

Avril 2021

Etude d'incidences

Projet de construction du « **Métro Nord** »

Lot 2 : Ligne Liedts-Bordet

LIVRE VI – Bilan carbone

Demandeur



Mandaté par



Auteur de l'étude



en collaboration avec



Table des matières

1. PRINCIPES GÉNÉRAUX D'UN BILAN CARBONE.....	3
2. MÉTHODOLOGIE.....	6
2.1. Introduction.....	6
2.2. Objectifs.....	7
2.3. Analyse des outils existants.....	8
2.3.1. Bilan Carbone de l'ADEME.....	8
2.3.2. CarbOptimum.....	9
2.3.3. Base Carbone.....	12
2.4. Périmètres de l'étude.....	12
2.4.1. Axes d'analyse.....	12
2.4.2. Périmètre organisationnel.....	13
2.4.3. Périmètres opérationnels.....	13
2.4.4. Périmètre temporel.....	17
2.5. Limites de l'étude.....	19
3. OUTIL DE CALCUL.....	21
3.1. Développement d'un outil pour le Métro Nord.....	21
3.2. Principe et structure de l'outil.....	22
4. EVALUATION DES ÉMISSIONS DU PROJET ET DES ALTERNATIVES.....	24
4.1. Analyse du projet de base monotube.....	24
4.1.1. Construction de l'infrastructure.....	24
4.1.1.1. Désagrégation en sources d'émissions.....	24
4.1.1.2. Calcul des émissions.....	25
A. Energie (Sources mobiles de combustion).....	25
B. Energie (Consommations d'électricité).....	34
C. Emissions fugitives.....	37
D. Intrants.....	37
E. Amortissements.....	49
F. Gestion des déchets.....	49
G. Fret entrant.....	51
H. Fret sortant.....	62
I. Déplacements.....	67
4.1.1.3. Synthèse des résultats.....	69
A. Scénario de base.....	69
B. Etude de sensibilité.....	74
C. Conclusions.....	76
4.1.2. Exploitation de la ligne.....	77
4.1.2.1. Désagrégation en sources d'émissions.....	77
4.1.2.2. Calcul des émissions.....	78
A. En Phase Fonctionnement.....	78
B. En Phase Entretien et maintenance.....	90
4.1.2.3. Synthèse des résultats.....	94
4.2. Analyse des alternatives.....	100
4.2.1. Alternative bitube.....	100
4.2.1.1. Différences notables avec le projet de base monotube et hypothèses générales.....	100
4.2.1.2. Construction de l'infrastructure.....	102
A. Energie (Sources mobiles de combustion).....	102
B. Energie (Consommations d'électricité).....	106
C. Emissions fugitives.....	108
D. Intrants.....	108
E. Amortissements.....	114
F. Gestion des déchets.....	114
G. Fret entrant.....	116

H. Fret sortant	120
I. Déplacements.....	122
J. Synthèse des résultats	124
4.2.1.3. Exploitation de la ligne.....	130
A. Consommations d'énergie des stations.....	130
B. Conclusion.....	131
4.2.2. Alternative Tram.....	132
4.2.2.1. Introduction.....	132
4.2.2.2. Situation existante.....	134
A. Fonctionnement de la ligne	134
B. Synthèse	135
4.2.2.3. Alternative 0	136
A. Fonctionnement de la ligne	136
B. Optimisation de l'infrastructure.....	137
C. Synthèse	143
4.2.2.4. Alternative 0+	144
A. Fonctionnement de la ligne	144
B. Optimisation de l'infrastructure.....	145
C. Synthèse	148
4.2.2.5. Synthèses des résultats – comparaison des alternatives.....	149
5. CONTEXTUALISATION DES RÉSULTATS	152
5.1. Mise en relation avec des indicateurs de mobilité.....	152
5.2. Evaluation d'un facteur d'émission propre à la mise en œuvre du projet.....	153
6. DIFFICULTÉS RENCONTRÉES	158
7. RECOMMANDATIONS.....	160
7.1. Prise en compte de l'aspect bilan carbone dans le choix des autres matériaux.....	160
7.2. Prise en compte du potentiel de réemploi, de réutilisation et de recyclabilité dans le choix des matériaux	160
7.3. Prise en compte des critères liés au bilan carbone dans les cahiers des charges Travaux ..	161
8. TABLEAU DE SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS.....	162
9. CONCLUSIONS	163
10. RÉFÉRENCES	173
10.1. Cadre de référence	173
10.2. Publications.....	173
10.3. Articles.....	174
10.4. Sites Internet consultés.....	174

1. Principes généraux d'un bilan carbone

Les émissions de gaz à effet de serre¹ (GES) n'ont jamais été aussi élevées et leur concentration provoque un réchauffement global de l'atmosphère aux conséquences multiples (fonte des glaces, augmentation du niveau des océans, augmentation de la fréquence des catastrophes naturelles, augmentation des épisodes de sécheresse et diminution des ressources en eau, ...).

Dans un **objectif de lutte contre le réchauffement climatique**, des conventions sur l'environnement et le développement durable sont organisées depuis les années 1990 afin de fixer des objectifs climatiques en vue de **stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère**. Depuis le **Protocole de Kyoto** de 1997, les Etats mesurent leurs émissions de gaz à effet de serre, ce qui permet de calculer leur empreinte carbone. Ce protocole est un accord international dont l'objectif consistait à réduire les émissions de six gaz et groupes de gaz à effet de serre², sur deux périodes d'engagement dont la seconde s'est terminée en 2020.

Différents **objectifs de réduction des émissions européens et nationaux** ont été fixés :

- A l'échelle européenne : réduction d'au moins 40% des émissions de GES de l'Union européenne d'ici 2030 par rapport à 1990. En décembre 2020, les chefs d'Etat et de gouvernement de l'Union européenne ont décidé de passer cet objectif à 55%³ ;
- A l'échelle belge : les objectifs pour 2030 à l'échelle européenne sont répartis entre Etats membres et se traduisent pour la Belgique par une réduction d'au moins 35% d'ici 2030 par rapport à 2005⁴, pour les secteurs non-ETS⁵ ;
- A l'échelle régionale : le Gouvernement de la Région bruxelloise a pris l'engagement de réduire ses émissions de GES de 30% d'ici 2025, par rapport à 1990. Dans sa Déclaration de politique régionale pour la législature 2019-2024, il s'est en outre engagé à une réduction d'au moins 40% des émissions en 2030 par rapport à 2005⁶, pour les secteurs non-ETS et à approcher l'objectif européen de neutralité carbone à l'horizon 2050.

Le bilan carbone est une **évaluation de la quantité de gaz à effet de serre** (GES) émise dans l'atmosphère par les activités d'une organisation, d'une entreprise ou d'un territoire. Un outil de calcul associé à une méthodologie spécifique permet de calculer ces émissions produites au cours du temps, exprimées en **tonnes équivalent CO₂**.

¹ « Constituants gazeux de l'atmosphère, naturels ou anthropogéniques, qui absorbent et émettent des radiations à des longueurs d'ondes spécifiques dans le spectre des radiations infrarouge émises par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. Cette propriété cause l'effet de serre. » [Source : Bilan Carbone]

² Dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O), hydrofluorocarbures (HFC), composés perfluorés (PFC), hexafluorure de soufre (SF₆)

³ Source : Conseil européen : <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/climate-change/>

⁴ Source : Plan National énergie-climat (PNEC) 2021-2030

⁵ Pour le secteur non-ETS, c'est-à-dire, non couvertes par le système communautaire d'échange de quotas d'émissions à savoir : le transport, les bâtiments, les services, l'agriculture, les déchets.

⁶ Source : Plan énergie climat 2030 de la Région de Bruxelles-Capitale (octobre 2019)

De manière générale, les **objectifs amenant à l'élaboration d'un bilan carbone** sont multiples :

- Avoir une vision des émissions de GES** d'un projet ou des activités développées par une entreprise, un territoire, une ville, en identifiant et en quantifiant les sources qui sont à l'origine de ces émissions ;
- Identifier des pistes de réduction d'émissions et établir un plan d'actions ;**
- Proposer un outil d'aide à la décision** concernant les différents choix de conception d'un projet (comparaison entre plusieurs alternatives) ;
- Proposer un outil de sensibilisation et de réduction des émissions de GES** en ciblant tout particulièrement les sources très émettrices ;
- Identifier si un projet ou une activité existante s'inscrit à long terme dans une démarche de réduction des émissions de GES** et de lutte contre le réchauffement climatique ;
- Etudier la vulnérabilité d'une activité économique ou d'une collectivité** et sa dépendance aux énergies fossiles ;
- Anticiper des changements futurs** (réglementation, évolution de la fiscalité, contexte environnemental, ...) ;
- ...

Le **principe de calcul** consiste à décomposer un projet, les activités d'une entreprise, ... en une série de **sources d'émissions** pour lesquelles les émissions en tonnes équivalent CO₂ sont évaluées. Une source d'émissions est, par exemple, définie telle que la méthode Bilan Carbone (méthode développée en France initialement pour le compte de l'ADEME, voir plus loin. Cette méthode sera désignée dans la suite de cette étude par l'emploi de la majuscule (**Bilan Carbone**)) le propose, à savoir qu'elle correspond à une « **unité physique ou [un] processus rejetant un GES dans l'atmosphère**⁷ ». Par extension, elle correspondra également à des activités, telles que, par exemple, l'utilisation de matériaux ou des déplacements. En outre, par souci de concision, le terme « source d'émissions » sera parfois abrégé en le simple mot « source » dans la suite du document.

Par exemple, dans le cas du projet du Métro, les sources peuvent consister en :

- Le béton utilisé pour la construction du tunnel ;
- Le fait de consommer de l'énergie pour le chantier de construction d'une station ;
- Le fret nécessaire à l'acheminement de matériaux sur le chantier d'une station ;
- Le fait de consommer de l'énergie pour la traction des métros pendant une année ;
- Le fait de consommer de l'énergie pour l'éclairage d'une station.

Le **bilan global** est bien évidemment égal à la **somme des émissions de l'ensemble des sources**.

Pour une source donnée, les émissions sont égales au produit d'une **donnée d'activité** (DA) et du **facteur d'émission** (FE) correspondant.

⁷ Source : ABC (Association Bilan Carbone), Bilan Carbone (2017). Bilan Carbone V8. Objectifs et principes de comptabilisation

La **donnée d'activité** est par exemple définie comme étant une « *mesure quantitative de l'activité occasionnant l'émission des gaz à effet de serre* ». Il peut s'agir, en reprenant les exemples de sources précédents, de :

- Quantités de béton utilisées pour la construction du tunnel ;
- Consommations d'énergie pour le chantier de construction d'une station ;
- Tonnage-kilomètres relatifs au fret nécessaire à l'acheminement de matériaux sur le chantier d'une station ;
- Consommations d'énergie nécessaire à la traction des métros pendant une année ;
- Consommations d'énergie liées à l'éclairage d'une station.

Le **facteur d'émission** est quant à lui par exemple défini comme étant le « *facteur rapportant les données d'activité aux émissions ou suppression de gaz à effet de serre* ».

En reprenant les exemples cités ci-dessus, les facteurs d'émission correspondants peuvent s'exprimer comme suit :

- Tonnes d'équivalent CO₂ par tonne de béton utilisée pour la construction du tunnel ;
- Tonnes d'équivalent CO₂ par kWh consommé pour le chantier de construction d'une station ;
- Tonnes d'équivalent CO₂ par tonne-kilomètre relative au fret nécessaire à l'acheminement de matériaux sur le chantier d'une station ;
- Tonnes d'équivalent CO₂ par kWh consommé pour la traction des métros pendant une année ;
- Tonnes d'équivalent CO₂ par kWh consommé pour l'éclairage d'une station.

Les émissions peuvent consister en divers gaz à effet de serre, parmi lesquels, outre le CO₂, peuvent être cités le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les hydrofluorocarbures (HFC), l'hexafluore de soufre (SF₆), les perfluorocarbures (PFC), ... Afin de pouvoir comparer les émissions de gaz différents et de réaliser un bilan, il est nécessaire de les convertir en **tonnes équivalent CO₂**. Cette conversion consiste à multiplier le produit donnée d'activité x facteur d'émission par le PRG⁸ (ou en anglais, GWP : Global Warming Power) correspondant au gaz concerné.

Dans la suite de ce document, les émissions sont exprimées en tonnes équivalent CO₂.

Bien souvent, les sources seront regroupées en **postes d'émissions**, définis comme étant des « *émissions de GES provenant de sources ou de types de sources homogènes*⁹ ». Il pourra s'agir, par exemple, des intrants, du fret, des déplacements (voir plus loin). A l'instar des sources, par souci de concision, le terme « poste d'émissions » sera abrégé en le simple mot « poste » dans la suite du document.

⁸ Potentiel de réchauffement global : « *terme utilisé pour décrire la puissance relative d'un gaz à effet de serre (GES), en tenant compte de la durée de temps pendant laquelle il restera actif dans l'atmosphère. Les potentiels de réchauffement global actuellement utilisés sont ceux calculés sur 100 ans. Le dioxyde de carbone est considéré comme le gaz de référence et il lui est attribué un PRG égal à 1 pour 100 ans.* » [Source : Eurostat]

⁹ Source : ABC (Association Bilan Carbone), Bilan Carbone (2017). Bilan Carbone V8. Objectifs et principes de comptabilisation

2. Méthodologie

2.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter la méthodologie adoptée dans le cadre de ce bilan carbone.

Cette méthodologie, ainsi que les hypothèses posées ont été validées tout au long de l'étude par le Comité d'Accompagnement de l'étude d'incidences du projet Métro Nord.

La méthodologie s'est construite par étapes et a été nourrie par de multiples réflexions. La **mindmap** ci-dessous reprend les paramètres influençant les choix effectués et permet d'avoir une vision globale de toutes les problématiques liées au bilan carbone.

Les **objectifs**, **l'analyse des outils de calcul** et les **périmètres d'étude**, mis en évidence par les bulles blanches, sont les trois grands volets, interdépendants, sur lesquels la démarche a été élaborée.

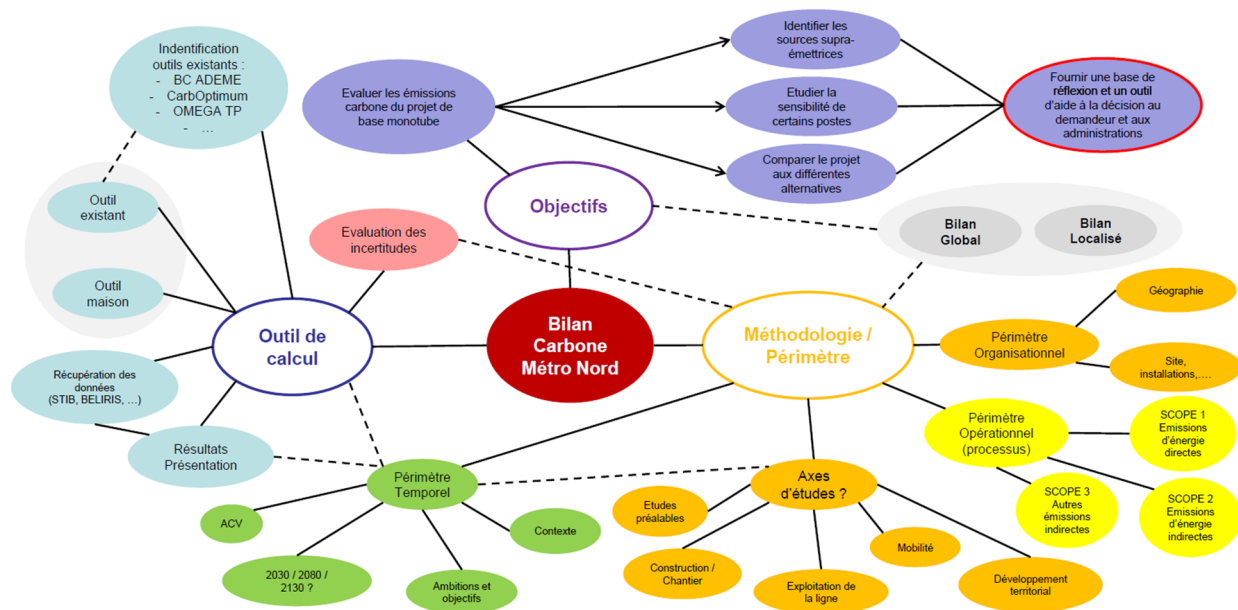


Figure 1 : Mindmap de la méthodologie du bilan carbone (ARIES, 2021)

Les sections suivantes développent chacun de ces trois volets. Une dernière section aborde les limites de l'étude.

Tout au long de l'étude, le processus s'est accompagné de démarches visant à collecter les **données propres au projet** ou, en l'absence d'informations, à poser des **hypothèses** réalistes. Ces démarches ont été effectuées en partenariat avec le demandeur (Beliris), l'exploitant (STIB) et le bureau d'études qui développe le projet (Bruxelles Métro Nord, ou, en abrégé, BMN).

2.2. Objectifs

Pour définir correctement les périmètres et les sources d'émissions à prendre en compte dans le bilan carbone du projet Métro Nord, la première étape est de définir les objectifs de ce bilan. Ici, il s'agit de répondre à la question « **Quel résultat souhaite-t-on présenter et que peut-il apporter à l'étude d'incidences ?** »

Le premier objectif du bilan carbone consiste à **évaluer les émissions du projet de base monotube**. Il s'agit de lister les différentes sources d'émission en visant dans un premier temps l'exhaustivité, en les prenant en compte dans leur totalité. Par la suite, certaines d'entre elles sont négligées, notamment au regard de leur importance relative par rapport à d'autres.

De cet objectif de base découlent **3 objectifs** qui peuvent être considérés en parallèle :

- **Identifier les sources dites « supra-émettrices »**, définies comme les sources émettant les plus grandes quantités de GES proportionnellement à la globalité ;
- **Etudier la sensibilité de certains postes** à la variation de certaines composantes du projet (composition du béton et mode d'acheminement du fret) ;
- **Comparer le projet aux différentes alternatives** (alternative bitube et alternatives « tram » (alternatives 0 et 0+)).

L'**objectif final** consiste à **fournir une base de réflexion et un outil d'aide à la décision au demandeur et aux administrations**.

Il s'agit également d'**insérer le projet dans les problématiques actuelles et dans le contexte de la région bruxelloise**. La réalisation d'un bilan carbone complet permet cette contextualisation.

L'extrait de la mindmap ci-dessous illustre l'articulation entre ces différents objectifs.

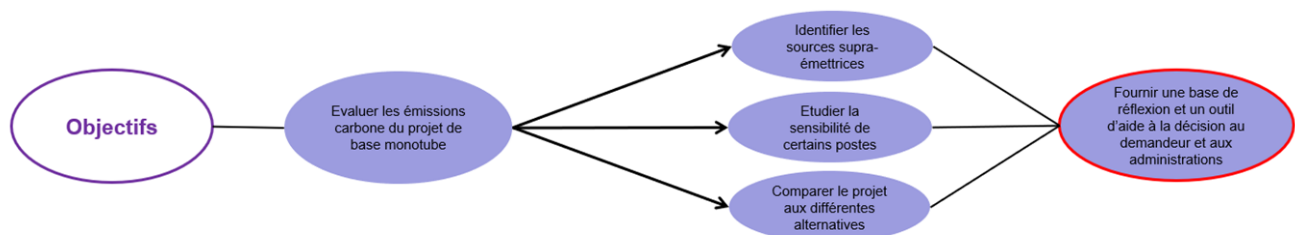


Figure 2 : « Cascade » d'objectifs - extrait de la Figure 1 'Mindmap de la méthodologie du bilan carbone' (ARIES, 2020)

2.3. Analyse des outils existants

Une phase préalable consiste à **examiner l'état de l'art** en matière de bilan carbone, de manière générale et dans le cas d'une infrastructure de transport en particulier.

Cette analyse a permis d'alimenter la démarche et les différents aspects cités précédemment et développés dans les sections suivantes : définir la **méthodologie** à mettre en œuvre dans le cadre du Métro Nord, définir les **périmètres** de l'étude, identifier les **types de postes et sources** à prendre en compte, mettre en place la **classification de ces postes et sources**, etc.

L'analyse a également permis de fixer les **terminologies** adoptées tout au long de l'étude et de déterminer des **facteurs d'émission**.

2.3.1. Bilan Carbone de l'ADEME

La méthode Bilan Carbone a initialement été développée pour l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (France)) par Jean-Marc Jancovici.

Elle propose « *la définition et la mise en œuvre d'une démarche de progrès en matière de GES, d'évaluation et de réduction des GES pour les organisations [notamment, les entreprises, les établissements publics et l'Etat] ainsi que pour les territoires [...]*¹⁰. » L'application de cette méthode se traduit par l'emploi de tableurs au format Excel permettant d'effectuer les calculs.

Cet outil est en évolution constante et est développé depuis 2011 par l'Association Bilan Carbone (ABC). La dernière version en date est la version 8, disponible depuis 2017.

L'outil destiné aux organisations a pour objectif d'évaluer les émissions annuelles de GES de celles-ci (par exemple, une entreprise). Ayant vocation à être utilisé d'une année à l'autre afin de pouvoir observer et comparer les évolutions au cours du temps, cet outil vise à les accompagner dans leur démarche de diminution d'émissions de GES.

La méthodologie appliquée nécessite de définir différents **périmètres d'analyse** :

- Le **périmètre organisationnel** : quelles sont les **installations** (bâtiments, installations industrielles, ...) concernées par le bilan carbone ?
- Le **périmètre opérationnel** : quelles sont les **sources** de GES à prendre en compte dans le périmètre organisationnel précédemment déterminé ?
- Le **périmètre temporel** : sur quelle **période de temps** comptabiliser les émissions de GES ?

Les tableurs de l'outil sont structurés en différents onglets, correspondant à différents **postes**, à savoir : Energie, Hors énergie, Intrants, Futurs emballages, Fret, Déplacements, Déchets directs, Immobilisations, Utilisation, Fin de vie. Chaque onglet permet d'introduire les données relatives aux sources concernées, et de calculer les émissions correspondantes en équivalent CO₂, à l'aide de données d'activité introduites par l'utilisateur et de facteurs d'émission issus d'une base de données incluse dans un autre onglet de l'outil.

¹⁰ Source : ABC (Association Bilan Carbone), Bilan Carbone (2017). *Bilan Carbone V8. Objectifs et principes de comptabilisation*

Les **données d'activité** introduites proviennent d'informations détenues par l'entreprise :

- Soit directement exploitables sans traitement : par exemple, consommations d'énergie déduites de factures d'énergie ;
- Soit devant faire l'objet d'un traitement : par exemple, distances, parcourues, tonnages transportés, ...

Cette méthode est utilisée par la STIB pour l'établissement du bilan carbone annuel de son organisation (déplacement des travailleurs, consommation de fournitures, ...).

Dans le cadre du bilan carbone réalisé pour le Métro Nord, l'analyse de cette méthode a permis de :

- **Structurer la démarche** en identifiant notamment :
 - les différents périmètres d'analyse potentiels ;
 - les postes et sources à prendre en compte ;
- **Fixer le vocabulaire** à adopter en s'inspirant des terminologies utilisées dans la méthode.

