14 101	- 14 101	- 14 101	- 14 101
B-6	*Émissions de GES liées à l'utilisation d'explosifs*	- 35	- 35	- 35	- 35	- 35
	Exploitation	**12 685**	**99 134**	**140 543**	**170 039**	**216 809**
B-2	*Émissions de GES attribuables aux systèmes de combustion mobile*	*- 15*	*- 122*	*- 167*	*- 198*	*- 244*
B-3	*Émissions de GES attribuables à l'utilisation d'énergie électrique*	*- 10*	*- 80*	*- 110*	*- 130*	*- 160*
B-7	*VP*	*26 160*	*196 646*	*261 481*	*301 529*	*356 532*
B-7	*Autobus*	*- 13 790*	*- 100 039*	*- 124 419*	*- 135 610*	*- 144 804*
B-7	*Tramway*	*- 82*	*- 656.8*	*- 903*	*- 1 067.2*	*- 1 313.5*
B-7	*Métrobus*	*- 3*	*- 20*	*- 28*	*- 33*	*- 40*
B-8	*Effet de la décongestion sur les émissions de GES des véhicules en circulation : Camions*	*424*	*3 406*	*4 690*	*5 549*	*6 839*
	Solde hors incertitude	**- 114 645**	**- 28 196**	**13 213**	**42 709**	**89 479**
	Fourchette basse travaux (-30%)	**- 76 446**	**10 003**	**51 412**	**80 908**	**127 678**
	Fourchette haute travaux (+30%)	**- 152 844**	**- 66 395**	**- 24 985**	**4 510**	**51 280**

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).