2.3.2. CarbOptimum

CarbOptimum est un outil élaboré par la Société du Grand Paris afin d'estimer **l'empreinte carbone de la future extension du métro de la région parisienne**, faisant l'objet du projet du Grand Paris Express.

L'outil propose de calculer les émissions de GES induites par le projet à travers toutes les phases - de la conception jusqu'à l'exploitation - afin d'identifier les opportunités de réductions de ces émissions et d'évaluer **l'impact global** du projet sur les changements climatiques¹¹. L'application de cette méthode se traduit par l'emploi de tableurs Excel permettant d'effectuer les calculs.

L'outil CarbOptimum a été développé en raison de l'absence à l'époque d'approche méthodologique permettant d'**étudier un projet de grande infrastructure** et de **l'évaluer au cours du temps**. En effet, la méthode Bilan Carbone de l'ADEME n'a pas été conçue pour la construction d'infrastructures et n'intègre pas la notion du temps dans sa méthodologie et son outil Excel, proposant plutôt d'effectuer une évaluation annuelle.

Le Grand Paris Express est un « *projet de réseau de transport public qui consiste en la création d'un nouveau métro automatique de 200 km, comprenant 68 gares et 7 centres techniques associés aux différentes lignes*¹² ». Bien que l'échelle du Grand Paris Express soit bien plus importante que le Métro Nord, les projets présentent un certain nombre de points communs : construction de stations et de tunnels, exploitation de lignes de métro, ... Aussi, l'analyse de cette méthodologie est-elle pertinente.

La méthodologie s'appuie sur de nombreuses recherches sur des outils existants visant à adapter le calcul des émissions de GES au contexte du projet du Grand Paris Express. Elle reprend

¹¹ Source : Société du Grand Paris (2012). *Dossier d'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique – Tronçon Pont-de-Sèvres <> Noisy-Champs (ligne rouge – 15 sud) – Etude d'impact - Méthodologie d'élaboration de CarbOptimum, outil de calcul pour l'estimation des émissions et consommations de CO2 induites par la réalisation du Réseau de transport public du Grand Paris*

¹² Source : Stratec (2018). *Grand Paris Express – Bilan des émissions de gaz à effet de serre du Grand Paris Express (mise à jour 2018) – Impacts attendus sur les émissions de GES*

notamment les grands principes et le vocabulaire utilisés dans la méthode Bilan Carbone de l'ADEME.

Le calculateur de l'outil est structuré en différents onglets, correspondant aux **5 axes d'analyse** développés séparément dans la méthodologie :

- **Axe Etudes et travaux préalables à la construction** : concerne les émissions liées aux nombreuses concertations et études préparatoires aux projets (études d'incidences, études géotechniques, débats et enquêtes publiques, ...), et plus particulièrement les émissions liées au travail de bureau ;
- **Axe Construction de l'infrastructure** : concerne les émissions liées aux chantiers et à la production, au transport et la mise en œuvre des matériaux de construction ;
- **Axe Fonctionnement de la ligne** : concerne les émissions principalement liées aux consommations d'énergie des stations et dépôts, de traction des rames de métro, ainsi que les émissions induites par les activités de gestion, maintenance et entretien de l'ensemble de la ligne et des infrastructures ;
- **Axe Mobilité** : concerne les émissions évitées grâce au report modal des véhicules particuliers vers les transports en commun, qui devrait induire une diminution de la distance parcourue par ce type de véhicules ;
- **Axe Développement territorial** : pose des hypothèses relatives aux accroissements de population et d'emploi prévisibles que peut engendrer l'extension du réseau du Grand Paris, en permettant au parc bâti de se développer pour proposer une nouvelle offre de logements et de bâtiments tertiaires autour de Paris.

Chaque axe d'analyse est basé sur une temporalité spécifique qui peut être modifiée en fonction des objectifs poursuivis.

L'outil propose ensuite un onglet « analyse des résultats » développant les résultats des différents axes et reprenant sous forme de graphes l'ensemble des émissions induites et évitées par le projet pour chaque axe, en fonction du temps.

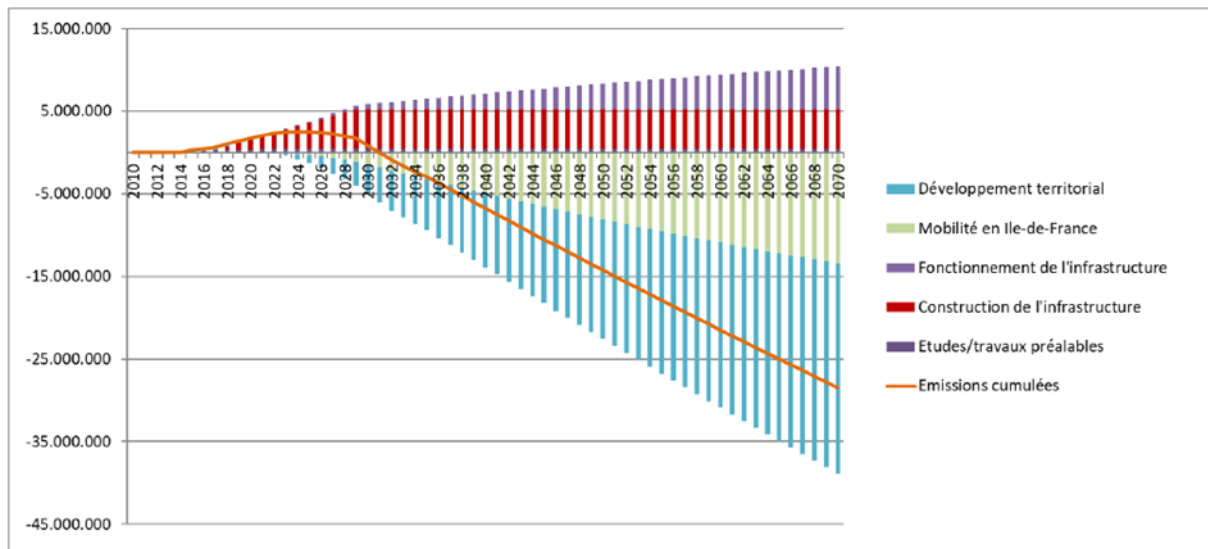


Figure 3 : Exemple de visualisation d'un graphe extrait de l'onglet « Analyse des résultats » reprenant le bilan des émissions de GES liées au projet du Grand Paris Express au cours du temps (Société du Grand Paris, 2018)

Les premiers résultats ont été produits en 2012 et mis à jour en 2018. Les hypothèses retenues ont évolué au cours du temps et permis d'actualiser les résultats quelques années plus tard.

Seule la méthodologie de l'outil est partagée. Il n'existe pas de version finalisée disponible pour tout externe au projet. Aussi, nos recherches ont porté uniquement sur l'exploitation de la méthodologie.

Dans le cadre du bilan carbone réalisé pour le Métro Nord, l'analyse de cette méthode a permis de :

- **Structurer la démarche** en identifiant notamment :
 - les **axes d'analyse**, avec notamment la prise en compte de la construction d'infrastructures de type métro ;
 - les **postes** et les **sources**, ainsi que certains **facteurs d'émission** à prendre en compte dans le cadre du projet ;
- **S'inspirer de la méthodologie** pour développer celle du projet du Métro Nord.

A la différence de la méthodologie Bilan Carbone de l'ADEME, qui base une grande partie de ses calculs sur un suivi des données d'activité à travers la récupération de factures ou toutes autres preuves de consommations réelles d'énergie, CarbOptimum analyse l'impact d'un projet futur et base de ce fait sa méthodologie sur une anticipation des émissions induites ou évitées à partir d'hypothèses choisies.

2.3.3. Base Carbone

La Base Carbone est une **base de données en ligne de facteurs d'émission**, administrée par l'ADEME. Il s'agit d'une source de données centralisée, établie dans un souci d'homogénéisation de celles-ci. Comprenant près de 5000 facteurs d'émission validés, elle est constamment mise à jour. Les données font l'objet d'une documentation concernant leur élaboration.

La Base Carbone est structurée suivant les 3 scopes et les postes définis dans la méthode Bilan Carbone (voir plus loin).

Cet outil est consultable gratuitement par tous et peut être alimenté par des tiers, après évaluation et validation des données proposées.

2.4. Périmètres de l'étude

Il s'agit ici de répondre aux questions : Quels types d'émissions reprendre ? Quelles parties du projet considérer ?

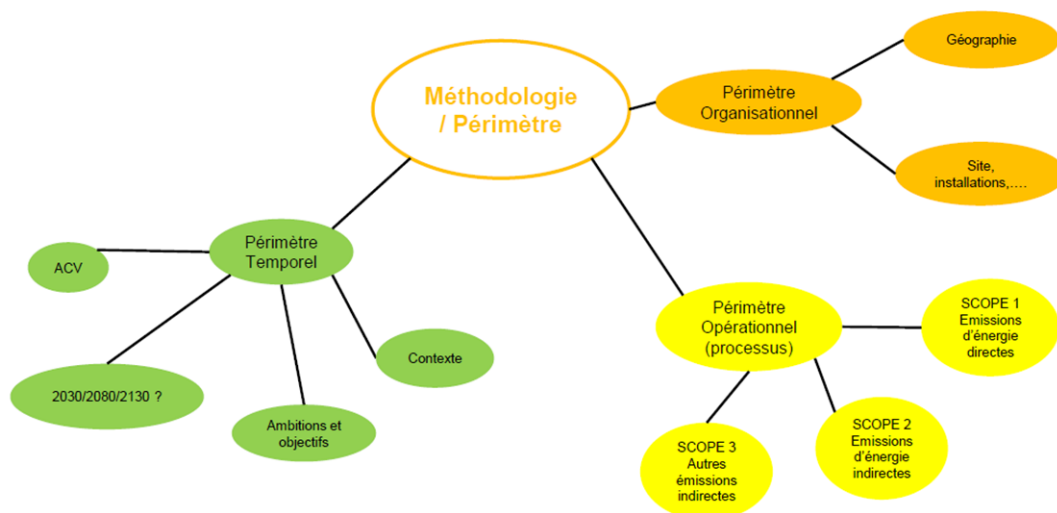


Figure 4 : Extrait de la Figure 1 'Mindmap de la méthodologie du bilan carbone' (ARIES, 2020)

2.4.1. Axes d'analyse

Les axes d'analyse correspondent aux différentes composantes de la mise en œuvre du projet (étapes préliminaires, chantier, fonctionnement, ...). L'évaluation du bilan carbone du projet Métro Nord porte sur deux axes d'analyse :

- Construction de l'infrastructure ;
- Exploitation de la ligne M3.

En complément des périmètres d'analyse développés ci-après, ceux-ci permettent de structurer la réflexion et d'identifier des différents postes et sources intervenant dans le bilan.

Les émissions évaluées sont ensuite replacées dans le contexte bruxellois et mises en relation avec différents indicateurs liés à la mobilité.

2.4.2. Périmètre organisationnel

Le **périmètre organisationnel** est défini comme « [l'] ensemble des sites, installations et compétences pris en compte lors d'un exercice de comptabilité carbone d'une organisation¹³ ». Comme abordé plus haut dans la présentation de la méthode Bilan Carbone, il s'agit de répondre à la question : « Quelles sont les installations prises en compte dans le bilan carbone ? »

Dans le cas du projet Métro Nord, le périmètre organisationnel correspond au **tunnel**, aux **7 stations**, au **puits PO** et à la **rampe d'accès**, ainsi qu'au **dépôt**, tant en phase de construction qu'en phase d'exploitation.

2.4.3. Périmètres opérationnels

Le **périmètre opérationnel** « correspond à l'ensemble des émissions générées par l'activité [ou le projet] de l'organisation et qui seront comptabilisées (émissions directes ou indirectes).¹⁴ » Comme abordé plus haut, il s'agit de répondre à la question : « Quelles sont les sources de GES à prendre en compte dans le périmètre organisationnel précédemment déterminé ? »

Les **émissions directes de GES** sont définies comme étant les « émissions de sources de GES fixes et mobiles, contrôlées par la personne morale / organisation¹⁵ ». Dans le cas du projet Métro Nord, il s'agit, par exemple, des émissions directes dues à la mise en œuvre du chantier de construction des infrastructures ou à l'exploitation de la future ligne. Il s'agit principalement d'émissions dues à des consommations d'énergie fossile.

Les **émissions indirectes de GES** sont définies comme étant les « émissions de GES conséquence des activités de la personne morale / organisation mais provenant de sources de GES contrôlées par d'autres entités¹⁶ ». Dans le cas du projet Métro Nord, il s'agit, par exemple, des émissions dues à sa mise en œuvre, au travers de l'emploi de matériaux lors de la construction des infrastructures, du fret engendré pour leur acheminement sur site ou encore de l'emploi de rames de métro lors de l'exploitation de la future ligne.

Souvent, les émissions indirectes sont scindées en 2 familles :

- Les **émissions indirectes de GES associées à l'énergie**, correspondant aux consommations d'énergie d'électricité¹⁷ ou aux consommations de vapeur, de froid, de chaleur, issues de réseaux de distribution ;

¹³ Source : ABC (Association Bilan Carbone), Bilan Carbone (2017). Bilan Carbone V8. Objectifs et principes de comptabilisation

¹⁴ Ibidem

¹⁵ Ibidem

¹⁶ Ibidem

¹⁷ L'électricité consommée (par exemple sur chantier ou lors de l'exploitation) n'est en effet en général pas produite sur place, au sein du périmètre organisationnel, mais est fournie par des producteurs extérieurs (centrales nucléaires, TGV, ...). Les émissions de GES correspondantes ont donc lieu en dehors du périmètre du projet.

- Les **autres émissions indirectes de GES**, couvrant une large gamme de postes : matériaux utilisés, fret, déplacement effectués, amortissements, ...

Dans le jargon associé au bilan carbone :

- Le terme « **Scope 1** » reprend les émissions **directes** de GES ;
- Le terme « **Scope 2** » reprend les émissions **indirectes associées à l'énergie** ;
- Le terme « **Scope 3** » reprend les **autres émissions indirectes**.

Le tableau ci-dessous résume la définition de ces 3 scopes.

Scope 1	Somme des émissions directes induites par la combustion d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon, tourbe...), la combustion de carburant, les émissions des procédés industriels et les émissions fugitives (par exemple dues aux fuites de gaz de climatisation).
Scope 2	Somme des émissions indirectes induites par la consommation d'électricité, ou la consommation de vapeur, froid ou chaleur via des réseaux de distribution.
Scope 3	Somme de toutes les autres émissions indirectes : achats de matériaux, amortissements, déplacements des employés, fret amont/aval, déchets directs...

Tableau 1 : Définition des 3 scopes (ADEME et FNTF, 2015)

Ces 3 scopes **peuvent ensuite être subdivisés en différents postes**. Les normes ISO 14064-1:2006 et ISO 14069:2013 proposent une subdivision en **23 postes**. Celle-ci, plus fine, ne correspond pas à celle adoptée dans les tableurs Excel de la méthode Bilan Carbone présentée plus haut. Cependant, chacun de ces 23 postes peut être repris dans un des postes cet outil Excel.

		Postes	N°
Scope 1	Emissions directes	Sources fixes de combustion	1
		Sources mobiles de combustion	2
		Procédés hors énergie	3
		Fugitives	4
		Utilisation des terres, leurs changements et la forêt	5
Scope 2	Emissions indirectes associées à l'énergie	Consommation d'électricité	6
		Consommation de vapeur, chaleur ou froid	7
Scope 3	Autres émissions indirectes	Énergie consommée importée à travers un réseau	8
		Achat de produits	9
		Immobilisation	10
		Déchets	11
		Transport de marchandises amont	12
		Déplacements professionnels	13
		Actif en leasing amont	14
		Investissement	15
		Transport des clients et visiteurs	16
		Transport de marchandises aval	17
		Utilisation des produits vendus	18
		Fin de vie des produits vendus	19
		Franchises en aval	20
		Actifs loués en aval	21
		Trajets domicile-travail des employés	22
Autres émissions non incluses dans les postes	23		

Tableau 2 : Correspondance entre scopes et postes (Bilan Carbone, 2017)

La totalité de ces postes n'est pas représentée au niveau du projet Métro Nord. En ce qui concerne l'axe « Construction des infrastructures », le *Guide sectoriel Travaux publics* de l'ADEME souligne en effet le fait que les postes 3, 5, 14, 15, 18, 19, 20 et 21 ne sont pas rencontrés dans le secteur, et que le poste 16 est négligeable.

Sont explicités ci-dessous les principaux d'entre eux¹⁸ :

□ **SCOPE 1 : Emissions directes :**

- **Poste 1 : Emissions directes des sources fixes de combustion :** correspondent aux émissions issues de la combustion de combustibles, au sein du projet (chaudières, groupes électrogènes, ...)
- **Poste 2 : Emissions directes des sources mobiles de combustion :** correspondent aux émissions issues de la combustion de combustibles ayant lieu dans des équipements, machines, véhicules en mouvement, au sein du projet (moteurs de véhicules, d'engins de chantier, ...) ;

¹⁸ Adapté de la méthodologie Bilan Carbone

- **Poste 4 : Emissions directes fugitives** : correspondent à des rejets de GES de sources diverses (par exemple, des fluides frigorigènes) ;
- **SCOPE 2 : Emissions indirectes** :
 - **Poste 6 : Emissions indirectes liées à la consommation d'électricité** : prennent également en compte la production et le transport de celle-ci ;
- **SCOPE 3 : Autres émissions indirectes** :
 - **Poste 9 : Achats de produits et services** : correspondent notamment aux émissions liées à la fabrication des biens consommés au sein du projet (extraction des matières premières, transformation, transport entre les étapes de transformation, traitement des rebus) ;
 - **Poste 10 : Immobilisations** : correspondent aux émissions liées à la production de biens utilisés pour la mise en œuvre du projet (engins de chantier, rames, ...) ;
 - **Poste 11 : Déchets générés** : correspondent aux émissions liées au traitement des déchets ;
 - **Poste 12 : Transport de marchandises amont** : correspond aux émissions liées au fret amont et tient compte de l'énergie nécessaire au transport des marchandises et à la fabrication du matériel roulant ;
 - **Poste 17 : Transport de marchandise aval** : correspond aux émissions liées au fret aval et tient compte de l'énergie nécessaire au transport des marchandises et à la fabrication du matériel roulant ;
 - **Poste 22 : Déplacements domicile-travail** : correspondent aux émissions liées aux déplacements des salariés et ouvriers pour se rendre à leur travail et tient compte de l'énergie nécessaire à la fabrication du matériel roulant et au transport.

Le schéma ci-dessus permet de visualiser les principaux postes et leur répartition au sein des 3 scopes, dans le cas d'une entreprise de travaux publics.

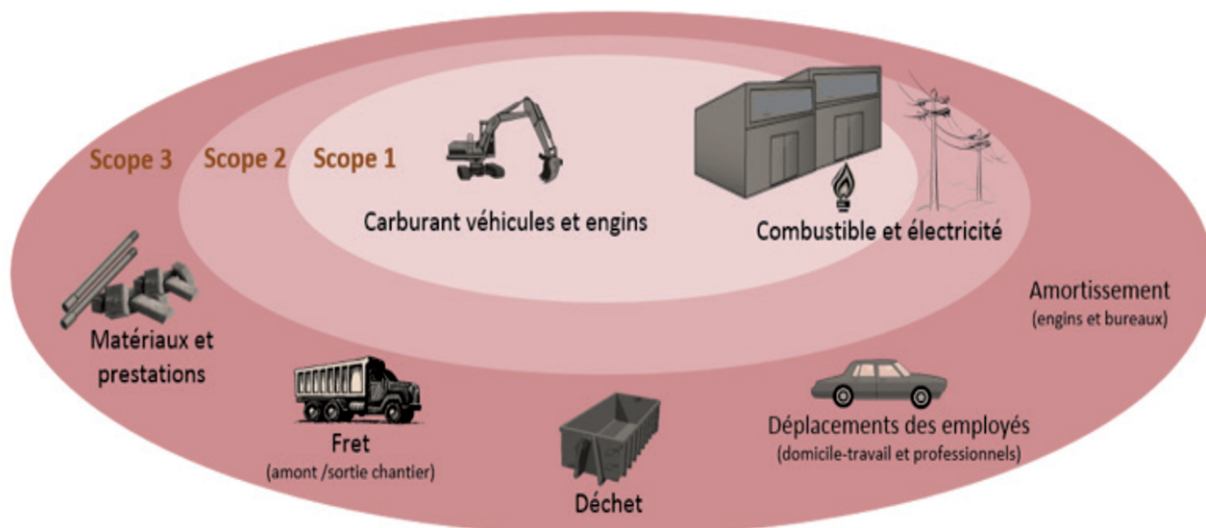


Figure 5 : Scopes et principaux postes (ADEME, 2015)

Pour une plus grande lisibilité, les postes seront dans la suite de ce rapport désignés par la nomenclature présentée dans le tableau ci-dessous. Celle-ci s'inspire pour certains postes des dénominations du *Guide sectoriel Travaux publics* de l'ADEME ou des tableaux de la méthode Bilan Carbone.

Les résultats seront par ailleurs parfois présentés pour des groupes de postes, comme présenté dans la dernière colonne du tableau.

N°	Postes	Dénomination adoptée	Groupe
1	Sources fixes de combustion		Energie
2	Sources mobiles de combustion	Energie (Sources mobiles de combustion)	
6	Consommations d'électricité	Consommations d'électricité	
4	Emissions fugitives	Emissions fugitives	Hors énergie
9	Achats de produits	Intrants	Intrants
10	Immobilisations	Amortissements	Amortissements
11	Déchets générés	Déchets générés	Déchets
12	Transport de marchandises amont	Fret entrant	Fret
17	Transport de marchandises aval	Fret sortant	
22	Déplacements domicile-travail	Déplacements domicile-travail	Déplacements

Tableau 3 : Nomenclature des postes dans le bilan carbone Métro Nord (ARIES, 2020)

Comme mentionné précédemment, chacun de ces postes regroupe une série de sources.

2.4.4. Périmètre temporel

Le **périmètre temporel** est la durée sur laquelle le bilan carbone est réalisé.

Dans le cas des entreprises, cette durée sera classiquement d'un an. Le bilan sera alors évalué tous les ans afin de pouvoir analyser l'évolution des émissions et identifier les potentiels d'amélioration.

Pour un projet d'infrastructure, tel que celui du Métro Nord, l'analyse porte plutôt sur la durée de sa réalisation et, potentiellement, sur la durée de son exploitation, voire de son démantèlement. Dans ce cas, le bilan carbone jouera notamment le rôle d'outil d'aide à la décision.

La durée de vie d'une grande infrastructure de transport telle qu'un métro dépasse largement 50 ans, voire 100 ans. En se basant sur une **mise en service de la ligne en 2030**, il est réaliste de considérer une durée de vie s'étendant jusqu'en 2130. Il semble néanmoins peu aisé de prévoir la nature et l'ampleur des émissions qui seront induites et évitées à l'horizon 2130.

En raison de ces incertitudes croissant avec l'éloignement de l'horizon de temps et de la difficulté de poser des hypothèses plausibles à l'échelle d'un siècle, il a été décidé de plutôt travailler sur une période de 50 ans (soit jusqu'en 2080).

Le périmètre temporel de l'étude choisi est donc de 50 ans.

En supposant une mise en service de la ligne au cours de l'année 2030, il est fort probable qu'elle n'ait pas lieu le 1^{er} janvier, mais à une date quelconque. Aussi, par convention d'écriture dans la suite du rapport (tant sur les graphes que dans le corps de texte ou les tableaux), lorsqu'une année sera mentionnée, cela correspondra à la période d'un an à partir de la date anniversaire de cette mise en service et non à l'année civile¹⁹.

Au cours de cette période, les émissions induites et évitées sont communiquées avec des temporalités différentes. On retrouve :

- Les **émissions annuelles**, qui seront comptabilisées chaque année jusqu'à l'horizon 2080. Certaines d'entre elles seront constantes, tandis que d'autres évolueront au cours du temps ;
- Les **émissions ponctuelles « uniques »**, qui n'auront lieu qu'une seule fois sur toute la durée de vie de l'infrastructure. Il s'agit principalement des émissions liées à la construction des infrastructures du projet.
- Les **émissions ponctuelles « récurrentes »**, qui consisteront en des émissions renouvelées à faible fréquence. Par exemple, les émissions liées au renouvellement des rails tous les 15 ans.
- Les **amortissements**, qui seront des émissions annuelles définies sur une durée de vie spécifique.

Il existe deux types possibles de présentation des résultats de ces émissions, illustrés sur les deux graphes théoriques ci-dessous. Le premier consiste à présenter les **émissions au moment où elles ont lieu**. Cela permet d'obtenir une **vision réelle de l'impact environnemental de la construction d'une infrastructure et de son exploitation au cours du temps**.

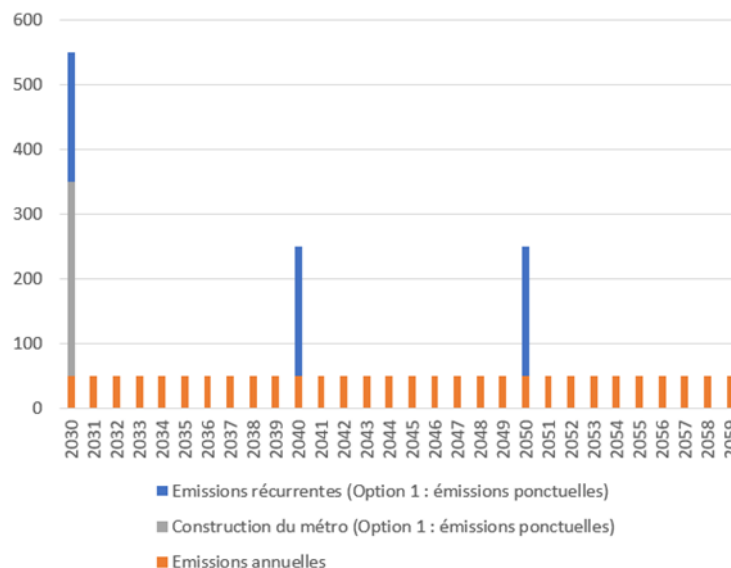


Figure 6 : Graphe théorique d'évolution des émissions – « incidences réelles » (ARIES, 2020)

Il est également possible de présenter les résultats en amortissant toutes les émissions ponctuelles sur plusieurs années. Cela permet d'illustrer les **émissions globales** engendrées

¹⁹ Par exemple, si la mise en service a lieu un 16 janvier, le fait de mentionner l'année 2045 fera référence à la période s'étendant du 16 janvier 2045 au 15 janvier 2046.

par le projet sur base annuelle et de les contextualiser, par exemple, au niveau régional. Le projet du Métro Nord pourra alors être comparé aux grandes problématiques de la Région bruxelloise et du pays en termes d'émissions de GES.

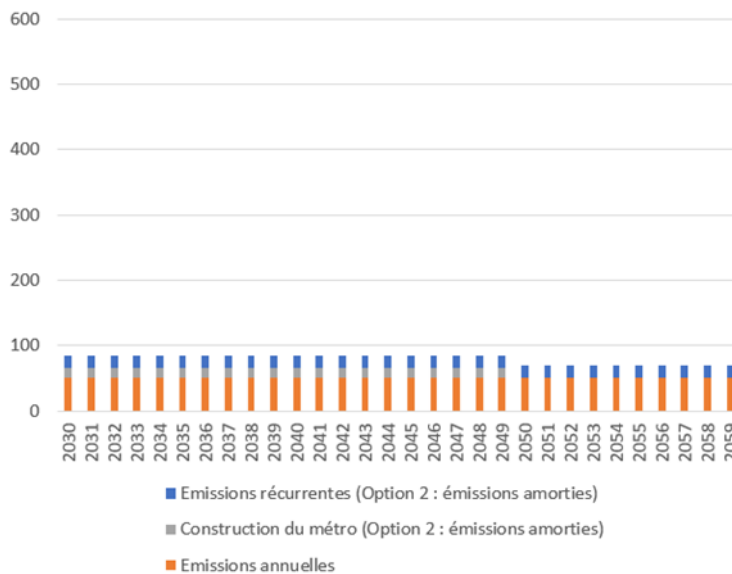


Figure 7 : Graphe théorique d'évolution des émissions – « émissions amorties » (ARIES, 2020)

En fonction des conclusions et des objectifs définis, ces deux types de présentation seront proposées afin de traduire au mieux les différentes problématiques du projet.

2.5. Limites de l'étude

Les émissions liées aux études préalables, jugées marginales par rapport à l'ensemble du projet, ne sont pas évaluées dans le cadre de ce bilan carbone.

L'évaluation du transfert modal vers le métro n'est pas réalisée, étant donné que le métro, comme toute infrastructure de transport, ne constitue pas à lui seul un levier d'action engendrant un transfert modal. Celui-ci ne peut s'envisager qu'au regard de l'ensemble des politiques de mobilité définies de manière coordonnée entre elles. Isoler une infrastructure unique dans cette réflexion n'est donc pas pertinent. Aussi, ce transfert modal n'est pas quantifiable.

En effet, l'ampleur de ce transfert modal dépendra d'une série de mesures de mobilité prises à l'échelle nationale, régionale ou à l'échelle plus locale du quadrant nord-est de la région. Ces éléments sont définis de manière plus détaillée dans le chapitre relatif aux incidences sur la mobilité à l'échelle macro (voir livre « Tunnel »).

De même, les impacts du développement territorial ne sont pas abordés. Contrairement à d'autres projets de création ou d'extension d'infrastructures de transports en commun, qui peuvent parfois être à l'origine de projets de densification de noyaux urbains ou de nouvelles urbanisations, le futur tronçon Liedts-Bordet est amené à s'implanter dans un contexte déjà

majoritairement urbanisé, pour lesquelles les marges de manœuvre en termes de développements immobiliers sont relativement réduites.

Pour ces raisons, et en accord avec le Comité d'Accompagnement, nous focalisons l'exercice du bilan carbone sur la construction et l'exploitation de l'infrastructure telle que proposée dans la demande de permis ainsi que sur les alternatives prévues par le cahier des charges.

3. Outil de calcul

3.1. Développement d'un outil pour le Métro Nord

Après l'analyse des outils existants, il apparaît que ceux-ci ne sont pas directement adaptés au projet du Métro Nord et qu'il est nécessaire de créer un outil propre à celui-ci.

L'une des raisons s'explique par la volonté de **maîtriser la gestion des nombreuses données manipulées et des calculs à effectuer**. En effet, l'élaboration du bilan carbone du projet Métro Nord, en raison de la taille de celui-ci, nécessite la détermination d'un grand nombre de données d'activité, pour lesquelles de nombreuses opérations doivent être réalisés en amont.

Cela requiert une **structuration de l'outil de calcul adaptée au projet**, d'autant plus celui-ci a pour particularité d'être composé de « sous-projets » (tunnel, stations, puits P0 et rampe d'accès, dépôt, ...), se décomposant, dans le cas des stations, une nouvelle fois en 7 sous-parties. Cet outil permet également de prendre en compte les ouvrages spécifiques à l'alternative bitube du projet, également étudiée dans le cadre de ce bilan carbone.

Dans cette optique, il semble capital de **centraliser l'ensemble des calculs dans un seul fichier**, afin d'éviter le risque d'erreurs inhérent aux nombreux liens qui auraient dû exister s'ils avaient été décomposés en plusieurs fichiers.

Un autre objectif consiste à **permettre la récupération des résultats à différents niveaux de désagrégation du projet** : par exemple, par sous-projet (émissions dues à la construction du tunnel ou d'une ou plusieurs stations, ...), par axe d'analyse (émissions dues à la construction des infrastructures, à l'exploitation de la ligne, ...) ou par poste (émissions relatives aux intrants, au fret, ...), ... L'outil doit donc permettre de gérer et de fournir ces résultats partiels.

Les sources d'émissions, désagrégées au plus bas niveau possible en fonction des données disponibles, doivent en outre être identifiées et dénommées de manière la plus claire possible afin de refléter la structure du projet.

Un outil tel que le Bilan Carbone ne permet de répondre à ces objectifs que dans une certaine mesure, étant plutôt adapté au calcul d'émissions annuelles. Il est en effet destiné à l'évaluation et au reporting d'une situation passée, pour laquelle de nombreuses données sont connues et relativement facilement disponibles. Les données d'activité y sont déterminées via un pré-traitement relativement simple, certaines d'entre elles pouvant même être directement introduites (par exemple, consommations énergétiques reprises de factures), contrairement au projet Métro Nord pour lequel toutes les sources doivent faire l'objet d'une évaluation plus ou moins complexe. Les sources d'émissions y sont globalement prédéfinies, et ne sont pas vouées à être modifiées. L'outil manque de ce fait de souplesse pour pouvoir être adapté à la structure du projet et produire des résultats partiels.

L'outil CarbOptimum ne permet pas non plus de répondre directement aux objectifs. Les niveaux de complexité abordés par l'outil ne correspondent pas nécessairement à ceux du projet Métro Nord.

Il est également apparu important de **disposer d'une certaine souplesse** dans la manière d'introduire les données en fonction de la forme et du type de celles-ci : pour certains sous-projets, les données géométriques disponibles correspondront par exemple à des longueurs qui

feront ensuite l'objet d'un traitement afin de déterminer des volumes, tandis que pour d'autres sous-projets, les volumes seront directement connus (via un métré déjà réalisé).

Pouvoir paramétrer l'ensemble des calculs a également été un objectif poursuivi, étant donné que le bilan carbone repose par essence sur un grand nombre d'hypothèses qu'il était important de pouvoir faire varier facilement au cours de l'étude, tout en impactant l'ensemble du bilan carbone. Aussi, les données exogènes sont clairement identifiées dans l'ensemble de l'outil.

Aussi, afin de pouvoir répondre à ces différentes préoccupations, un outil Excel a été développé. Cet outil combine les méthodologies de l'outil Bilan Carbone et les spécificités de CarbOptimum pour prendre en compte les particularités d'une infrastructure telle qu'une ligne de métro.

3.2. Principe et structure de l'outil

L'outil Excel créé se structure en différents onglets :

- Des onglets « Amont », reprenant :
 - Un onglet **Facteurs d'émission**, contenant, comme son nom l'indique, les facteurs d'émission nécessaires au calcul ;
 - Des onglets **relatifs aux différents axes d'analyse**, permettant de calculer les données d'activité relatifs aux sources qu'ils reprennent ;
- Un onglet **Base de données Sources**, constituant la colonne vertébrale de l'outil. Celui-ci est structuré comme une base de données dont chaque enregistrement correspond à une source d'émission donnée. Cette base de données est alimentée par les onglets « Amont » au niveau des données d'activité et des facteurs d'émission.
- Un onglet **Résultats**, dans lequel des bilans peuvent être tirés, à n'importe quelle échelle du projet (axe, sous-projet, ...).

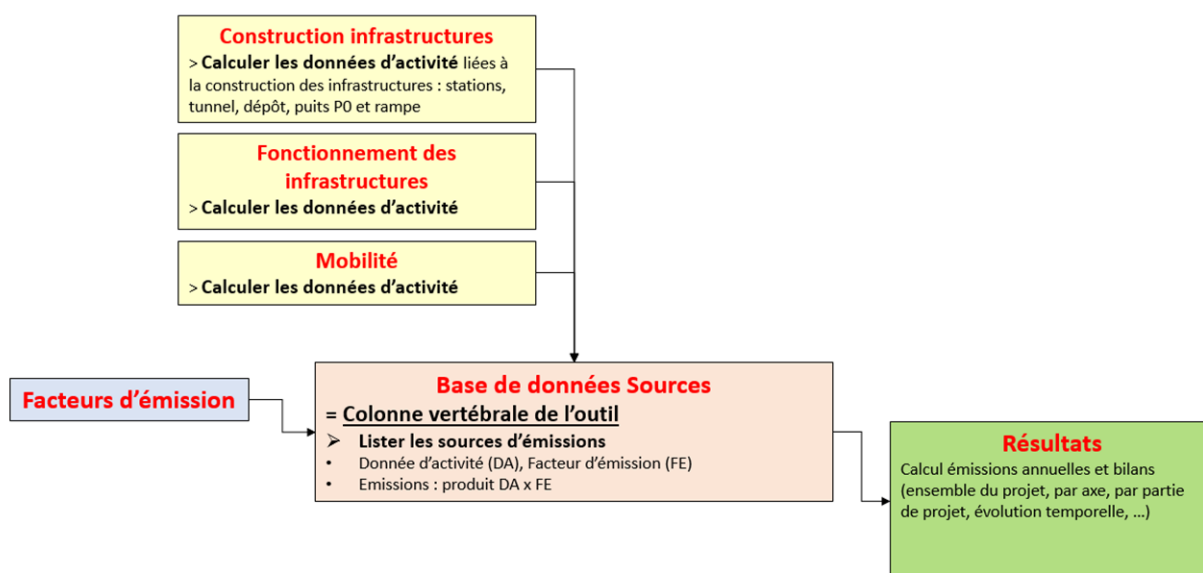


Figure 8 : Structure de l'outil (ARIES, 2020)

Dans le cadre de cet outil, les **postes d'émissions sont désagrégés en sources d'émissions**

les plus détaillées possibles, en fonction des données disponibles. Chacun d'eux est unique. Leur dénomination est déterminée sur base d'une hiérarchie déduite de la structure du projet.

L'appellation des sources d'émissions est déterminée sur base d'une hiérarchie, déduite de la structure du projet du Métro Nord et construite au fur et à mesure de l'élaboration de l'outil, comprenant les niveaux suivants (voir tableau ci-dessous).


		Exemples
	Axe du projet	Construction des infrastructures, Fonctionnement des infrastructures
	Sous-projet	Tunnel, Stations, Puits P0 et rampe d'accès, Dépôt
	Travaux	Démolition d'ouvrages existants, Construction des ouvrages
	Poste	Intrants, Fret entrant, Fret sortant, Déplacements, Gestion déchets, Energie, ...
	Mode (dans le cas du fret)	Routier, Ferroviaire, Fluvial
	Catégorie	Fabrication matériaux (pour le poste Intrants), Matériaux (pour le poste Fret), Déchets (pour le poste Fret), ...
	Source	Type de matériaux (pour la catégorie Fabrication matériaux), Type de déchets (pour la catégorie Déchets), ...

Tableau 4 : Définition des sources d'émissions (ARIES, 2020)

Ces appellations correspondront, par exemple :

- Au béton mis en œuvre pour la construction du tunnel ;
- A l'acier transporté par voie routière pour la construction des stations ;
- Aux déblais évacués par voie fluvial issus de l'excavation du tunnel.

Chaque source d'émissions est ainsi dénommée de manière unique.

Dans un premier temps, il s'agit de lister les sources d'émissions de manière exhaustive, en les prenant en compte dans leur totalité. Par la suite, certaines d'entre elles pourront être négligées, au regard de leur importance relative par rapport à d'autres, ...

Dans un but de transparence, l'ensemble des données et hypothèses est documenté.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

4.1. Analyse du projet de base monotube

4.1.1. Construction de l'infrastructure

4.1.1.1. Désagrégation en sources d'émissions

Le bilan carbone du projet Métro Nord est désagrégé en sources d'émissions, selon les **phases** et les **postes**, et ce, identiquement pour tous les sous-projets : tunnel, stations, puits P0 et rampe d'accès et dépôt (voir plus haut).

Par souci d'exhaustivité, toutes les phases sont, dans un premier temps, considérées. Au niveau de l'axe « Construction de l'infrastructure », il s'agit de phases de travaux :

- **Démolitions préalables ;**
- **Constructions des ouvrages.**

Dans un second temps, la **phase de démolitions préalables d'ouvrages existants**, qui concerne les travaux de certaines stations (Liedts, Verboekhoven et Paix) et du dépôt, sera négligée. Elles ne sont pas prises en compte dans ce bilan carbone. Ce choix s'explique par la petite taille des ouvrages à démolir et les durées des chantiers très réduites par rapport à celles nécessaires à la réalisation des infrastructures du projet. De plus, ces phases n'ont pas encore été analysées en profondeur et certaines données ne sont donc pas disponibles à ce stade de l'étude.

De même, toutes les sources d'émissions sont, dans un premier temps, considérées. Dans un second temps, certaines d'entre elles seront négligées, notamment au regard de leur importance par rapport à d'autres sources.

Au niveau de l'axe « Construction de l'infrastructure », le poste « Energie (Sources fixes de combustion) » est d'emblée négligé. Aucune source fixe de combustion n'est en effet considérée, les émissions lors du chantier étant en effet plutôt dues à l'utilisation d'engins mobiles (poste « Energie (sources mobiles de combustion) »).

Cette désagrégation propre à l'axe « Construction des infrastructures » est reprise dans le tableau ci-dessous.

Les calculs sont de manière générale réalisés pour un **scénario de base**. Pour certains postes, notamment « Intrants », « Fret entrant » et « Fret sortant », une étude de sensibilité à certains paramètres est réalisée localement. L'influence de ces paramètres est contextualisée à l'échelle du bilan global de l'axe « Construction de l'infrastructure » après l'analyse des différents postes qui le constituent, au niveau de la synthèse des résultats (voir section 4.1.1.3).

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Sous-projet	Phases Travaux	Poste	Sources d'émissions
Tunnel, Stations, Puits P0, Rampe d'accès, Dépôt	Démolitions préalables	<i>Non prises en compte dans le bilan carbone</i>	
	Construction des ouvrages	Energie (Sources fixes de combustion)	<i>Non pris en compte dans le bilan carbone</i>
		Energie (Sources mobiles de combustion)	Consommations d'énergie pour l'excavation des déblais
			Consommations d'énergie des engins de chantier pour la mise en œuvre des matériaux
			Congélation
		Energie (Consommations d'électricité)	Consommations d'énergie du tunnelier
			Consommations d'énergie des bases-vies
		Emissions fugitives	Fuites fluides frigorigènes
		Intrants	Matériaux - Béton
			Matériaux – Acier
			Matériaux - Verre
			Equipements
		Amortissements	Engins de chantier
		Déchets	Déblais
			Déchets de génie civil
		Fret entrant	Matériaux - Béton
			Matériaux – Acier
			Matériaux - Remblais
			Engins de chantier
		Fret sortant	Déchets de chantier
Engins de chantier			
Déplacements	Domicile-travail		

Tableau 5 : Désagrégation du projet Métro Nord, axe Construction des infrastructures (ARIES, 2020)

4.1.1.2. Calcul des émissions

A. Energie (Sources mobiles de combustion)

Les émissions directes sont dues aux consommations de fuel des engins de chantier.

Les trois sources prises en compte dans le bilan carbone sont :

- Les consommations d'énergie dues aux **excavations des déblais** ;

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

- Les consommations d'énergie des engins de chantier pour la **mise en œuvre des matériaux** ;
- Les consommations d'énergie liées à la **congélation** pour la réalisation des quais de certaines stations.

A.1. Consommations d'énergie pour l'excavation des déblais

Les émissions engendrées par l'excavation des déblais ne concernent ici que les **stations**, le **puits P0**, la **rampe d'accès** et le **dépôt**, sous-projets pour lesquels il est fait appel à des machines excavatrices fonctionnant au fuel. Les consommations relatives à l'excavation des terres du tunnel sont quant à elles comptabilisées au niveau des émissions indirectes dues aux consommations d'électricité du tunnelier (voir poste *Energie (Consommations d'électricité)*).

Les données d'activité correspondent à ces consommations de fuel. Elles peuvent être évaluées à partir d'une consommation spécifique, exprimée en litres de fuel par m³ de terres excavées ou remblayées. Par hypothèse, la valeur proposée dans le bilan carbone réalisé dans le cadre du projet du Grand Paris, de 1 l_{fuel}/m³, est ici prise en compte.

Le volume des déblais du dépôt concerne la totalité du site de Haren.

Le tableau ci-dessous reprend les volumes excavés et les consommations de fuel correspondantes.

Sous-projet	Volume de déblais [m ³]	Consommations [l _{fuel}]
Stations	757.690	757.590
Puits P0 et rampe d'accès	65.330	65.330
Dépôt	317.180	317.180
Total	1.140.200	1.140.200

Tableau 6 : Volume de déblais et consommations d'énergie nécessaire pour leur excavation (ARIES, 2020)

Le facteur d'émission utilisé, issu de la Base Carbone, est fixé à 3,17 kg eqCO₂/l (gazole non routier pour usage par des sources mobiles).

Le tableau ci-dessous reprend les émissions dues à l'excavation des terres. Les émissions sont proportionnelles aux volumes de déblais excavés.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]
Stations	2.402
Puits P0 et rampe d'accès	207
Dépôt	1.005
Total	3.614

Tableau 7 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Energie (Sources mobiles de combustion) – Excavation des déblais (ARIES, 2020)

A.2. Consommation des engins de chantier pour la mise en œuvre des matériaux

Les consommations d'énergie liées aux engins de chantier ne sont pas aisées à évaluer de façon tangible en amont de la mise en œuvre effective de celui-ci, en raison des grandes incertitudes relatives aux méthodes d'exécution déterminant le nombre, la nature exacte des engins de chantier (marque, modèle, ...) et leur durée d'utilisation, très variables d'un projet à un autre. Trop peu d'informations exploitables sont en effet disponibles à ce stade de l'étude, les prestataires n'ayant pas encore été désignés.

Il s'agit dès lors ici d'obtenir un **ordre de grandeur** réaliste relatif à cette source d'émission. Aussi, une approche top-down à partir d'indicateurs globaux est privilégiée et retenue. Ces indicateurs sont exprimés en consommations d'énergie par m³ de matériaux mis en œuvre (typiquement le béton et l'acier), permettant de calibrer les émissions. En effet l'approche bottom-up, à partir de données et d'hypothèses portant sur des puissances d'équipements et des durées de fonctionnement, semble dangereuse, tant les gammes de variation de ces données peuvent être larges et peuvent conduire à un grand risque d'erreurs, qui peuvent ensuite se cumuler.