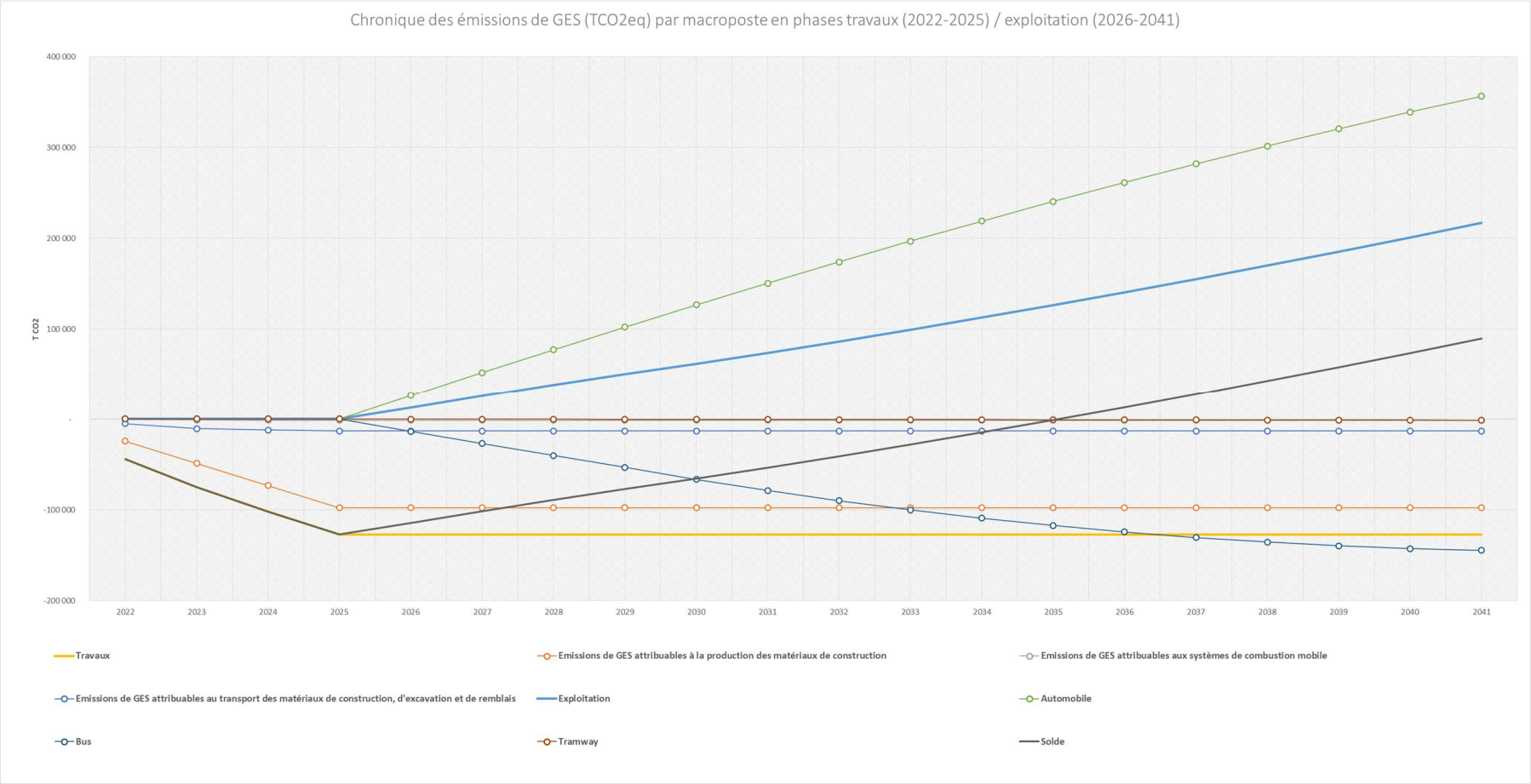


Figure 3-1 : Évolution des émissions de GES (TCo_2 cumulées) par macro-poste en phases travaux (2022-2025) et exploitation (2026 – 2041) hors incertitude liée à la phase travaux

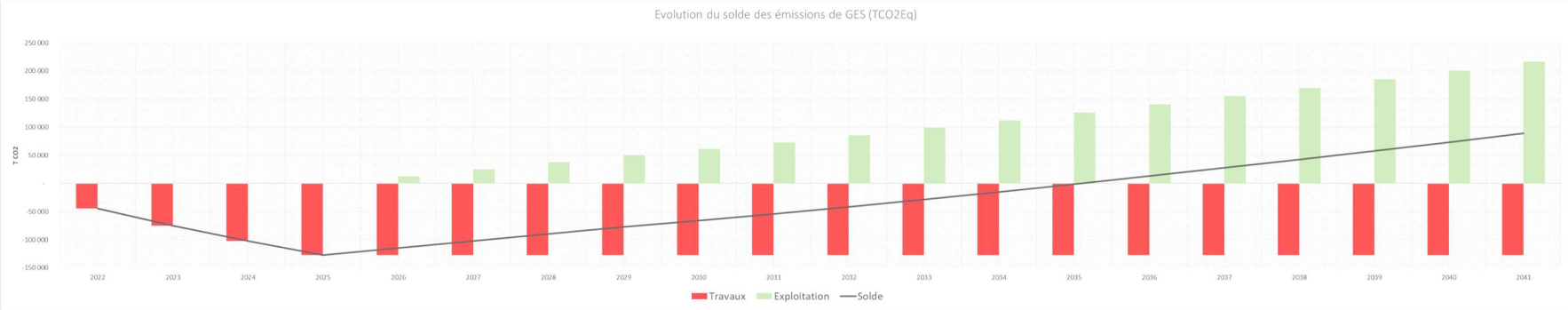


Figure 3-2 : Évolution des émissions de GES (TCO_2 cumulées) en phase travaux et en phase exploitation de 2022 à 2041 hors incertitude liée à la phase travaux

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 avec 77% des émissions en phase travaux, le béton totalisant 52% des émissions liées aux matériaux de construction et l'acier 32%. Cette prédominance du béton met en avant l'intérêt d'utiliser des ciments moins carbonés pour optimiser le bilan GES du tramway;
- Le déboisement représente à ce stade le second poste d'émission de CO_2-eq avec 11% des émissions de la phase travaux;
- Les activités de transport des matériaux de construction, d'excavation et de remblais totalisent environ 10% 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 véhicules de promenade, 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 11 ans en « scénario médian » hors incertitudes pour que les gains d'émission en phase exploitation liés à la diminution de la circulation des véhicules de promenade (km parcourus) compensent les émissions en phase travaux, alors même que les émissions de GES générées par les autobus et les véhicules de promenade 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 13 ans pour que le bilan devienne positif.