L'évaluation des consommations des engins de chantier est encore peu développée à ce jour et le sujet reste fort peu abordé dans la littérature, quelle que soit l'affectation des bâtiments concernés. Dans certaines études, les émissions liées au chantier ne sont tout simplement pas prises en compte et sont négligées au regard des émissions liées à la fabrication des matériaux ou au fret. Le cas particulier de la construction de stations de métro souterraines, pour laquelle il est fait appel à de nombreuses machines pour divers usages particuliers (machines pour parois moulées, ...), n'est à notre connaissance pas développé.

Aussi, dans le cadre de ce bilan carbone, des données déduites d'une étude américaine²⁰ réalisée en 2005 sont utilisées. Bien que relativement déjà ancienne et ne portant que sur deux bâtiments de bureaux de 4.400 m² (l'un en structure acier, l'autre en structure béton), celle-ci est reprise comme référence dans plusieurs études ultérieures relatives aux impacts environnementaux et aux empreintes carbone des infrastructures de transports publics (notamment des gares²¹). Cette étude présente l'avantage de considérer des consommations d'engins de chantier tels que les camions-toupies (pour le mélange du béton) et les pompes à béton pour la mise en œuvre du béton, des grues pour la mise en œuvre de l'acier.

Il est important de souligner que cette évaluation ne prend pas en compte la mise en œuvre de la technique de la congélation prévue dans certaines stations (voir section suivante).

Les indicateurs considérés dans le bilan carbone sont des consommations spécifiques de fuel exprimées par unité de volume de matériaux mis en œuvre :

- 70 kWh/m³ pour le béton²² ;
- 80 kWh/m³ pour l'acier²².

²⁰ Guggemos A. (2005). *Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings*

²¹ Par exemple : Chester M. et Horvath A. (2008). *Environmental Life-cycle Assessment of Passenger Transportation: A Detailed Methodology for Energy, Greenhouse Gas and Criteria Pollutant Inventories of Automobiles, Buses, Light Rail, Heavy Rail and Air v.2* [UC Berkeley]

²² Les valeurs sont déduites en considérant les quantités de béton et d'acier mises en œuvre dans le bâtiment en structure béton, déduction faite des autres postes liés à la mise en œuvre d'autre matériaux, à la construction d'engins de chantier, ...

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Ces indicateurs permettent de déterminer les données d'activité correspondent aux consommations de fuel, reprises dans le tableau ci-dessous. Pour ce calcul, la masse volumique de l'acier est considérée égale à 7,8 t/m³.

Les émissions engendrées par l'excavation des déblais ne concernent ici que les stations, le puits P0 et la rampe d'accès. Le tunnelier étant alimenté en électricité, les consommations de celui-ci sont reprises dans le poste Energie (Consommations d'électricité) (voir poste correspondant).

Les autres consommations liées au chantier du tunnel (pose des voies, ...) sont négligées.

Sous-projet	Matériau	Volume [m ³]	Consommation engins chantier [kWh]
Stations	Béton	293.192	20.523.437
	Acier	4.772	381.744
Puits P0 et rampe d'accès	Béton	24.214	1.694.974
	Acier	360	28.830
Dépôt	Béton	30.275	2.119.250
	Acier	632	50.563

Tableau 8 : Consommation d'énergie des engins de chantier – Stations, puits P0 et rampe d'accès (ARIES, 2020)

Le facteur d'émission utilisé est issu de la Base Carbone et est fixé à 0,323 kg eqCO₂/kWh PCI (gazole non routier pour usage par des sources mobiles).

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant aux consommations d'énergie des engins de chantier.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]
Stations	6.752
Puits P0 et rampe d'accès	557
Dépôt	701
Total	8.010

Tableau 9 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Energie (Sources mobiles de combustion) – Consommation d'énergie des engins de chantier (ARIES, 2020)

Les émissions relatives à la réalisation des stations sont environ 10 fois plus élevées que celles correspondant au puits P0 et à la rampe d'accès. Cette différence s'explique principalement par les quantités de matériaux mises en œuvre.

A.3. Consommations d'énergie liées à la congélation

A.3.1. Généralités

Les contraintes particulières du projet ne permettent pas de réaliser l'ensemble des stations entièrement à ciel ouvert (selon la technique du Cut & Cover). En effet, le long du tracé, le nombre de terrains disponibles ainsi que la superficie de leur emprise restent limités. Une partie des zones de quais doivent dès lors être réalisées en souterrain. D'autre part, les ouvrages envisagés se trouvent en profondeur et dans la nappe la congélation permet à ce niveau de consolider le sol tout en pouvant travailler au sec.

Plusieurs techniques existent. Celle que nous retenons se réalise à partir des boîtes des stations concernées (réalisées quant à elles en Cut & Cover). Le but de la congélation est d'obtenir une structure de sol étanche et/ou résistante afin de pouvoir effectuer les travaux pendant toute leur durée.

Voir Livre I Introduction, partie 2, point 4.4. Description générale du chantier et calendrier de son exécution

Le principe de la technique, utilisée depuis la seconde moitié du XIX^e siècle, est de congeler le sol en utilisant un fluide frigorigène circulant dans un réseau de sondes frigorifiques installé dans le sol afin d'obtenir cette structure étanche. La géométrie de celle-ci dépend de la forme de la structure projetée et des caractéristiques mécaniques imposées.

Le processus de congélation se compose de **deux grandes phases**, engendrant toutes deux des consommations d'énergie : la mise en congélation proprement dite et le maintien de cette congélation pendant le temps nécessaire aux travaux à effectuer.

Les quatre stations concernées dans le projet sont Liedts, Colignon, Verboekhoven et Paix (voir les livres correspondants pour davantage de détails).

A.3.2. Méthodes de congélation

Il existe plusieurs méthodes de congélation :

- La **méthode ouverte** (congélation rapide à l'azote liquide) ;
- La **méthode fermée** (congélation lente avec machine frigorifique ou à la saumure) ;
- La **combinaison** des deux premières méthodes.

La méthode ouverte consiste à utiliser de l'azote liquide à très basse température (- 196°C), qui est acheminé sur chantier par camions-citernes et conservé dans des réservoirs de stockage permettant de le maintenir en phase liquide. Il est distribué sous pression (environ 5 bars) dans le réseau de sondes de congélation (ou tubes de congélation), qui se compose d'un ou de plusieurs groupes en parallèle de sondes disposées en série. Au cours de son trajet dans le réseau, l'azote liquide capte la chaleur du sol et se vaporise. Il est par la suite libéré à l'atmosphère sous forme gazeuse à la sortie du réseau, à une température d'environ -60°C. La quantité d'azote liquide introduite est régulée en fonction de la température de sortie qui ne doit pas dépasser une température donnée pour assurer la congélation dans les dernières sondes du réseau.

La méthode fermée consiste à produire le froid au moyen d'une machine frigorifique, via un circuit primaire dont l'évaporateur permet de maintenir à basse température le liquide frigorigène

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

qui circule dans un circuit secondaire comprenant le réseau de sondes de congélation. Le liquide frigorigère utilisé dans cette méthode peut être de différentes natures, le plus généralement utilisé étant la saumure (solution de chlorure de calcium), dont la température est de l'ordre de -25°C à -40°C . Comme dans le cas de la méthode ouverte, les sondes sont réparties en un ou plusieurs groupes dans lesquels elles sont disposées en série. Contrairement à la méthode ouverte, le circuit dans lequel circule la saumure est dans ce cas-ci fermé.

La méthode combinée consiste à utiliser la méthode directe pour la phase de mise en congélation et la méthode indirecte pour la phase de maintien de la congélation, en employant les mêmes sondes de congélation.

Les schémas ci-dessous illustrent le principe de fonctionnement des méthodes ouverte et fermée.

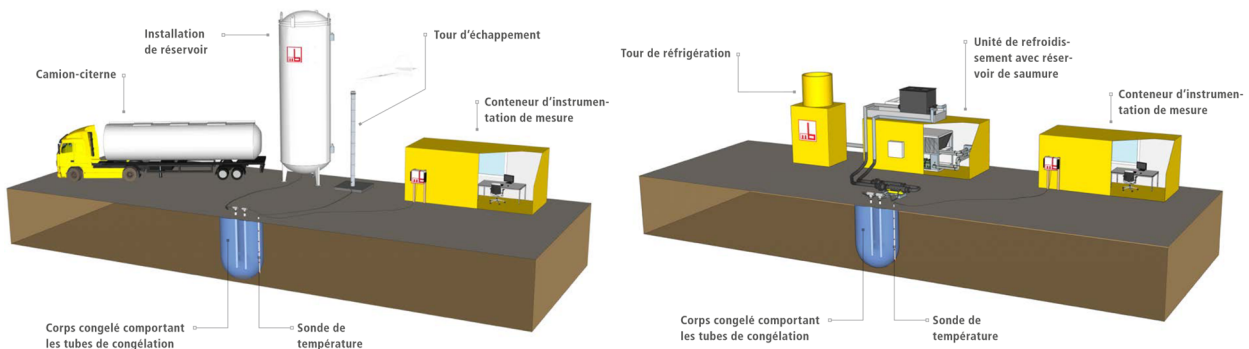


Figure 9 : Illustration du fonctionnement des méthodes de congélation : ouverte (à gauche) et fermée (à droite) (Max Bögl, sd)

Le tableau ci-dessous reprend les principaux avantages et inconvénients des différentes méthodes, principalement du point de vue des impacts potentiels sur les consommations d'énergie du processus.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

	Avantages	Inconvénients
Méthode ouverte	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de congélation plus court (plusieurs jours) - Davantage utilisée pour des temps de mise en œuvre brefs ou en raison de difficultés techniques - Plus grand rendement cryogénique : risques limités quant à une congélation incomplète, par une température du sol plus basse 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité de personnel spécialisé pour l'installation et l'alimentation en azote liquide dans les différents groupes de sondes. - Coût plus élevé
Méthode fermée	<ul style="list-style-type: none"> - Coût généralement moins élevé 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité de personnel spécialisé pour le contrôle du circuit fermé - Temps de congélation plus long (quelques semaines) - Plus grands risques liés au plus faible rendement cryogénique : <ul style="list-style-type: none"> o Nécessité d'un grand soin dans les études préliminaires o Allongement du délai de mise en œuvre ou impossibilité d'atteindre les températures voulues
Méthode combinée	<ul style="list-style-type: none"> - Combinaison des avantages des deux autres méthodes : <ul style="list-style-type: none"> o Délai plus court et risques plus limités pour la phase de congélation par la méthode ouverte o Maintien de la congélation plus économique par la méthode fermée 	

Tableau 10 : Avantages et inconvénients des méthodes de congélation (ARIES, 2021)

A.3.3. Principaux paramètres d'influence

De manière simplifiée, la relation ci-dessous donne la **quantité de chaleur nette à prélever de 1 m³ de sol pour amener celui-ci d'une température initiale à la température « de sol congelé »**. Celle-ci dépend des caractéristiques mécaniques de la structure de sol étanche et/ou résistante à obtenir pour pouvoir effectuer les travaux à réaliser.

Exprimée en J/m³, la relation dépend de quatre termes²³, respectivement relatifs au refroidissement des terres sèches, au refroidissement de l'eau liquide contenue dans le sol jusque 0°C, à la congélation de cette eau à 0°C et au refroidissement de la glace de 0°C jusqu'à la température de congélation :

$$Q_{\text{nette, congélation}} = \rho_{ts} \cdot C_{m,ts} \cdot (T_m - T_i) + w \cdot \rho_{ts} \cdot C_w \cdot (0 - T_i) - w \cdot \rho_{ts} \cdot C_f + w \cdot \rho_{ts} \cdot C_g \cdot (T_m - 0)$$

dans laquelle :

- ρ_{ts} : masse volumique des terres sèches (correspond au rapport entre la masse du sol sec et le volume total) [kg/m³] ;
- w : teneur en eau du sol (correspond au rapport entre la masse d'eau contenue dans le sol et la masse des terres sèches) [-] ;
- $C_{m,ts}$: chaleur spécifique massique des terres sèches [J/(kg.°C)] ;

²³ Adapté de R. Tornaghi (1982). *La congélation des sols* (dans Revue Française de Géotechnique, n°21)

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

- C_w : chaleur spécifique massique de l'eau : 4.186 J/(kg.°C) ;
- C_g : chaleur spécifique massique de la glace : 2.060 J/(kg.°C) ;
- C_f : chaleur latente massique de fusion de la glace : 334.000 J/(kg.°C) ;
- T_i : température initiale du sol [°C] ;
- T_m : température moyenne du sol congelé ($T_i > T_m$) [°C].

En posant $\Delta T = T_i - T_m$, ce qui représente la différence entre la température initiale du sol et la température moyenne du sol congelé, la première relation se simplifie dans la manière suivante :

$$Q_{nette,congélation} = -\rho_{ts} \cdot C_{m,ts} \cdot \Delta T + w \cdot \rho_{ts} \cdot [(C_g - C_w) \cdot T_i - C_f - C_g \cdot \Delta T]$$

Cette relation, théorique, donne une quantité de chaleur nette, correspondant à la congélation d'un volume de 1 m³ de manière adiabatique (c'est-à-dire sans échanges thermiques avec son environnement, **et donc sans pertes** – ces « pertes » consistant dans le cas présent en une augmentation de la température) dans des conditions idéales. Simplifiée, elle ne prend en outre en compte qu'une partie des paramètres liés au sol concerné. Elle est valable quelle que soit la méthode de congélation envisagée.

De manière plus générale, les consommations d'énergie nécessaire à la congélation de 1 m³ de sol peuvent s'exprimer sous la forme suivante, à partir de la quantité de chaleur nette décrite ci-dessus et tenant compte des diverses pertes et du rendement de la production de froid :

$$C_{\text{énergie congélation}} = \frac{\text{abs}\{Q_{nette,congélation}\} + \sum Q_{pertes}}{\eta_{production}}$$

Les pertes, notées ici $\sum Q_{pertes}$, peuvent notamment dépendre d'une série de facteurs et de contributions :

- Liés au sol : conductivité thermique du sol, présence de courants d'eau souterrains tel que c'est le cas pour certaines stations du projet, présence de sources de chaleur dans le voisinage (autres tunnels, ...), ... ;
- Liés à l'installation de refroidissement : longueur des réseaux de sondes de congélation, niveau d'isolation des tubes externes menant au réseau de sondes, écartement entre sondes, qualité d'exécution de l'installation, ...

Le rendement de production de froid, noté ici $\eta_{production}$, dépend également d'une série de paramètres, tels que la méthode de congélation choisie, le fluide frigorigène utilisé, ...

Enfin, la relation présentée ci-dessus ne tient pas compte des effets temporels. Or, comme mentionné précédemment, le processus de congélation se compose de deux grandes phases : la mise en congélation proprement dite et le maintien de cette congélation pendant le temps nécessaire aux travaux à effectuer. La durée de la phase de mise en congélation dépend en effet de la méthode utilisée, de l'écartement entre les sondes et de leur diamètre, des caractéristiques du sol (et notamment de sa granulométrie (les temps de congélation sont plus élevés pour des sols à plus fine granulométrie) et de ses caractéristiques volumétriques et thermiques (conductivité) du sol refroidi et congelé), du gradient thermique fixé par le projet.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Les consommations d'énergie pour la congélation de 1 m³ de terre pendant la totalité du processus peuvent dès lors s'écrire sous la forme de deux contributions correspondant aux deux phases :

$$C_{\text{énergie congélation}} = C_{\text{énergie, mise en congélation}} + C_{\text{énergie, maintien congélation}}$$

Il s'agit dès lors de consommations unitaires.

Etant donné la complexité du processus et les nombreux paramètres qui interviennent, l'évaluation des consommations d'énergie liées à la congélation sera difficile à mener. Aussi, l'estimation des émissions de gaz à effet de serre engendrées par le processus sera effectuée à partir de données fournies par BMN (voir section suivante).

Afin de connaître de manière plus fine l'importance des consommations d'énergie engendrées par de tels travaux, il est recommandé de mettre en place un **monitoring** tout au long des deux phases de congélation, pour l'ensemble des stations concernées. Cela permettra de vérifier les ordres de grandeur estimés préalablement, de potentiellement déterminer des paramètres d'influence tels que le type de sol rencontré et d'adapter éventuellement le processus en cours de chantier.

A.3.4. Emissions de gaz à effet de serre dues aux consommations d'énergie dans le cas du projet du Métro Nord

Dans une note d'évaluation préalable, BMN a réalisé en 2017 une estimation des consommations d'électricité pour la congélation. Ces données seront utilisées dans le cadre de ce bilan carbone et les consommations totales qui en sont déduites constituent la donnée d'activité de la source d'émissions.

La méthode envisagée pour le projet est la **méthode fermée**, avec utilisation de saumure.

La relation ci-dessous correspond aux consommations d'électricité totales liées à la partie congelée d'une station, exprimées en kWh :

$$C_{\text{élec congélation}} = V_{\text{cong}} \cdot C_{\text{élec, mise en congélation, unit}} + V_{\text{cong}} \cdot C_{\text{élec, maintien congélation, unit}} \cdot \frac{d_{\text{maintien congélation}}}{d_{\text{mise en congélation}}}$$

dans laquelle :

- V_{cong} : volume des terres à congeler [m³] ;
- $C_{\text{élec, mise en congélation, unit}}$: consommations d'électricité unitaires pour la mise en congélation [kWh/m³] ;
- $C_{\text{élec, maintien congélation, unit}}$: consommations d'électricité unitaires pour le maintien de la congélation [kWh/m³] ;
- $d_{\text{maintien congélation}}$: durée du maintien de la congélation [mois];
- $d_{\text{mise en congélation}}$: durée de la mise en congélation [mois].

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Cette relation est inspirée de la note d'évaluation rédigée par BMN.

Les consommations relatives à la mise en congélation sont égales au produit du volume de terres à congeler et des consommations unitaires correspondant à cette phase, tandis que les consommations relatives au maintien de la congélation sont égales au produit du volumes de terres à congeler, des consommations unitaires correspondant à cette phase et du rapport entre la durée du maintien en congélation et la durée de mise en congélation. Cela signifie que les consommations liées au maintien de la congélation dépendent de la durée de mise en congélation : plus celle-ci est longue, plus les consommations liées au maintien seront courtes.

Le tableau suivant reprend les données d'entrées. Par hypothèse, les données sont reprises de la note d'évaluation préalable de BMN de 2017 pour les durées et les consommations d'électricité unitaires des deux phases. **Les volumes de terres à congeler ont été actualisés depuis et les valeurs les plus récentes disponibles, évaluées par BMN, sont utilisées ci-dessous.**

Station	Volume de sol à congeler [m³]	Phase de mise en congélation			Phase de maintien de la congélation			Total [kWh]
		Durée [mois]	Cons. unitaire [kWh/m³]	Cons. Totale [kWh]	Durée [mois]	Cons. unitaire [kWh/m³]	Cons. Totale [kWh]	
Liedts	8.500	3	110	935.000	17	44	2.119.333	3.054.333
Colignon	6.600	3	110	726.000	13	44	1.258.400	1.984.400
Verboekhoven	8.838	3	110	972.180	16	44	2.073.984	3.046.164
Paix	9.000	3	110	990.000	16	44	2.112.000	3.102.000
Total	32.938							11.186.897

Tableau 11 : Consommations d'électricité liées à la congélation – Stations (ARIES, 2021, d'après BMN)

L'électricité sera produite au moyen de groupes électrogènes. Le facteur d'émission est déterminé à partir du facteur d'émission établi par le GIEC pour la combustion du diesel (74.100 kg/TJ) et du rendement d'un groupe électrogène, pris ici égal à 30% par hypothèse. Le facteur d'émission obtenu est par conséquent fixé à 890 g eqCO₂/kWh.

Les émissions correspondantes sont évaluées à **9.956 teqCO₂**.

B. Energie (Consommations d'électricité)

Les émissions sont dues aux consommations d'électricité sur chantier. Il s'agit d'émissions indirectes.

Les deux sources prises en compte dans le bilan carbone sont :

- Les consommations d'électrique liées au **fonctionnement du tunnelier** ;
- Les consommations d'électrique liées à l'**occupation des bases-vies**.

B.1. Consommations d'énergie du tunnelier

Les consommations liées au fonctionnement du tunnelier peuvent être évaluées sur base d'une consommation spécifique, exprimée par m³ de terres excavées et constituent la donnée

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

d'activité. Etant donné le manque d'informations sur le type de tunnelier qui sera mis en œuvre pour le projet du Métro Nord²⁴, la valeur proposée dans le bilan carbone réalisé dans le cadre du projet du Grand Paris, de 20 kWh/m³ est ici considérée. Elle correspond à la médiane des consommations liées à différents tunneliers, s'échelonnant de 5 à 40 kWh/m³. Ces consommations spécifiques couvrent tant le creusement du tunnel que l'évacuation des déblais.

Le volume de déblais du tunnel étant de 296.339 m³, les consommations s'élèvent à 5.926.787 kWh.

Le facteur d'émission utilisé est fixé à 230 g eqCO₂/kWh²⁵, valeur correspondant à la production d'électricité en Belgique. Lors de la construction des infrastructures, l'électricité alimentant les installations et engins de chantier est supposée provenir du réseau de distribution classique et non du réseau de distribution de la STIB.

Les émissions correspondantes sont évaluées à **1.363 teqCO₂**.

B.2. Consommations d'énergie des bases-vies

Les **bases-vies** (containers de chantier) seront installées sur le chantier de chaque station, ainsi qu'au niveau du site de Haren. Elles abriteront une série d'équipements nécessaires à l'occupation des travailleurs : bureaux, vestiaires, sanitaires, local repas, ...

Sur le site de Haren, des **logements temporaires** seront en outre installés.

Les données d'activité correspondent donc aux consommations d'électricité. Celles-ci sont estimées :

- sur base des superficies des bases-vies prévues par BMN, ainsi que du planning et des horaires de travail fixés dans le cahier des charges établis par BMN ;
- des consommations spécifiques annuelles, fixées par hypothèse à 250 kWh/(m².an)²⁶.

Le tableau ci-dessous reprend les données considérées pour chaque base-vie.

²⁴ Il existe deux grandes catégories de tunneliers : les tunneliers à pression de terre et les tunneliers à pression de boue, pour lesquelles les consommations d'énergie diffèrent. L'utilisation d'un tunnelier à pression de boue nécessite une centrale de séparation de la bentonite. Celle-ci est utilisée pour assurer le colmatage des terres à l'avant du tunnelier dans un milieu gorgé d'eau et ainsi stabiliser le front de taille. L'évacuation des déblais se fait à l'aide d'un convoyeur à bande dans le cas d'un tunnelier à pression de terre, tandis qu'elle se fait à l'aide d'un tuyau de transport de boue dans le cas d'un tunnelier à pression de boue.

²⁵ Source : AwAC (Agence wallonne de l'air et du climat), valeur pour la Belgique, pour l'année 2017

²⁶ Cette valeur est proposée dans l'évaluation du bilan carbone du projet du Grand Paris. Elle est déduite de consommations annuelles moyennes des bâtiments chauffés à l'électricité, renseignées par Bilan Carbone, à savoir : 283 kWh/(m².an) pour les bureaux et 254 kWh/(m².an) pour les cafés, hôtels et restaurants. Le bilan carbone choisit une valeur légèrement inférieure à ces consommations pour tenir compte du fait qu'une base-vie ne contient pas tous les équipements que de telles affectations abritent. En revanche, un ordre de grandeur similaire est néanmoins adopté pour tenir compte de la plus faible isolation des containers de chantier. Par hypothèse, cette même valeur est utilisée pour les containers de logements.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Base-vie		Superficie [m ²]	Durée du chantier [mois]	Facteur d'utilisation [-]	Nombre d'heures d'utilisation [h]	Consommations d'électricité totale [kWh]
Site Haren	Fonctionnement continu (creusement du tunnel)	*700	28	0,86	17.520	350.000
	Fonctionnement non continu (puits P0, rampe d'accès et dépôt)		***39	0,48	13.557	270.833
	Logements	**1000	28	0,86	****11.600	331.050
Liedts		50	74	0,74	39.872	56.895
Colignon		50	85	0,74	45.799	65.352
Verboekhoven		50	84	0,74	45.260	64.583
Riga		50	77	0,74	41.488	59.201
Tilleul		50	71	0,74	38.255	54.588
Paix		50	89	0,74	47.954	68.428
Bordet		50	83	0,74	44.721	63.814
Total		2050	-	-	-	1.384.746

* Dont 500 m² de bureaux et 200 m² réservés au vestiaire, au réfectoire, ...

** D'après études BMN

*** La durée totale des chantiers sur le site de Haren (tunnel, puits P0, rampe d'accès et dépôt) a été estimée à environ 67 mois, pendant lesquels le chantier pour le tunnel fonctionnera en continu durant 28 mois, le solde correspondant aux autres travaux.

**** Par hypothèse, les logements sont considérés chauffés 24 heures sur 24 en période de chauffe, étant donné que le creusement du tunnel est réalisé de manière continue. Le nombre d'heures total (17.520) est pondéré par un facteur 0,66 afin de tenir compte de la saison de chauffe (considérée égale à 5.800 heures sur une année).

Tableau 12 : Consommations d'énergie liées à l'utilisation des bases-vies (ARIES, 2020)

Par hypothèse, les **bases-vies** sont utilisées en continu pendant les heures auxquelles le chantier a lieu. Les phases de travaux préparatoires ne sont pas prises en compte. Celles-ci consistent notamment en l'installation des bases-vies. Le facteur d'utilisation tient compte du fait que :

- Le chantier du tunnel a lieu au minimum 6 jours sur 7, 24h/24²⁷. Par hypothèse, le facteur d'utilisation considère cette durée de travail.
- Le chantier au niveau du dépôt concerne principalement des constructions hors-sol, pour lesquelles les durées de chantier sont restreintes dans le temps (entre 6 et 22 heures, 5 jours sur 7)²⁸.
- Le chantier des stations peut avoir lieu 7 jours sur 7, 24h/24, pour les travaux souterrains, l'exécution des constructions hors-sol étant restreinte de la même manière que pour le dépôt (16h/24, 5 jours sur 7). Par hypothèse, le facteur d'utilisation prend en compte ces deux situations par le biais d'une moyenne arithmétique.

²⁷ Selon le Cahier des charges établi par BMN.

²⁸ Selon le Cahier des charges établi par BMN.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Par hypothèse également, les **containers de logements** sont supposés utilisés pendant la durée du creusement du tunnel, soit environ 28 mois, et ce, 10 heures par jour.

Les jours fériés ne sont pas pris en compte dans l'évaluation.

Comme dans le cas du tunnelier, le facteur d'émission utilisé est fixé à 230 g eqCO₂/kWh.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant aux consommations d'électricité relatives à l'utilisation des bases-vies.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]
Site de Haren	219
Stations	100
Total	318

Tableau 13 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Energie (Consommations d'électricité) – Bases-vies (ARIES, 2020)

Les émissions correspondant au site de Haren sont estimées à deux fois celles liées à l'ensemble des stations. Cela s'explique principalement par la superficie des bases-vies (environ 5 fois supérieure sur le site de Haren que le total relatif aux stations) et la durée des chantiers (2 à 3 fois plus importantes au niveau des stations par rapport aux chantiers sur le site de Haren).

C. Emissions fugitives

Ce poste ne représente que des émissions marginales par rapport à l'ensemble des émissions. En effet, il correspond principalement aux émissions dues aux fuites des systèmes de climatisation des installations de chantier, notamment des bases-vies.

Difficilement quantifiable, il est typiquement négligé dans le cas d'un bilan carbone relatif à des travaux de construction²⁹. Aussi, ce poste n'est pas pris en compte dans le cadre de ce bilan carbone.

D. Intrants

Le poste Intrants regroupe deux types de biens consommés dans le cadre de la mise en œuvre du projet Métro Nord : les **matériaux mis en œuvre pour la construction des infrastructures** et les **équipements** abrités par ces dernières.

Au niveau du bilan carbone, les matériaux considérés sont le béton, l'acier ainsi que le verre, tandis que les ascenseurs et les escalators sont les équipements pris en compte.

²⁹ Source : ADEME, FNTP (2015). *Réaliser une analyse environnementale dans les Travaux Publics*

D.1. Matériaux

Les données d'activité correspondent aux quantités de matériaux entrant dans l'exécution des différents ouvrages du projet. Les facteurs d'émission correspondants sont donc exprimés en quantités de CO₂ émises par m³ ou tonnes de matériaux.

D.1.1. Béton

L'évaluation est réalisée dans un premier temps pour un **scénario de base**, dans lequel les différents types de béton sont définis selon leur classe de résistance, à laquelle correspond un facteur d'émission.

Une **étude de sensibilité** est ensuite menée, en faisant varier la composition du béton et, plus particulièrement, en fonction du type de ciment.

Scénario de base

Les données d'activité relatives au béton sont définies selon différentes catégories afin de tenir compte du fait que diverses sortes de béton seront mises en œuvre au niveau du projet Métro Nord, présentant différentes propriétés et performances en fonction de leur utilisation. A ces différentes sortes de béton correspondent différents facteurs d'émission.

Le Cahier des charges établi par BMN impose, pour certains usages de béton, des performances minimales, exprimées en termes de classes de résistance, définies dans la norme NBN EN 206-1 et désignées par la notation Cx/y, où :

- C signifie « Concrete » (béton en anglais) ;
- x correspond à la résistance à la compression à 28 jours d'une éprouvette cylindrique³⁰ du béton considéré, exprimée en N/mm² ;
- y correspond à la résistance à la compression à 28 jours d'une éprouvette cubique³¹ du béton considéré, exprimée en N/mm².

Un béton de classe C25/30 présente donc une résistance sur éprouvette cylindrique de 25 N/mm² et une résistance sur éprouvette cubique de 30 N/mm².

A une classe de résistance donnée, correspondent potentiellement une infinité de compositions de béton possibles, et donc, potentiellement, une infinité de facteurs d'émission également. Ces derniers dépendent en effet de la nature et de la quantité des différents constituants (ciment, sable, granulats, eau, adjuvants, ...). Par hypothèse et pour s'abstraire de ce problème de composition des bétons qui n'est fixée que de manière très partielle dans le Cahier des charges de BMN, la catégorisation des bétons adoptée au niveau du bilan carbone est donc établie selon les classes de résistance pour lesquelles des facteurs d'émission sont proposés dans la littérature. Outre la classe de résistance, le Cahier des charges de BMN fournit en effet des préconisations telles que l'usage de ciment CEM III, mais ne fixe pas directement la nature et les proportions des autres constituants.

L'utilisation de telles classes de résistance présente également l'avantage qu'il existe des facteurs d'émission définis en fonction de celles-ci. Ceux-ci permettent donc de prendre en compte la

³⁰ Dont les dimensions sont normalisées : diamètre = 15 cm, hauteur = 30 cm

³¹ Dont les dimensions sont normalisées : côté = 15 cm

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

variété des bétons dans le calcul des émissions. Les valeurs des facteurs d'émission considérés dans le bilan carbone élaboré pour le projet du Grand Paris Express sont ici reprises.

En outre, par hypothèse encore, certaines quantités de béton pour lesquels le Cahier des charges de BMN ne précise aucune performance cible sont assimilées à certaines classes de résistance.

Le tableau ci-dessous reprend les valeurs pour la gamme de classes de résistance des bétons mis en œuvre dans le projet Métro Nord, ainsi que les principaux usages.

Les facteurs d'émission renseignés ne tiennent pas compte des armatures, comptabilisées au niveau de l'acier.

Classe de résistance	Facteur d'émission [kg eqCO ₂ /m ³]	Principaux usages	
		Infrastructures hors tunnel**	Tunnel
C16/20	195	Béton de propreté, de remplissage, de pente	
C20/25	209		Radier***, remplissage fond du tunnel***
C30/37	*248	Parois moulées, barrettes, radier, dalles intermédiaires, poutres, colonnes, voiles porteurs, escaliers internes, dalle de quais, fouilles blindées, pieux, zones de congélation	Couche de calage***
C35/45	*275	Dalles et poutres de couverture, poutres de ceinture au-dessus des parois moulées, voiles contre terre, contre-voiles et structures émergentes	
C45/55	*308		Voussoirs***
C50/60	325	Béton précontraint	Traverses****

* Valeurs non fournies et obtenues par interpolation linéaire

** D'après Cahier des charges de BMN et assimilations par hypothèse

*** D'après contacts avec BMN ou documents provenant de BMN. La couche de calage est une couche de béton située sous les voies, coulée au-dessus du radier.

**** D'après bilan carbone du projet du Grand Paris Express

Tableau 14 : Types de béton mis en œuvre dans le projet Métro Nord : classes de résistance, facteurs d'émission et usages (ARIES, 2020)

La construction du tunnel nécessite en outre la mise en œuvre de **mortier de bourrage**, pour lequel un facteur d'émission de 375 kg eqCO₂/m³ est considéré. Ce mortier sert à combler l'espace vide entre les terres et les voussoirs en vue d'éviter tout mouvement des voussoirs ou tout tassement de terrain. Bien que n'étant pas du béton en tant que tel, ce dernier est pris en compte dans le bilan carbone, étant donné l'importance des quantités mises en œuvre.

Le tableau ci-dessous reprend les principales quantités de béton évaluées pour le projet Métro Nord. La valeur totale n'est donnée qu'à titre indicatif, les facteurs d'émission des différents bétons considérés variant d'un sous-projet à l'autre, et par conséquent les émissions correspondantes également.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Sous-projet		Quantité [m ³]
Tunnel	Béton	91.125
	Mortier de bourrage	17.477
Stations		293.192
Puits P0 et rampe d'accès		24.214
Dépôt		30.275
Total		456.283

Tableau 15 : Vue générale des quantités de béton mises en œuvre dans le projet Métro Nord (ARIES, 2020)

Les principales données géométriques relatives au **tunnel** sont reprises ci-dessous.

Grandeur	Quantité [m]
Longueur (hors stations)	3.773
Longueur (avec stations)	4.544
Diamètre intérieur du tunnel	8,9
Diamètre extérieur des anneaux de voussoirs	9,7
Diamètre extérieur total (avec couche de mortier de bourrage)	10

Tableau 16 : Données géométriques du tunnel (ARIES, 2020, d'après BMN, 2018 à 2020)

Ces dimensions supposent donc une épaisseur de voussoirs de 40 cm et une épaisseur de couche de mortier de bourrage moyenne de 15 cm.

Voir Livre II Tunnel, partie 1, point 1.2. Le tunnel

Par hypothèse, les voies des aiguillages nécessaires ne sont pas comptabilisées.

Les autres principales données et hypothèses relatives au tunnel, ainsi que les quantités de béton qui en sont déduites, sont quant à elle reprises ci-dessous.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Composante	Grandeur	Unité	Quantité
Voussoirs	Longueur des anneaux*	m	1,8
	Nombre de voussoirs par anneau*	pc	7
	Volume de béton	m³	44.095
Radier	Volume de béton**	m³	35.000
Traverses	Interdistance**	m	0,6
	Masse de béton par traverse**	kg	245
	Nombre de traverses total (2 voies)	pc	15.147
	Volume de béton**	m³	1.613
Couche de calage	Volume linéique**	m ³ /m	1,5
	Volume de béton**	m³	6.816
Fond du tunnel	Volume de béton**	m³	3.600
Total	Volume total de béton	m³	91.125

* D'après études BMN

** D'après informations recueillies auprès de BMN

Tableau 17 : Principales données et hypothèses relatives au tunnel (ARIES, 2020, d'après BMN, 2018 à 2020)

Les données relatives aux stations, puits P0 et rampe d'accès sont issues du métré réalisé par BMN et reprennent des données globalisées par usage (dalles, parois moulées, colonnes, poutres, ...).

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant à la production de béton nécessaire au projet.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]
Tunnel	24.248
Tunnel (mortier de bourrage)	6.554
Stations	73.069
Puits P0 et rampe d'accès	6.012
Dépôt	7.338
Total	117.221

Tableau 18 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Intrants – Béton (ARIES, 2020)

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Les émissions relatives au béton utilisé dans les stations sont trois fois plus élevées que pour le tunnel. Ceci s'explique principalement par les quantités de matériaux mises en œuvre, présentant un rapport similaire³².

Etude de sensibilité

Comme mentionné plus haut, cette étude de sensibilité a pour objectif d'évaluer l'impact de la composition du béton sur les émissions de gaz à effet de serre.

La composition des bétons réellement mis en œuvre sur les futurs chantiers n'est pas connue à ce stade. Le Cahier des charges de BMN ne donne que des impositions partielles auxquelles devront répondre les adjudicataires au travers des compositions de béton qu'ils proposeront.

L'objectif de cette étude de sensibilité n'est pas de préconiser une composition de béton précise, étant donné la diversité des paramètres, mais de déterminer dans quelle mesure les émissions liées à la production du béton peuvent potentiellement varier.

Le béton est de manière générale constitué de ciment, de sable, de graviers, d'eau et d'additifs divers, tels que des adjuvants, accélérateurs ou retardateurs de prise, ...

La littérature montre que la principale contribution aux émissions liées au béton concerne le ciment. En effet, un ordre de grandeur des facteurs d'émission pour le sable et le gravier peut être estimé à 0,015 kg eqCO₂/kg. Le facteur d'émission lié à l'eau, s'il n'est pas nul, peut être négligé. Le tableau ci-dessous, repris de la méthodologie du Grand Paris, illustre la contribution des différents composants d'un béton de classe de résistance C25/30.

Composant	Quantité (kg/m ³)	Facteur d'émission (kgCO ₂ e/kg)	Emission (kgCO ₂ e/m ³)
Ciment Type I	300	0,990	297
Sable	650	0,015	10
Grave	1300	0,015	19,5
Eau	180	0,0003	0,05
TOTAL	2430		326

**Tableau 19 : Calcul d'un facteur d'émission d'un béton C25/30 (NPK-E)
(Société du Grand Paris, 2012)**

Dans le cas de ce bilan carbone, les émissions liées aux additifs, dont la nature et la quantité sont inconnues, sont également négligés. Aussi, seul l'impact du ciment sera analysé pour la suite.

D'un point de vue méthodologique, il s'agit dans un premier temps de partir des facteurs d'émission utilisés précédemment dans le scénario de base, définis par classe de résistance. Comme la composition des bétons ayant conduit à ces facteurs d'émission n'est pas connue, certaines hypothèses seront posées pour déterminer une composition simplifiée des différents bétons concernés, ainsi que le facteur d'émission du ciment utilisé, considéré identique. Enfin,

³² Ce rapport dépend toutefois de la proportion de différents types de béton utilisés.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

de nouveaux facteurs d'émission de ces différents bétons seront calculés en faisant varier la nature du ciment.

En l'absence d'informations détaillées sur la composition des bétons, le facteur d'émission relatif à 1 m³ de béton sera calculé à l'aide de la relation simplifiée suivante :

$$FE_{\text{béton}} = FE_{\text{ciment}} \cdot q_{\text{ciment}} + FE_{\text{autres constituants}} \cdot q_{\text{autres constituants}}$$

dans laquelle :

- FE_{ciment} : facteur d'émission du ciment ;
- q_{ciment} : quantité (masse) de ciment dans 1 m³ de béton ;
- $FE_{\text{autres constituants}}$: facteur d'émission correspondant aux autres constituants du béton (sable, graviers, eau, additifs) ;
- $q_{\text{autres constituants}}$: quantité (masse) des autres constituants du béton.

Par hypothèse :

- La masse totale de 1 m³ de béton (masse volumique) est considérée égale à 2300 kg, quelle que soit la classe de résistance ;
- Le facteur d'émission des autres constituants est pris égal à 0,015 kg eqCO₂/kg.

Le facteur d'émission du ciment peut dès lors être déterminé par la relation suivante :

$$FE_{\text{ciment}} = \frac{FE_{\text{béton}} - 0,015 \cdot (2300 - q_{\text{ciment}})}{q_{\text{ciment}}}$$

Les quantités de ciment, étant également inconnues, seront prises égales aux quantités minimales de ciment imposées normativement³³ pour certaines classes de résistance (de C16/20 à C35/45), reprises dans le tableau ci-dessous, de même que les facteurs d'émission qui en sont déduits.

	Unité	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45
q_{ciment} minimale imposée normativement	kg/m ³	260	280	300	320	340
FE_{ciment}	kg eqCO ₂ /kg	0,63	0,64	0,63	0,68	0,68

Tableau 20 : Quantités de ciment et facteurs d'émission par classe de résistance (ARIES, 2021)

Les facteurs d'émission obtenus présentent des valeurs relativement proches et sous réserve des hypothèses posées plus haut, il peut être raisonnablement déduit que les ciments qui entreraient dans la composition des bétons pour lesquels les facteurs d'émission utilisés dans la méthodologie du Grand Paris ont été calculés sont identiques d'une classe de résistance à l'autre et présentent un facteur d'émission de l'ordre de 0,65 kg eqCO₂/kg.

³³ Selon les normes NBN EN 206 et NBN B 15-001.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Aussi, la composition simplifiée présente une certaine robustesse et peut être utilisée comme base de calcul des facteurs d'émission intervenant dans l'étude de sensibilité.

Dans le cas particulier des parois moulées, dont la classe de résistance est imposée à C30/37 par le Cahier des charges de BMN, la quantité de ciment, également imposée dans ce Cahier des charges, est de 380 kg/m³. Cette valeur est considérée dans la suite de l'étude de sensibilité. En outre, dans de rares cas (moins de 1% de la quantité totale de béton estimée pour l'ensemble des stations), du béton C50/60 est prévu. La démarche inverse est alors suivie : la quantité de ciment est déduite à partir du facteur d'émission de cette classe de résistance (325 kg eqCO₂/m³) et du facteur d'émission du ciment de 0,65 kg eqCO₂/kg.

Disposant de compositions de béton réalistes, il est possible de faire varier le facteur d'émission du ciment.

Seront considérés pour l'analyse :

- Le ciment de type CEM I, composé de minimum 95% de clinker et de maximum 5% de constituants secondaires ;
- Le ciment de type CEM III, composé de clinker (entre 5 et 64%), de laitier de haut-fourneau (entre 36 et 94%) et d'éventuels constituants secondaires (maximum 5%).

Les **prescriptions de BMN relatives aux bétons préconisent l'usage de ciment de type CEM III**, à l'exception des éléments préfabriqués pour lesquels le seul type de ciment admissible est le CEM I. Dans le cas du projet du métro, il s'agit principalement des voussoirs, qui représentent environ 10% de la quantité de béton totale mise en œuvre sur la totalité du projet (tunnel, stations, dépôt, puits P0 et rampe d'accès).

Les facteurs d'émission varient en fonction de la composition de ces ciments. Aussi, a-t-il été décidé de considérer les facteurs renseignés dans le Guide sectoriel Travaux publics de l'ADEME et de la Fédération National des Travaux publics française³⁴.

Le document ne renseigne qu'un facteur d'émission pour le ciment CEM I, fixé à 0,866 kg eqCO₂/kg, tandis qu'il en renseigne une série pour différents types de ciments CEM III. Afin d'être conservatif, parmi les différents facteurs d'émission pour le CEM III, le facteur d'émission correspondant au ciment CEM III/A, dont la proportion de clinker est plus élevée et engendrant par conséquent potentiellement des émissions plus élevées, a été choisi et vaut 0,461 kg eqCO₂/kg.

A partir de ces facteurs d'émission des ciments, de nouvelles séries de facteurs d'émission peuvent être calculées pour les différentes classes de résistance des bétons (voir tableau ci-dessous), à partir des mêmes hypothèses posées plus haut.

³⁴ Source : ADEME, FNTP (2015). *Réaliser une analyse environnementale dans les Travaux Publics*

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Type de ciment	Facteurs d'émission béton [kg eqCO ₂ /m ³]						
	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37 (hors parois moulées)	C35/45	C50/60	C30/37 (parois moulées)
Société du Grand Paris*	195	209	220	248	275	325	248
CEM I	256	273	290	307	324	424	358
CEM III	150	159	168	177	186	239	204

* Certaines valeurs sont le résultat d'interpolation linéaire (voir plus haut).

** La distinction entre le béton C30/37 utilisé pour les parois moulées et celui utilisé pour les autres applications n'est pas faite au niveau des valeurs issues de la méthodologie de la Société du Grand Paris

Tableau 21 : Facteurs d'émission des bétons en fonction de la classe de résistance et du type de ciment (ARIES, 2021)

Le tableau ci-dessous reprend les émissions de gaz à effet de serre totales correspondant au béton, calculées pour les 3 types de ciment considérés. Les résultats relatifs au ciment CEM III tiennent compte du fait que les voussoirs sont fabriqués à partir de ciment CEM I, tel qu'imposé dans le Cahier des charges de BMN.

	Scénario de base	Ciment CEM I		Ciment CEM III	
	Emissions [teqCO ₂]	Emissions [teqCO ₂]	Variation / Scénario de base	Emissions [teqCO ₂]	Variation / Scénario de base
Tunnel	30.802	38.138	24%	32.295	-20%
Stations	73.069	96.011	31%	55.132	-25%
Puits P0 et rampe d'accès	6.012	8.097	35%	4.641	-23%
Dépôt	7.338	9.140	25%	5.287	-28%
Total	117.221	151.386	29%	97.355	-23%

Tableau 22 : Emissions du poste Intrants – Béton – Sensibilité des émissions au ciment (ARIES, 2021)

L'impact du type de ciment sur les résultats est non négligeable : le fait d'utiliser du ciment CEM I au lieu du ciment CEM III a pour effet d'augmenter les émissions liées à la fabrication du béton de 55% pour l'ensemble du projet, soit une augmentation d'environ 55.000 teqCO₂.

Pour rappel, c'est bien l'emploi de ciment CEM III qui est préconisé dans les prescriptions de BMN, hormis pour les voussoirs. L'analyse au niveau bilan carbone confirme donc ce choix.

Ces résultats sont contextualisés avec les émissions des autres postes au niveau de la synthèse des résultats (voir section 4.1.1.3).

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

D.1.2. Acier

En termes de données d'activité, le tableau ci-dessous reprend les principales quantités d'acier évaluées pour le projet Métro Nord.

Sous-projet	Quantité [t]
Tunnel	5.461
Stations	37.220
Puits P0 et rampe d'accès	2.811
Dépôt	5.029
Total	50.521

Tableau 23 : Vue générale des quantités d'acier mises en œuvre dans le projet Métro Nord (ARIES, 2020)

En ce qui concerne le tunnel, de l'acier est utilisé au niveau des voies (rails de roulement et 3^e rail) et des armatures des voussoirs. La rampe d'accès au tunnel et le dépôt sont également pourvus de voies.

Le tableau ci-dessous reprend les principales données et hypothèses considérées, ainsi que les quantités d'acier pour le tunnel. La longueur de la ligne de métro est, pour rappel, de 4,544 km (voie double). Comme mentionné ci-dessus, par hypothèse, les voies des aiguillages nécessaires ne sont pas comptabilisées. La longueur totale des voies du dépôt est de 7,3 km (voies simples), tandis que la longueur des voies de la rampe d'accès est de 0,34 km (voie simple).

Composante	Masse linéique [kg/m]	Quantité d'acier [t]		
		Tunnel	Rampe d'accès	Dépôt
Rails de roulement	*49,97	908	68	730
3 ^e rail	**40	364	27	292
Armatures voussoirs	*95	4189	-	-

* D'après informations recueillies auprès de BMN

** D'après informations recueillies auprès de la STIB

Tableau 24 : Principales données et hypothèses relatives au tunnel (ARIES, 2020, d'après BMN, 2018 à 2020)

Les quantités autres que celles relatives aux voies, correspondant aux stations, au puits P0 et à la rampe d'accès, ainsi qu'au dépôt, sont issues des mètres réalisés par BMN. Pour les stations, ces quantités sont globalisées par usage (armatures, profilés, ...), tandis que pour le dépôt, elles correspondent aux utilisations pour le gros-œuvre (charpente, auvents, couverture en bacs acier, ...), ainsi que pour les passerelles d'entretien, les escaliers, ...

En ce qui concerne l'acier, un seul facteur d'émission est considéré pour l'ensemble des infrastructures, pris égal à 1.804 kg eqCO₂/t. Cette valeur correspond à la moyenne pondérée des facteurs d'émission pour la fabrication d'acier neuf (2.211 kg eqCO₂/t) et pour la fabrication d'acier recyclé (938 kg eqCO₂/t) issus de la Base Carbone de l'ADEME, pondérés par les

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

proportions de production d'acier de haut fourneau et d'acier électrique en Belgique, respectivement égales à 68 et 32%^{35,36}.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant à la production de l'acier nécessaire au projet.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]
Tunnel	9.849
Stations	67.132
Puits P0 et rampe d'accès	5.241
Dépôt	10.912
Total	93.135

Tableau 25 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Intrants – Acier (ARIES, 2020)

Les émissions sont directement proportionnelles aux quantités de matériaux mis en œuvre. Les émissions relatives au béton utilisé dans les stations sont environ 7 fois plus élevées que pour le tunnel. Ceci s'explique par les quantités de matériaux mises en œuvre, présentant un rapport similaire.

D.1.3. Verre

En termes de données d'activité, le tableau ci-dessous reprend les superficies de vitrages estimées par BMN pour les 7 stations et le dépôt. Il s'agit d'estimations en date de rédaction de l'étude.

De même, les épaisseurs de verre considérées sont des hypothèses qui doivent être confirmées lors des phases ultérieures de celle-ci. Par hypothèse, la masse volumique du verre est prise égale à 2,5 t/m³.

Sous-projet	Superficie [m ²]	Epaisseur [m]	Volume [m ³]	Masse [t]
Stations	16.910	0,016	271	676
Dépôt	8.293	0,016	133	332
	511	0,008	4	7
Total			407	1018

Tableau 26 : Vue générale des quantités de verre mises en œuvre dans le projet Métro Nord (ARIES, 2020)

³⁵ Source : GSV (Groupement de la Sidérurgie). *L'acier belge en 2018 – Rapport annuel*

³⁶ Il s'agit d'une hypothèse conservative. Cela revient en effet à considérer que la totalité de l'acier neuf est produite par haut fourneau, exclusivement à partir de minerai, alors que cette filière emploie également de la ferraille, ce qui a pour effet d'en réduire les émissions de GES.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

En ce qui concerne le verre, un seul facteur d'émission est considéré pour l'ensemble des infrastructures. La valeur considérée, issue de la Base carbone, correspond à la fabrication du verre plat (verre float) et, égal à 1.260 kg eqCO₂/t.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant à la production du verre nécessaire au projet.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]
Stations	852
Dépôt	431
Total	1.283

Tableau 27 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Intrants – Verre (ARIES, 2020)

Les émissions sont directement proportionnelles aux quantités de matériaux mis en œuvre.

D.2. Equipements

Les principaux équipements mis en œuvre dans le projet Métro Nord pris en compte dans ce bilan carbone sont les **escalators** et **ascenseurs**. Le projet prévoit 92 escalators et 27 ascenseurs répartis dans les 7 stations. Les données d'activité correspondront ici à la quantité de matériaux entrant dans leur composition.

Par hypothèse, la masse des ascenseurs est considérée égale à 1 tonne, tandis que celle des escalators est égale à en moyenne 12 tonnes, prenant en compte la diversité des types d'escalators envisagés dans le projet. Cette moyenne est calculée sur base des masses renseignées dans les fiches techniques annexées à la demande de permis d'environnement relative au projet.

En l'absence de données détaillées relatives quant à la nature (acier, aluminium, verre, ...) et la masse de leurs constituants, ces équipements sont considérés comme étant totalement constitués d'acier. Cela constitue une hypothèse conservatrice, étant donné que le facteur d'émission de l'acier (1.800 kg eqCO₂/t) est supérieur à celui du verre (1.260 kg eqCO₂/t pour le verre float, selon la Base Carbone). L'aluminium présente un facteur d'émission plus élevé (6.100 kg eqCO₂/t³⁷) mais est utilisé dans des proportions limitées (marches, plaques palières, ... dans le cas d'un escalator).

Les émissions évaluées pour la partie équipements du poste Intrants sont reprises dans le tableau ci-dessous par sous-projet et équipement.

³⁷ Source : Base Carbone de l'ADEME

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Sous-projet	Equipements	Emissions [teqCO ₂]
Stations	Escalators	1.934
	Ascenseurs	49
Total		1.982

Tableau 28 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Intrants – Equipements (ARIES, 2020)

E. Amortissements

Le poste Amortissements correspond aux émissions liées à la production de biens utilisés pour la mise en œuvre du projet : machines, véhicules, ... Les données d'activité consistent à considérer les quantités de matériaux qui les composent en les pondérant par une fraction de leur durée de vie correspondant à leur utilisation pour le projet.

Ces données d'activité se calculent donc de la manière suivante, pour un engin donné, constitué, par hypothèse, d'un seul matériau :

$$DA_{\text{Amortissements,engin}} = \frac{t_{\text{utilisation engin/projet}}}{\text{durée de vie engin}} \cdot m_{\text{matériau engins}}$$

Où :

- $t_{\text{utilisation engin/projet}}$: temps d'utilisation de l'engin sur le projet ;
- Durée de vie engin : durée de vie de l'engin ;
- $m_{\text{matériau engin}}$: masse du matériau constitutif de l'engin.

Au niveau du poste Amortissements, seul le **tunnelier** est considéré. Les engins intervenant dans les autres chantiers du projet ne sont pas pris en compte, étant donné les incertitudes quant à leurs nombres, leurs natures, leurs matériaux constitutifs, leurs durées de fonctionnement et leurs durées de vie à ce stade de l'étude.

Le tunnelier sera exclusivement utilisé pour le projet du métro Nord, tout au long de sa durée de vie. La donnée d'activité correspond donc à la masse de l'engin. Par hypothèse, le tunnelier est considéré être totalement constitué d'acier, pour une masse de 1.500 tonnes³⁸.

Le facteur d'utilisation de l'acier est de 1.804 kg eqCO₂/t. Les émissions liées à la production du tunnelier sont donc estimées à **2.705 teqCO₂**.

F. Gestion des déchets

La mise en œuvre du projet Métro Nord engendre la production deux catégories de déchets :

- les **déblais** issus des excavations
- et les **déchets de génie civil**, provenant du processus même de construction des infrastructures. Ils sont constitués de béton démolé (démolition de massifs, recépage de parois moulées, de barrettes, de pieux sécants, démolition de murets-guides, ...) et de jet grouting démolé.

³⁸ Masse moyenne constatée pour des tunneliers dont les roues de coupe présentent des diamètres similaires à celui qui sera utilisé pour le projet Métro Nord (environ 10 m).

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Dans le cadre de ce bilan carbone, les émissions liées au traitement de ces déchets ne sont pas prises en compte. Les émissions liées aux déchets ne concernent que le fret nécessaire à leur évacuation.

Cette section ne présente donc que les types et les quantités de déchets produits. Les données sont ensuite utilisées au niveau du poste Fret sortant.

F.1. Déblais

Le tableau ci-dessous reprend les différents volumes de déblais, issus du métré réalisé par BMN. La distinction entre déchets valorisables et non valorisables, tant pour les stations que pour le tunnel, a été déterminée sur base des ratios évalués lors d'une étude préalable également menée par BMN.

Les principales hypothèses de cette étude consistent à considérer :

- les **terres excavées sur les 5 premiers mètres** comme étant polluées et devant être envoyées vers un centre de traitement avant leur enfouissement ;
- les **remblais existants** comme étant non valorisables et devant être enfouis ;
- un **coefficient de foisonnement des terres** de 1,3, tenant compte de l'expansion du volume des terres lors de leur excavation.

Pour le tunnel, il s'agit de considérer 77% de terres valorisables et 23% de terres non valorisables inertes. Pour les stations, il s'agit de considérer 55% de terres valorisables (20,5% de sables bruxelliens et 34,2% de terres hors sables bruxelliens), 26,3% de terres non valorisables polluées à traiter et 19% de terres non valorisables inertes à mettre en décharge.

En l'absence d'une telle distinction pour le puits P0 et la rampe d'accès, ainsi que pour le dépôt, l'ensemble des terres extraites a été considéré, par hypothèse, comme non valorisables. A l'inverse du tunnel, les excavations à ces endroits concernent en effet les premiers mètres de terres.

Sous-projet	Volume des déblais non foisonné [m³]				Volume total non foisonné [m³]	Volume total foisonné [m³]
	Valorisables		Non valorisables			
	Sables bruxelliens	Déblais valorisables hors sables bruxelliens	Inertes	A traiter		
Tunnel	228.181		68.158		296.339	385.241
Stations	155.320	259.119	143.955	199.264	757.657	984.954
Puits P0 et rampe d'accès	0		65.321		65.321	84.917
Dépôt	0		317.180		317.180	412.334
Total	642.620		793.878		1.436.497	1.867.446

Tableau 29 : Volume et nature des déblais excavés au niveau du projet Métro Nord (ARIES, 2020)

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Suivant leur nature, les déblais peuvent avoir différentes destinations :

- Les **déblais valorisables** le sont sous forme de matériaux de construction ou de remblais. Par hypothèse, ces déblais seront acheminés vers le port de Bruxelles, où ils seront stockés en vue, notamment, d'être réutilisés comme matériaux de construction ou remblais au sein de la Région bruxelloise. Le métré de BMN prévoit qu'une fraction négligeable des déblais sera réutilisée en tant que remblais, dont le volume total s'élève à 6.925 m³ non foisonnés.
- Les **déblais non valorisables pollués** sont, par hypothèse, acheminés vers un centre de traitement, puis en péniche vers les Pays-Bas en vue d'être réutilisés comme remblais permettant de renforcer les digues.
- Les **déblais non valorisables inertes**, non pollués, sont également, par hypothèse, acheminés en péniche en direction des Pays-Bas.

Le volume des déblais au niveau du dépôt correspond aux excavations nécessaires pour le nivellement de l'ensemble du site de Haren et ne concerne donc pas uniquement l'emprise du dépôt.

F.2. Déchets de génie civil

Les déchets de génie civil seront issus de la mise en œuvre des chantiers au niveau des stations, du puits P0 et de la rampe d'accès.

Sous-projet	Quantité [m ³]
Stations	31.876
Puits P0 et rampe d'accès	1.893
Dépôt	1.200
Total	34.969

Tableau 30 : Volume des déchets de génie civil produits lors de la mise en œuvre du projet Métro Nord (ARIES, 2020)

Par hypothèse, ces déchets seront acheminés vers le port de Bruxelles, où ils seront stockés en vue, notamment, d'être réutilisés en tant que matériaux de construction ou remblais au sein de la Région bruxelloise.

G. Fret entrant

Le poste Fret entrant regroupe l'acheminement des **matériaux de construction** considérés dans le poste Intrants, à savoir le béton, l'acier, ainsi que les remblais. Etant donné les faibles volumes, l'acheminement du verre est négligé, de même que l'acheminement des **engins de chantier**.

G.1. Matériaux

Les données d'activité liées au fret sont exprimées en tonnes-km, ce qui suppose de connaître les quantités de matériaux exprimées en termes de masse, ce qui n'est pas le cas du béton, pour lequel le métré de BMN fournit en effet des volumes.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

La composition des différents types de béton n'étant pas fixée à ce stade de l'étude, il est donc nécessaire de poser une hypothèse quant à la masse volumique du béton, en vue de « convertir » les quantités en masses. Cette masse volumique est donc fixée à 2,3 t/m³, valeur classique qui est, dans le cadre du bilan carbone, considérée par hypothèse identique pour tous les usages. Pour le mortier de bourrage, la masse volumique est considérée égale à 2 t/m³ ³⁹.

Par hypothèse, les distances estimées correspondent, sauf mention contraire, aux fournisseurs les plus proches des chantiers (hypothèse 2020).

L'évaluation est réalisée dans un premier temps pour un **scénario de base**, dans lequel le transport fluvial est de manière générale privilégié pour le transport de grandes quantités de matériaux (voussoirs, acier), ce qui correspond à la situation en Belgique.

Une **étude de sensibilité** est ensuite menée, dans laquelle le transport fluvial est tour à tour remplacé par du transport ferroviaire, puis par du transport routier.

G.1.1. Scénario de base

Béton

En termes de périmètre d'analyse pour la détermination des données d'activité, le bilan carbone considère l'acheminement du béton depuis la centrale à béton jusqu'aux différents chantiers par voie routière. Les émissions liées au transport des différents constituants sont supposées prises en compte par le biais des facteurs d'émission. Par hypothèse, le béton utilisé sur les chantiers du Métro Nord est considéré prêt à l'emploi. La surface des zones de chantier sont en effet relativement restreintes pour y mettre en place des pompes à béton. L'avantage des chantiers du projet Métro Nord est d'être localisés non loin des centrales à béton susceptibles de les alimenter (distances inférieures à 10 km). Le béton obtenu doit en outre être d'un niveau de qualité important (notamment en termes de dosage), plus difficile à atteindre en cas de fabrication in situ. Toutefois, l'approvisionnement dépendra des capacités de production des centrales à béton.

Quatre centrales sont identifiées en Région bruxelloise à proximité des chantiers, non loin du canal et toutes situées sur le territoire de la Ville de Bruxelles. Cette localisation permet d'envisager un acheminement amont des différents constituants du béton (sable, ciment, granulats, ...) par voie fluviale. Cette situation favorable n'est, comme indiqué ci-dessus, toutefois pas explicitement prise en compte dans le facteur d'émission relatif à la fabrication du béton.

Les distances entre chaque centrale et chaque station sont ensuite estimées à l'aide de Google Maps. Lorsque plusieurs trajets sont possibles, la distance la plus courte est prise en compte.

En ce qui concerne l'approvisionnement des chantiers des stations, aucune des 4 centrales à béton ne se distingue totalement en termes de distance : si une centrale est la plus proche d'une station, ce n'est en effet pas nécessairement le cas pour les 6 autres.

Pour cette raison et étant donné les variations entre quantités de béton nécessaires pour chaque station, les émissions seront calculées en considérant la moyenne des tonnages-kilomètres totaux pour les 7 stations calculés pour les 4 centrales à béton.

Le tableau ci-dessous reprend les distances considérées.

³⁹ Source : N. Roussel, C. Lanos et Z. Toutou (2003). *Remontée d'un anneau de voussoir : modélisation et analyse paramétrique* (dans Revue Française de Géotechnique, n°104)

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Centrale à béton	Adresse	Distance Centrale à béton – Chantier station (trajet le plus court) [km]						
		Liedts	Colignon	Verboekhoven	Riga	Tilleul	Paix	Bordet
Inter-Béton	Avenue du Port, 63	2,0	2,8	3,6	3,9	4,9	5,2	6,3
CCB Cementir-Holding	Avenue du Port, 79	2,3	3,1	3,4	3,5	4,3	4,6	5,6
Holcim	Quais des Armateurs, porte 12	1,8	2,6	3,2	3,4	4,1	4,4	5,2
Ready Beton Brussel	Quai Léon Monnoyer, 11	3,5	2,4	2,3	1,4	1,8	2,2	3,3

Tableau 31 : Distances entre diverses centrales à béton et les chantiers des 7 stations (ARIES, 2020)

Le tonnage-kilomètres moyen est estimé à 2.339.452 t.km.

Dans le cas du tunnel, du puits P0 et de la rampe d'accès, ainsi que du dépôt, la moyenne des tonnages-kilomètres correspondant aux 4 centrales à béton est considérée. Pour l'ensemble de ces sous-projets, la distance est identique : le chantier est considéré prendre place au niveau du dépôt. Le tableau ci-dessous reprend les tonnages-kilomètres correspondant aux différents sous-projets.

Centrale à béton	Adresse	Distance Centrale à béton – Chantier station (trajet le plus court) [km]	Tonnage-km total [t.km]		
			Tunnel	Puits P0 et rampe d'accès	Dépôt
Inter-Béton	Avenue du Port, 63	6,1	637.188	339.721	424.761
CCB Cementir-Holding	Avenue du Port, 79	5,4	564.068	300.737	376.018
Holcim	Quais des Armateurs, porte 12	4,9	511.839	272.891	341.202
Ready Beton Brussel	Quai Léon Monnoyer, 11	2,9	302.925	161.507	201.936
Moyenne			504.005	268.714	335.979

Tableau 32 : Tonnages-kilomètres entre diverses centrales à béton et les chantiers du tunnel, du puits P0 et de la rampe d'accès (ARIES, 2020)

Les valeurs reprises ci-dessus ne comprennent que le **béton coulé sur place** et ne reprennent donc pas les voussoirs et les traverses mis en œuvre au niveau du tunnel. Pour ces derniers éléments, des hypothèses particulières sont posées :

- Les **voussoirs** sont considérés produits dans une usine située en région parisienne (scénario probable selon BMN). Par hypothèse, l'acheminement principal se fera par

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

voie fluviale sur 400 km jusqu'au port de Bruxelles, tandis que le post-acheminement vers les chantiers sera effectué par voie routière jusqu'au dépôt de Haren, soit une distance de 3,1 km.

- Les **traverses** seront par hypothèse produites à 60 km. Le transport sera effectué par voie routière.

Le tableau ci-dessous reprend les tonnages-kilomètres correspondants.

	Tonnage-km total [t.km]	
	Voie routière	Voie fluviale
Voussoirs	314.399	40.567.674
Traverses	222.656	-

Tableau 33 : Tonnages-kilomètres pour les voussoirs et traverses (ARIES, 2020)

Les facteurs d'émission liés au fret dépendent du mode de transport utilisé.

Pour le **béton coulé** sur place, il est envisagé de recourir à des camions-toupies d'une capacité de 6 m³. Le facteur d'émission considéré pour le transport du béton est de 0,124 kg eqCO₂/t.km. Cette valeur est issue de la Base Carbone et correspond, par hypothèse, à un camion rigide, présentant une PTAC⁴⁰ comprise entre 20 et 26 t et circulant au diesel routier avec une incorporation de 7% de biodiesel. Les hypothèses sous-jacentes consistent à considérer un taux de remplissage de 60% et un taux de retour à vide de 17%.

En ce qui concerne les **voussoirs**, le facteur d'émission correspondant au transport fluvial est défini en fonction du gabarit maximal admissible sur les voies navigables à franchir. L'un des tronçons les plus restrictifs est notamment situé entre Pommerœul et Bruxelles. De classe CEMT IV, le tonnage y est limité à 1.500 tonnes. Aussi, par hypothèse, un facteur d'émission de 0,0298 kg eqCO₂/t.km, issu de la Base Carbone et relatif aux bateaux automoteurs de présentant une capacité comprises entre 1.000 et 1.499 tonnes de port en lourd⁴¹ sera considéré.

Le post-acheminement des voussoirs à partir du port de Bruxelles jusqu'aux chantiers sera quant à lui effectué par des semi-remorques d'une capacité de 20 t, à l'instar de l'acheminement de l'acier (voir plus loin). Le facteur d'émission considéré s'élève à 0,0919 kg eqCO₂/t.km et est également issu de la Base Carbone. Il correspond, par hypothèse, à un camion articulé, présentant une PTAC inférieure à 34 t et circulant au diesel routier avec une incorporation de 7% de biodiesel. Les hypothèses sous-jacentes consistent à considérer un taux de remplissage de 60% et un taux de retour à vide de 17%.

Pour le transport des **traverses**, le transport est également supposé être effectué par des semi-remorques de 20 t.

Enfin, le **mortier de bourrage** est supposé approvisionné de la même manière que le béton, à partir du même fournisseur.

⁴⁰ Poids total autorisé en charge, ou MMA (masse maximale autorisée)

⁴¹ Port en lourd : chargement maximal pouvant être transporté par un bateau.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant au fret nécessaire à l'approvisionnement en béton, tant coulé sur place qu'utilisé sous forme de voussoirs et de traverses.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]		
	Voie routière	Voie fluviale	Total
Tunnel	*127	1.209	1.336
Stations	290	0	290
Puits P0 et rampe d'accès	33	0	33
Dépôt	42	0	42
Total	492	1.209	1.701

* Y compris le mortier de bourrage (15 teqCO₂)

Tableau 34 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Béton (ARIES, 2020)

Les émissions correspondant au béton utilisé dans le tunnel sont supérieures à celles correspondant aux stations, bien que les volumes de matériaux soient plus élevés dans le cas de ces dernières. Cela s'explique par les distances considérées par hypothèse : dans le cas des voussoirs et des traverses du tunnel, celles-ci sont bien plus importantes (respectivement 400 km et 60 km) au regard des trajets effectués par le béton destiné aux stations (inférieurs à 10 km).

Acier

En termes de périmètre d'analyse pour la détermination des données d'activité, le bilan carbone considère l'approvisionnement de l'acier par voie routière :

- En ce qui concerne l'**acier destiné à des usages structurels** (armatures, profilés, ...), le fournisseur considéré est par hypothèse le plus proche. Le trajet principal est supposé être effectué par voie fluviale sur 30 km, jusqu'au port de Bruxelles. Le post-acheminement est considéré être effectué par la route, sur des distances variant d'un chantier à l'autre.
- En ce qui concerne l'**acier constituant les armatures des voussoirs**, à l'instar du béton, un acheminement principal par voie fluviale sur 400 km jusqu'au port de Bruxelles et un post-acheminement par voie routière jusqu'aux différents chantiers sont considérés.
- En ce qui concerne les **rails de roulement** (tunnel, rampe d'accès et dépôt), d'après les informations reçues auprès de la STIB, l'acier proviendra potentiellement de l'une des 2 entreprises suivantes : British Steel, dont un laminoir est situé à Hayange (Belgique) ou VoestAlpine, dont un laminoir est situé à Donawitz en Belgique. Par hypothèse conservatrice, cette seconde localisation est considérée (à 1050 km du chantier).
- En ce qui concerne le **3^e rail** (tunnel, rampe d'accès et dépôt), d'après les informations reçues auprès de la STIB, l'acier proviendra potentiellement de l'entreprise VoestAlpine. Par hypothèse conservatrice, la localisation du laminoir à Donawitz est considérée, comme dans le cas des rails de roulement.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Le tableau ci-dessous reprend les tonnages-kilomètres correspondant aux différents sous-projets.

Sous-projet	Tonnage-km total [t.km]	
	Voie routière	Voie fluviale
Tunnel	1.335.363	1.675.621
Stations	89.441	1.116.601
Puits P0 et rampe d'accès	108.631	84.326
Dépôt	1.088.229	150.859
Total	2.621.664	3.027.407

Tableau 35 : Tonnages-kilomètres pour les différents sous-projets – Acier (ARIES, 2020)

Les facteurs d'émission liés au fret dépendent du mode de transport utilisé.

Au niveau du projet Métro Nord, il est envisagé de recourir à des semi-remorques d'une capacité de 20 t. Le facteur d'émission considéré pour le transport de l'acier s'élève à 0,0919 kg eqCO₂/t.km, comme dans le cas du transport des voussoirs et des traverses.

En ce qui concerne le fret fluvial, le facteur d'émission est défini en fonction du gabarit maximal admissible sur les voies navigables à franchir. Le canal Anvers-Bruxelles-Charleroi (canal ABC)⁴² est, pour sa partie située au sud de Bruxelles et pour les tronçons concernés, de classes CEMT IV et CEMT Vib. La classe CEMT IV correspond à un tonnage maximal de 1.500 tonnes, tandis que la classe CEMT Vib permet la circulation d'embarcations jusqu'à 12.000 tonnes. Il est donc nécessaire de choisir le facteur d'émission correspondant à la classe la plus restrictive. Aussi, par hypothèse, un facteur d'émission de 0,0298 kg eqCO₂/t.km, issu de la Base Carbone et relatif aux bateaux automoteurs de présentant une capacité comprises entre 1.000 et 1.499 tonnes de port en lourd.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant au fret nécessaire à l'approvisionnement en acier.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]		
	Voie routière	Voie fluviale	Total
Tunnel	124	50	174
Stations	8	33	41
Puits P0 et rampe d'accès	10	3	12
Dépôt	100	5	105
Total	241	90	332

Tableau 36 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Acier (ARIES, 2020)

⁴² Ce canal inclut l'Escaut pour une partie de son tracé.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Les émissions correspondant à l'acier utilisé dans le tunnel sont supérieures par rapport aux stations (rapport d'environ 1,5), bien que les volumes de matériaux soient 7 fois plus élevés dans le cas de ces dernières. A l'instar du béton, cela s'explique par les distances considérées par hypothèse : dans le cas de l'acier entrant dans la fabrication des voussoirs, des rails de roulement et du 3^e rail pour le tunnel, celles-ci sont bien plus importantes (respectivement 400, 1050 et 1050 km) au regard des trajets effectués par l'acier destiné aux stations (inférieurs à 40 km).

Remblais

Des remblais seront mis en œuvre au niveau du chantier des stations, dont les volumes sont repris dans le tableau ci-dessous⁴³. Le métré de BMN prévoit qu'une fraction négligeable des déblais sera réutilisée en tant que remblais, dont le volume total s'élève à 6.925 m³ non foisonnés. Ce volume se répartit en 1.800 m³ de remblais pour la station Bordet et en 5.125 m³ pour l'exécution du puits P0 et de la rampe d'accès. Ce second volume couvre l'ensemble des besoins en remblais pour les chantiers concernés.

Pour les remblais en provenance de l'extérieur, la distance d'approvisionnement est fixée par hypothèse à 50 km, en l'absence d'informations quant au fournisseur. La masse volumique des remblais est fixée à 2 t/m³, à l'instar des déblais.

Les données d'activité, correspondant aux tonnages-kilomètres obtenus, sont également repris dans le tableau ci-dessous.

Sous-projet	Volume remblais [m ³]	Tonnage-kilomètre [t.km]
Stations	32.030	3.203.010
Dépôt	7.680	768.000
Total	39.710	3.971.010

Tableau 37 : Volumes et tonnages-kilomètres – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Remblais (ARIES, 2020)

Le transport est supposé être effectué par des semi-remorques d'une capacité de 20 t. Le facteur d'émission considéré est donc de 0,0919 kg eqCO₂/t.km.

Les émissions correspondant au fret nécessaire à l'approvisionnement en remblais sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]
Stations	294
Dépôt	71
Total	365

Tableau 38 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Remblais (ARIES, 2020)

⁴³ Pour la station Bordet, des remblais provenant du même chantier sont réutilisés. Les volumes correspondants sont dès lors retranchés, étant donné que le transport est négligeable.

Les émissions sont proportionnelles aux quantités de remblais mis en œuvre.

G.1.2. Etude de sensibilité

Béton

L'étude de sensibilité ne portant que sur l'acheminement principal réalisé par voie fluviale, seul le **transport des voussoirs** est analysé dans le cadre de l'étude de sensibilité pour ce qui concerne le béton.

Le tableau ci-dessous reprend les données d'activité dans les différents cas, ainsi que les hypothèses sous-jacentes. Pour le transport ferroviaire, les pré-acheminement et post-acheminement sont négligés et seul l'acheminement principal est considéré (la distance de post-acheminement est en effet très réduite, étant donné la proximité du chemin de fer par rapport au chantier du dépôt de Haren). Le transport routier est effectué par le même mode sur la totalité du trajet à parcourir.

En outre, par hypothèse, étant donné les difficultés liées à sa détermination, la distance du trajet par chemin de fer est considérée identique à la distance par route.

	Unité	Voie fluviale		Voie ferroviaire	Voie routière
		Acheminement principal	Post-acheminement		
		Voie fluviale	Voie routière		
Distance parcourue	km	400	3,1	350	350
Tonnage-km	t.km	314.399	40.567.674	35.496.715	35.496.715

Tableau 39 : Hypothèses sur l'acheminement des voussoirs – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Etude de sensibilité (ARIES, 2020)

Le tableau ci-dessous reprend les facteurs d'émission, issus de la Base Carbone de l'ADEME. La valeur relative au transport fluvial est identique au scénario de base, tandis que celle relative au transport routier correspond à un camion articulé de PTAC inférieure à 34 t, circulant au diesel routier avec une incorporation de 7% de biodiesel. La valeur relative au transport ferroviaire correspond à celle des trains de marchandises en Belgique. Dans le cas particulier de l'acheminement des voussoirs, l'emploi de cette dernière constitue une hypothèse conservatrice étant donné que la majeure partie de cet acheminement a lieu en Belgique, pays dans lequel le mix énergétique au niveau de la production d'électricité est moins carboné que la Belgique (le facteur d'émission renseigné dans la base carbone y est inférieur à 0,002 kg eqCO₂/t.km, qu'il s'agisse d'un chargement léger, moyen ou dense).

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

	Voie fluviale
Transport fluvial	0,0298 kg eqCO ₂ /t.km
Transport ferroviaire	0,0186 kg eqCO ₂ /t.km
Transport routier	0,0919 kg eqCO ₂ /t.km

Tableau 40 : Hypothèses étude de sensibilité relative au fret entrant – Acheminement des voussoirs – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Remblais (ARIES, 2020)

Le tableau ci-dessous reprend les émissions pour les trois modes d'acheminement considérés.

Emissions [teqCO ₂]				
Voie fluviale			Voie ferroviaire	Voie routière
Acheminement principal	Post-acheminement	Total		
Voie fluviale	Voie routière			
1.209	29	1.238	660	3.262

Tableau 41 : Emissions – Acheminement des voussoirs – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Etude de sensibilité (ARIES, 2020)

Les émissions estimées pour l'acheminement des voussoirs par voie routière sont les plus élevées, de l'ordre de 2,6 fois les émissions correspondant au transport par voie fluviale et de 5 fois les émissions correspondant au transport par chemin de fer.

Ces résultats sont contextualisés avec les émissions des autres postes au niveau de la synthèse des résultats (voir section 4.1.1.3).

Acier

L'étude de sensibilité ne portant que sur l'acheminement principal réalisé par voie fluviale, seul le **transport de l'acier destiné à des usages structurels** et **l'acier constituant les armatures voussoirs** est analysé dans le cadre de l'étude de sensibilité pour ce qui concerne le béton.

En ce qui concerne le transport de **l'acier utilisé pour des usages structurels**, le tableau ci-dessous reprend les données d'activité pour dans les différents cas, ainsi que les hypothèses sous-jacentes. Pour le transport ferroviaire, les pré-acheminement et post-acheminement sont négligés et seul l'acheminement principal est considéré (la distance de post-acheminement est en effet très réduite, étant donné la proximité du chemin de fer par rapport au chantier du dépôt de Haren). Le transport routier est effectué par le même mode sur la totalité du trajet à parcourir.

En outre, par hypothèse, étant donné les difficultés liées à sa détermination, la distance du trajet par chemin de fer est considérée identique à la distance par route.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Sous-projet		Unité	Voie fluviale		Voie ferroviaire	Voie routière
			Acheminement principal	Post-acheminement		
			Voie fluviale	Voie routière		
Stations	Distance parcourue	km	30	Variable (entre 1,6 et 3,3)	50	50
	Tonnage-km	t.km	1.116.601	89.441	1.861.002	1.861.002
Puits P0 et rampe d'accès	Distance parcourue	km	30	3,1	50	50
	Tonnage-km	t.km	84.326	8.714	140.544	140.544
Dépôt	Distance parcourue	km	30	3,1	50	50
	Tonnage-km	t.km	150.859	15.589	251.432	251.432

Tableau 42 : Hypothèses sur l'acheminement de l'acier destiné à des usages structurels – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Etude de sensibilité (ARIES, 2020)

Les facteurs d'émission sont identiques à ceux considérés précédemment pour le béton.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions pour les trois modes d'acheminement considérés.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]				
	Voie fluviale			Voie ferroviaire	Voie routière
	Acheminement principal	Post-acheminement	Total		
	Voie fluviale	Voie routière			
Stations	33	8	41	35	171
Puits P0 et rampe d'accès	3	1	3	3	13
Dépôt	4	1	6	5	23
Total	40	10	51	42	207

Tableau 43 : Emissions – Acheminement de l'acier destiné à des usages structurels – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Etude de sensibilité (ARIES, 2020)

Les émissions estimées pour l'acheminement de l'acier pour usages structurels par voie routière sont les plus élevées, de l'ordre de 2,6 fois les émissions correspondant au transport par voie fluviale et de 5 fois les émissions correspondant au transport par chemin de fer.

En ce qui concerne le transport de l'**acier constituant les armatures des voussoirs**, le tableau ci-dessous reprend les données d'activité pour dans les différents cas, ainsi que les hypothèses sous-jacentes. Ces dernières sont évidemment identiques à celles posées pour le transport du béton des voussoirs (voir plus haut).

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

	Unité	Voie fluviale		Voie ferroviaire	Voie routière
		Acheminement principal	Post-acheminement		
		Voie fluviale	Voie routière		
Distance parcourue	km	400	3,1	350	350
Tonnage-km	t.km	1.675.621	12.986	1.466.169	1.466.169

Tableau 44 : Hypothèses sur l'acheminement de l'acier constituant les armatures des voussoirs – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Etude de sensibilité (ARIES, 2020)

Les facteurs d'émission sont également identiques à ceux considérés pour l'acheminement des voussoirs.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions pour les trois modes d'acheminement considérés.

Emissions [teqCO ₂]				
Voie fluviale			Voie ferroviaire	Voie routière
Acheminement principal	Post-acheminement	Total		
Voie fluviale	Voie routière			
50	1	51	27	135

Tableau 45 : Emissions – Acheminement de l'acier constituant les armatures des voussoirs – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Etude de sensibilité (ARIES, 2020)

Les émissions estimées pour l'acheminement de l'acier des armatures des voussoirs par voie routière sont les plus élevées, de l'ordre de 2,6 fois les émissions correspondant au transport par voie fluviale et de 5 fois les émissions correspondant au transport par chemin de fer.

Ces résultats sont contextualisés avec les émissions des autres postes au niveau de la synthèse des résultats (voir section 4.1.1.3).

G.2. Engins de chantier

Etant donné les incertitudes, le fret entrant des engins de chantier n'est pas pris en compte au niveau du bilan carbone. En effet, ni leur nombre, ni leur nature exacte ne sont connus à ce stade de l'étude. Leur masse et leur provenance n'étant, de ce fait, pas déterminables, les tonnages-kilomètres correspondants ne peuvent l'être non plus. De plus, leur masse est potentiellement marginale en comparaison avec les matériaux mis en œuvre et le fret engendré.

H. Fret sortant

Le poste « Fret sortant » regroupe l'acheminement des **déchets** considérés dans le poste Gestion des déchets, ainsi que des **engins de chantier**.

H.1. Déchets de chantier

Les données d'activité liées au fret sont exprimées en tonnes-km, ce qui suppose de connaître les quantités de déchets exprimées en termes de masse, comme dans le cas du fret pour les matériaux. Le métré de BMN fournissant cependant des données sous forme de volumes, ces quantités doivent dès lors être « converties » en masses. Par hypothèse, la masse volumique des déblais est fixée à 2 t/m³, tandis que celles des déchets de génie civil est fixée à 2,5 t/m³.

Suivant leur nature (voir poste « Gestion des déchets »), les déchets peuvent avoir différentes destinations, atteintes par différents modes.

L'évaluation est réalisée dans un premier temps pour un **scénario de base**, dans lequel le transport fluvial est de manière générale privilégié pour l'acheminement principal des déchets.

A l'instar du poste Fret entrant, une **étude de sensibilité** est ensuite menée, dans laquelle le transport fluvial est tour à tour remplacé par du transport ferroviaire, puis par du transport routier.

H.1.1. Scénario de base

Les hypothèses du scénario de base sont reprises dans le tableau ci-dessous. Le transport fluvial, en péniche, suppose un préacheminement jusqu'au port de Bruxelles, effectué, par hypothèse par voie routière.

Type de déchets		Préacheminement		Acheminement principal	
		Destination	Mode	Destination	Mode
Déblais	Valorisables	-	-	Port de Bruxelles	Routier
	Non valorisables pollués	Port de Bruxelles	Routier	Pays-Bas	Fluvial
	Non valorisables inertes	Port de Bruxelles	Routier	Pays-Bas	Fluvial
Déchets de génie civil		-	-	Port de Bruxelles	Routier

Tableau 46 : Destinations et modes d'acheminement par type de déchets (ARIES, 2020)

L'étude de BMN considère 2 localisations possibles de transbordement (voir figure ci-dessous) :

- Au niveau de la plateforme de transbordement existante (point VE1 sur la figure ci-dessous), située dans l'avant-port ;
- Au niveau du port, au niveau d'une nouvelle plateforme de transbordement (VE2 sur la figure ci-dessous), devant faire l'objet d'un aménagement en date de rédaction de cette étude (2016).

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Cette seconde plateforme ne pouvant accueillir que des bateaux d'une capacité inférieure à 1.500 tonnes (de classes inférieures et égales à la classe CEMT IV⁴⁴), la localisation de la plateforme de transbordement VE1 est par hypothèse retenue.



Figure 10 : Localisation des plateformes de transbordement au niveau du port de Bruxelles (points VE1 et VE2) (BMN, 2016)

Les distances considérées, ainsi que les tonnages-kilomètres sont repris dans le tableau ci-dessous.

Liedts	Collignon	Verboekhoven	Riga	Tilleul	Paix	Bordet	Tunnel, puits P0, rampe d'accès et dépôt
3,1	2,5	2,1	1,6	1,7	2,1	3,3	3,1

Tableau 47 : Distance entre les chantiers des 7 stations et le port de Bruxelles (ARIES, 2020)

Par hypothèse, les trajets en péniche sont considérés être effectués entre le port de Bruxelles et la frontière avec les Pays-Bas, au niveau de l'écluse d'Oudewijkweg, à partir de laquelle il est possible soit d'emprunter l'estuaire de l'Escaut, soit d'emprunter les canaux desservant l'intérieur des terres du pays. La distance séparant le port de Bruxelles et ce point est de 70 km.

⁴⁴ CEMT (Conférence Européenne des Ministres des Transports) : classification européenne des voies navigables selon leurs dimensions et leur capacité à accueillir les bateaux.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Le tableau ci-dessous reprend les tonnages-kilomètres pour les différents sous-projets.

Sous-projet	Valorisables		Non valorisables pollués		Non valorisables inertes		Déchets de génie civil	
	Routier	Fluvial	Routier	Fluvial	Routier	Fluvial	Routier	Fluvial
Tunnel	1.414.724	0	0	0	422.580	9.542.128	0	0
Stations	1.952.242	0	938.646	27.896.930	678.110	20.153.675	197.547	0
Puits P0 et rampe d'accès	0	0	0	0	404.990	9.144.940	14.671	0
Dépôt	0	0	0	0	1.966.516	44.405.200	9.300	0

Tableau 48 : Tonnages-kilomètres pour les différents types de déchets issus du projet Métro Nord (ARIES, 2020)

Les facteurs d'émission liés au fret dépendent du mode de transport utilisé.

En ce qui concerne le fret routier, le transport est, par hypothèse, assuré par des semi-remorques d'une capacité de 20 t. Le facteur d'émission considéré s'élève à 0,0919 kg eqCO₂/t.km et est également issu de la Base Carbone. Il correspond, par hypothèse, à un camion articulé, présentant une PTAC inférieure à 34 t et circulant au diesel routier avec une incorporation de 7% de biodiesel. Les hypothèses sous-jacentes consistent à considérer un taux de remplissage de 60% et un taux de retour à vide de 17%.

En ce qui concerne le fret fluvial, le canal Anvers-Bruxelles-Charleroi (canal ABC)⁴⁵ est, pour sa partie située au nord de Bruxelles, de classe CEMT Vib. Cela signifie qu'il peut accueillir des bateaux présentant des tonnages pouvant atteindre 12.000 tonnes. Il est donc possible d'envisager le transport par péniches de grands gabarits. Aussi, par hypothèse, un facteur d'émission de 0,0139 kg eqCO₂/t.km, issu de la Base Carbone et relatif aux bateaux automoteurs de présentant une capacité supérieure à 3.000 tonnes de port en lourd⁴⁶.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant au fret nécessaire à l'évacuation des déchets de chantier.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]
Tunnel	301
Stations	1.014
Puits P0 et rampe d'accès	166
Dépôt	799
Total	2.280

Tableau 49 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret sortant – Déchets de chantier (ARIES, 2020)

⁴⁵ Ce canal inclut l'Escaut pour une partie de son tracé.

⁴⁶ Port en lourd : chargement maximal pouvant être transporté par un bateau.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Les différences en termes d'émissions entre les différents sous-projets sont dues à la combinaison des facteurs suivants : quantités de déchets évacuées, modes de transport considérés pour les différents statuts de déchets et distances correspondantes.

Les émissions liées aux stations sont plus importantes en raison des quantités de déblais excavés et d'une plus grande proportion de terres non valorisables pour lesquelles l'acheminement principal se fait par voie fluviale. Ce mode, bien que présentant un facteur d'émission 7 fois plus faible que celui du mode routier, engendre des émissions par tonne plus importantes, étant donné la plus grande distance considérée pour celui-ci (70 km contre maximum 3 km dans le cas du fret routier).

H.1.2. Etude de sensibilité

L'étude de sensibilité ne portant que sur l'acheminement réalisé par voie fluviale, seul le **transport des déblais non valorisables** est analysé dans le cadre de l'étude de sensibilité pour ce qui concerne les déchets.

Le tableau ci-dessous reprend les données d'activité dans les différents cas, ainsi que les hypothèses sous-jacentes. Pour le transport ferroviaire, les pré-acheminement et post-acheminement sont négligés et seul l'acheminement principal est considéré (la distance de post-acheminement est en effet très réduite, étant donné la proximité du chemin de fer par rapport au chantier du dépôt de Haren). Le transport routier est effectué par le même mode sur la totalité du trajet à parcourir.

En outre, par hypothèse, étant donné les difficultés liées à sa détermination, la distance du trajet par chemin de fer est considérée identique à la distance par route. Ces distances sont, dans le cas de l'acheminement principal des déchets non valorisables égales à la distance considérée pour le fret fluvial, séparant le port de Bruxelles et la frontière avec les Pays-Bas, à savoir 70 km.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Sous-projet		Unité	Voie fluviale		Voie ferroviaire	Voie routière
			Pré-acheminement	Acheminement principal		
			Voie routière	Voie fluviale		
Tunnel	Distance parcourue	km	3,1	70	70	70
	Tonnage-km	t.km	422.580	9.542.128	9.542.128	9.542.128
Stations	Distance parcourue	km	Variable (entre 1,6 et 3,3)	70	70	70
	Tonnage-km	t.km	1.616.756	48.050.605	48.050.605	48.050.605
Puits P0 et rampe d'accès	Distance parcourue	km	3,1	70	70	70
	Tonnage-km	t.km	404.990	9.144.940	9.144.940	9.144.940
Dépôt	Distance parcourue	km	3,1	70	70	70
	Tonnage-km	t.km	1.966.516	44.405.200	44.405.200	44.405.200

Tableau 50 : Hypothèses sur l'acheminement des déblais non valorisables – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret sortant – Etude de sensibilité (ARIES, 2020)

Les facteurs d'émission sont identiques à ceux considérés précédemment. Pour rappel, étant donné le plus grand gabarit de la partie du canal Anvers-Bruxelles-Charleroi au nord de Bruxelles, le facteur d'émission pour le transport par péniches est de 0,0139 kg eqCO₂/t.km.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions pour les trois modes d'acheminement considérés.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]				
	Voie fluviale			Voie ferroviaire	Voie routière
	Pré-acheminement	Acheminement principal	Total		
	Voie routière	Voie fluviale			
Tunnel	39	133	171	177	877
Stations	149	668	816	894	4.416
Puits P0 et rampe d'accès	37	127	164	170	840
Dépôt	181	617	798	826	4081
Total	405	1.545	1.950	2.067	9.337

Tableau 51 : Emissions – Acheminement des déblais non valorisables – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret sortant – Etude de sensibilité (ARIES, 2020)

Les émissions estimées pour l'acheminement des déblais non valorisables par voie routière sont les plus élevées, de l'ordre de 5 fois les émissions correspondant au transport par voie fluviale et de 4,5 fois les émissions correspondant au transport par chemin de fer.

H.2. *Engins de chantier*

Etant donné les incertitudes, le fret sortant des engins de chantier n'est pas pris en compte au niveau du bilan carbone. En effet, ni leur nombre, ni leur nature exacte ne sont connus à ce stade de l'étude. Leur masse et leur provenance n'étant, de ce fait, pas déterminables, les tonnages-kilomètres correspondants ne peuvent l'être non plus. De plus, leur masse est potentiellement marginale en comparaison avec les matériaux mis en œuvre et le fret engendré.

I. Déplacements

Les déplacements considérés correspondent aux **trajets entre le domicile et les différents chantiers**, auxquels les travailleurs prennent part.

Seuls les déplacements effectués par les travailleurs participant aux **chantiers des stations** sont comptabilisés :

- Les trajets des travailleurs affectés au pilotage du tunnelier devraient être limités : des containers de logements sont en effet prévus sur le site.
- L'ampleur et la durée du chantier du puits P0 et de la rampe d'accès étant réduite par rapport à celles des stations, les déplacements des travailleurs vers et depuis le chantier de ces sous-projets ne sont pas non plus pris en compte.

Les données d'activité, exprimées en passagers-kilomètres, sont déterminées à partir d'une série d'hypothèses, reprises dans les tableaux ci-dessous.

Le premier tableau reprend des hypothèses générales à tous les chantiers (parts modales et distances parcourues). Les parts modales sont reprises des hypothèses formulées dans la partie relative au chantier des livres Stations en ce qui concerne les camionnettes. Par hypothèse également, le solde des déplacements est réalisé pour moitié en transports en communs et pour moitié selon des modes actifs.

Voir Livres III Stations, partie 3, point 1.1. Incidences prévisibles du chantier sur la mobilité

		Unité	Grandeur
Camionnette	Distance moyenne parcourue par rapport au chantier	km	50
	Part modale	%	90
	Taux d'occupation	Nombre de personnes par véhicule	3,5
Métro, tram, bus	Distance moyenne parcourue par rapport au chantier	km	5
	Part modale	%	5
Modes actifs	Part modale	%	5

Tableau 52 : Hypothèses générales relatives aux déplacements domicile-travail des travailleurs sur les chantiers (ARIES, 2020 et SPF Mobilité, 2019)

Le second tableau reprend des hypothèses propres aux différents chantiers :

- Le nombre de travailleurs au niveau des stations devrait varier entre 20 et 60, en fonction des différentes phases. Une hypothèse simplificatrice est ici posée, consistant

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

à considérer une moyenne de 40 personnes. 20 travailleurs en moyenne sont supposés être occupés par le chantier du puits P0 et de la rampe d'accès.

- Le nombre de jours ouvrés par semaine est de 5. Les travailleurs sont supposés retourner à leur domicile quotidiennement.

Chantier	Nombre de travailleurs moyen par jour	Nombre de déplacements par semaine	Durée du chantier [mois]	Nombre de déplacements par travailleur sur la durée du chantier [-]*
Liedts	40	10	74	3.208
Colignon	40	10	85	3.684
Verboekhoven	40	10	84	3.640
Riga	40	10	77	3.338
Tilleul	40	10	71	3.078
Paix	40	10	89	3.858
Bordet	40	10	83	3.598

* Arrondi au multiple de 2 supérieur

Tableau 53 : Hypothèses générales relatives aux déplacements domicile-travail concernant les chantiers du projet Métro Nord (ARIES, 2020)

Les jours fériés ne sont pas pris en compte dans l'évaluation.

Le tableau ci-dessous reprend le nombre de passagers.km par mode.

Chantier	Nombre de kilomètres (Camionnette)	Nombre de passagers.kilomètres (Métro, tram, bus)
Liedts	1.764.400	32.080
Colignon	2.026.200	36.840
Verboekhoven	2.002.000	36.400
Riga	1.835.900	33.380
Tilleul	1.692.900	30.780
Paix	2.121.900	38.580
Bordet	1.978.900	35.980
Total	13.422.200	244.040

Tableau 54 : Nombre de passagers-kilomètres total par chantier (ARIES, 2020)

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Les facteurs d'émission considérés sont de 0,193 kg eqCO₂/km pour les camionnettes et 0,046 kg eqCO₂/passager.km⁴⁷ pour les transports en commun urbains (métro, tram, bus). Faute de données, le facteur d'émission correspondant aux camionnettes considéré ici est par hypothèse celui correspondant aux voitures particulières.

Le tableau ci-dessous reprend, par mode, les émissions liées aux déplacements domicile-travail des travailleurs participant aux chantiers des stations.

Mode	Emissions [teqCO ₂]
Camionnette	2.599
Métro, tram, bus	11
Total	2.610

Tableau 55 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Déplacements – Déplacements domicile-travail des travailleurs affectés aux chantiers des stations (ARIES, 2020)

Les émissions évaluées pour les trajets en camionnette sont prédominantes, ce qui s'explique par une large part modale et un facteur d'émission plus élevé.

4.1.1.3. Synthèse des résultats

A. Scénario de base

Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des émissions calculées pour les différents postes de l'axe « Construction des infrastructures », détaillées selon les différents sous-projets, pour le scénario de base.

Pour rappel, les postes Emissions fugitives et Gestion des déchets, non pris en compte ne sont pas repris.

⁴⁷ Source : site Internet de la STIB

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Poste	Source	Sous-projet				Total
		Tunnel	Stations	Puits P0 et rampe d'accès	Dépôt	
Energie (sources mobiles de combustion)	Consommations excavation déblais	-*	2.402	207	1.005	3.614
	Consommations engins de chantier pour mise en œuvre matériaux	**	6.752	557	701	8.010
	Congélation	-	9.956	-	-	9.956
	Sous-total	-	19.111	764	1.706	21.581
Energie (consommations d'électricité)	Consommations tunnelier	1.363	0	0	0	1.363
	Consommations bases-vies	***219	100	***	***	318
	Sous-total	1.582	100	0	0	1.682
Intrants	Béton	****30.802	73.069	6.012	6.738	117.221
	Acier	9.849	67.132	5.241	10.912	93.135
	Verre	0	852	0	431	1.283
	Equipements	-	1.982	-	-	1.982
	Sous-total	40.652	143.035	11.253	18.681	213.621
Amortissements	Engins de chantier	2.705	NC	NC	NC	2.705
	Sous-total	2.705	0	0	0	2.705
Fret entrant	Béton	****1.336	290	33	42	1.701
	Acier	173	41	12	105	332
	Remblais	-	294	-	71	365
	Engins de chantier	NC	NC	NC	NC	-
	Sous-total	1.510	626	46	217	2.399
Fret sortant	Déchets de chantier	301	1.014	166	799	2.280
	Engins de chantier	NC	NC	NC	NC	-
	Sous-total	301	1.014	166	799	2.280
Déplacements	Domicile-travail	NC	2.610	NC	NC	2.610
	Sous-total	0	2.610	0	0	2.610
Total		46.751	166.495	12.229	21.403	246.877

* Les consommations liées à l'excavation du tunnel sont comptabilisées au niveau des émissions liées aux consommations d'électricité du tunnelier.

** Les consommations liées au creusement du tunnel sont comptabilisées au niveau des émissions liées aux consommations d'électricité du tunnelier.

*** Cette valeur correspond à la base-vie nécessaire à l'ensemble des chantiers sur le site du dépôt de Haren, ainsi que des containers de logements.

**** Y compris le mortier de bourrage.

NC : Non considéré dans ce bilan carbone

Tableau 56 : Synthèse des résultats – Axe Construction des infrastructures – Travaux de construction (ARIES, 2020)

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

A la lecture de ce tableau et des sections précédentes, plusieurs enseignements peuvent être tirés :

- Les **émissions totales** estimées pour l'axe « **Construction des infrastructures** » sont de l'ordre de **245.000 teqCO₂** pour l'ensemble des postes pris en compte.
- Les 7 stations représentent le sous-projet prédominant avec des émissions estimées à environ 165.000 teqCO₂, loin devant le tunnel (environ 45.000 teqCO₂), le dépôt (environ 20.000 teqCO₂) l'ensemble puits P0 et rampe d'accès (10.000 teqCO₂).
- Les **intrants constituent de loin le poste prépondérant** avec plus de 210.000 teqCO₂. Les émissions correspondantes en représentent en effet la grande majorité (environ 85%). Parmi les intrants, les stations sont les sous-projets pour lesquels la part des émissions est la plus importante (environ deux tiers des émissions), suivis par le tunnel (environ 20%). Le solde est constitué par les émissions liées au dépôt puis à l'ensemble puits P0 et rampe d'accès
- Le deuxième poste correspond aux **émissions dues aux consommations d'énergie des sources mobiles de combustion, liées à l'utilisation des engins de chantier (excavations des déblais et mise en œuvre des matériaux) et à la congélation des quais de certaines stations**, dont l'ordre de grandeur est de l'ordre de 10% des émissions totales. Cela confirme le rôle relativement limité de la mise en œuvre du chantier dans les émissions globales liées à la construction d'infrastructure évoqué dans la littérature.
- Les **émissions liées au fret entrant et sortant réunis représentent ensemble le 3^e poste d'émissions**. Les estimations dépendent des scénarios établis. Le mode d'acheminement principal des voussoirs et de l'acier, ainsi que l'évacuation des déblais non valorisables sont considérés être réalisés par voie fluviale. Les acheminements annexes (pré- ou post-acheminements) de ces matériaux, ainsi que les acheminements principaux des autres matériaux (béton prêt à l'emploi, traverses, rails, remblais, déchets de chantier, déblais valorisables) sont quant à eux considérés être effectués par voie routière. En ce qui concerne le fret entrant, l'alimentation en béton des chantiers des stations, considérée depuis des centrales à béton situées à proximité (moins de 10 km), représente environ un cinquième des émissions liées au tunnel, pour lequel des éléments parcourent des distances plus importantes (voussoirs, traverses). C'est globalement également le cas pour l'acier. En ce qui concerne le fret sortant, les émissions les plus importantes concernent les stations, en raison d'un plus grand volume de déblais excavés et d'une plus grande proportion de terres non valorisables devant être évacuées par voie fluviale.
- Le poste suivant consiste en les **émissions issues de la fabrication du tunnelier**, comptabilisées sous forme d'**amortissements**. Ceux-ci sont évalués à environ le double des consommations d'électricité du tunnelier. Cela s'explique notamment par la grande quantité d'acier dont il est constitué (de l'ordre de 1.500 tonnes).
- Les autres postes sont les **déplacements domicile-travail**, correspondant principalement aux chantiers des stations, les **consommations d'électricité (tunnelier et bases-vies)**, représentant à eux deux moins de 2% des émissions totales.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Les figures ci-dessous illustrent la répartition des émissions estimées selon les différents sous-projets et les différents postes considérés. Etant donné la différence d'échelle entre les émissions liées aux intrants et les autres postes, la seconde figure présente un zoom du premier graphique sur les émissions inférieures à 20.000 teqCO₂.

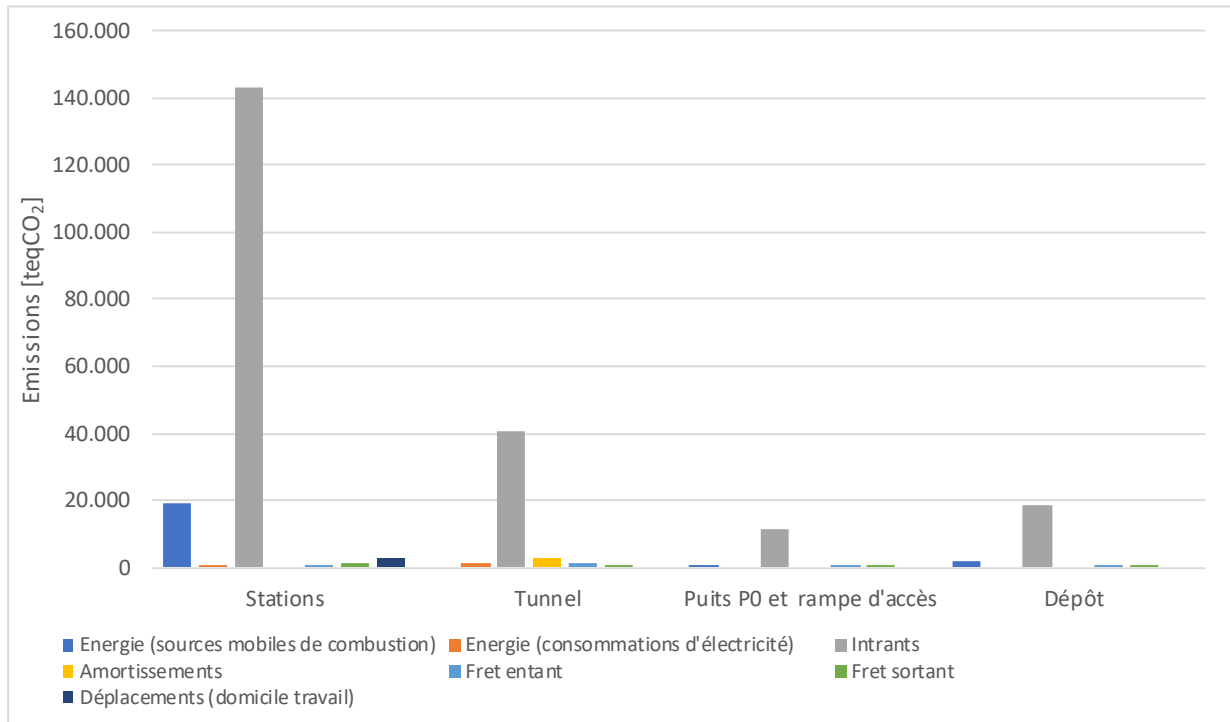


Figure 11 : Synthèse des résultats – Axe Construction des infrastructures – Travaux de construction – Répartition des émissions par sous-projets et postes (ARIES, 2020)

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

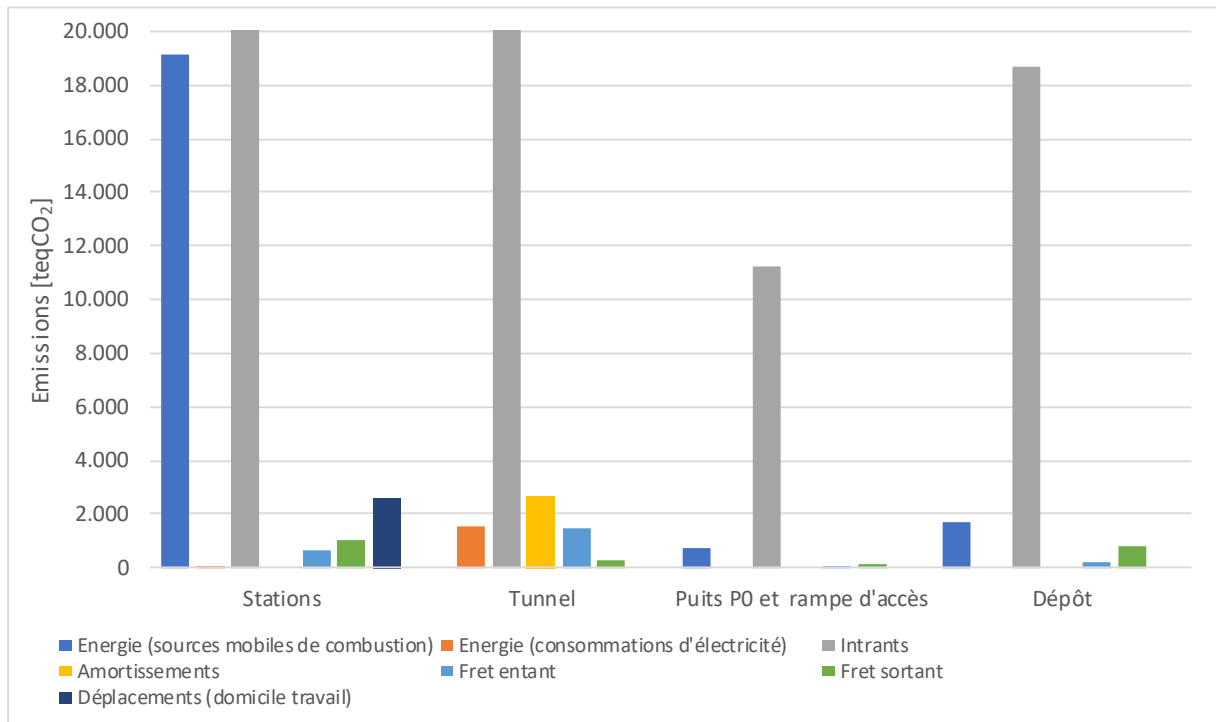


Figure 12 : ZOOM sur la synthèse des résultats – Axe Construction des infrastructures – Travaux de construction – Répartition des émissions par sous-projets et postes (ARIES, 2020)

Le graphique suivant détaille les émissions du poste Intrants, entre le béton, l'acier, le verre et les équipements.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

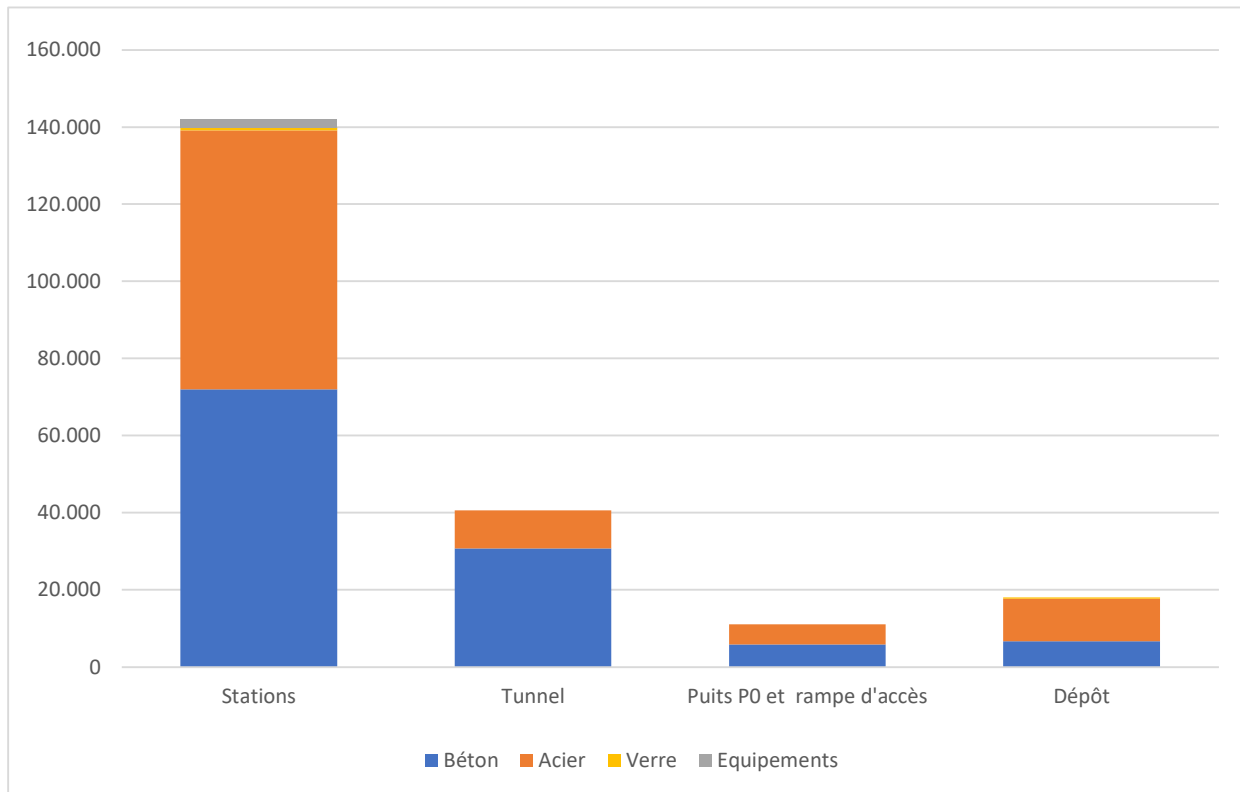


Figure 13 : ZOOM sur la synthèse des résultats – Axe Construction des infrastructures – Répartition des émissions du poste Intrans (ARIES, 2020)

Les émissions de béton représentent 55% des émissions liées aux intrants, suivies de celles liées à l'acier, 44%). Les émissions estimées pour le verre et les équipements sont marginales.

B. Etude de sensibilité

Cette section contextualise l'influence des paramètres analysés au cours de diverses études de sensibilité réalisées localement en marge du scénario de base sur les émissions calculées, concernant :

- Le **poste Intrants**, au niveau de la composition des bétons (voir section 4.1.1.2.D.1.1), où il s'agissait d'analyser l'impact du type de ciment ;
- Le **poste Fret entrant**, au niveau de l'acheminement des voussoirs et de l'acier (voir section 4.1.1.2.G.1), où le transport fluvial, considéré dans le scénario de base, est tour à tour remplacé par du transport ferroviaire, puis par du transport routier ;
- Le **poste Fret sortant**, au niveau de l'acheminement des déblais non valorisables (voir section 4.1.1.2.H.1), où le transport fluvial, considéré dans le scénario de base, est tour à tour remplacé par du transport ferroviaire, puis par du transport routier.

Ces deux derniers points sont par la suite discutés dans une même section

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

B.1. Impact du type de ciment utilisé dans le béton

Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des postes considérés, pour les 3 scénarios considérés : scénario de base dans lequel les facteurs d'émission des bétons sont définis par classe de résistance (provenant de la Société du Grand Paris) et les scénarios Ciment CEM I et Ciment CEM III dans lesquels les facteurs d'émission des bétons ont été recalculés en considérant les facteurs d'émission correspondant aux ciments du même nom. Les résultats relatifs au ciment CEM III tiennent toutefois compte du fait que pour les voussoirs, l'utilisation de ciment CEM I est imposée).

Les autres postes sont considérés inchangés.

Poste	Source	Emissions [teqCO ₂]		
		Scénario de base	Ciment CEM I	Ciment CEM III
Energie (sources mobiles de combustion)		21.581	21.581	21.581
Energie (consommations d'électricité)		1.682	1.682	1.682
Intrants	Béton	117.221	151.386	97.355
	Acier	93.135	93.135	93.135
	Verre	1.283	1.283	1.283
	Equipements	1.982	1.982	1.982
Amortissements		2.705	2.705	2.705
Fret entrant		2.399	2.399	2.399
Fret sortant		2.280	2.280	2.280
Déplacements		2.610	2.610	2.610
Total		246.877	281.042	227.012
Variation par rapport au scénario de base		-	+13,8%	-8,0%
Variation scénario CEM III par rapport au scénario CEM I		-	-	-19,2%

Tableau 57 : Impact du type de ciment utilisé dans les bétons au niveau de l'ensemble des émissions – Axe Construction des infrastructures (ARIES, 2020)

L'augmentation d'un peu moins que 55.000 teqCO₂ due à l'utilisation de ciment CEM I au lieu de ciment CEM III engendre une augmentation de 24% des émissions à l'échelle du bilan global de l'axe Construction des infrastructures. Cela démontre le rôle prépondérant du choix du ciment à mettre en œuvre.

Pour rappel, l'emploi de ciment CEM III est préconisé dans les prescriptions de BMN (hormis pour les voussoirs), aussi les **émissions de gaz à effet de serre totales les plus représentatives pour l'axe Construction des infrastructures s'élèvent à 227.012 teqCO₂.**

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

B.2. Impact du mode d'acheminement

Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des postes considérés, pour les 3 scénarios considérés : scénario de base dans lequel l'acheminement principal des voussoirs (béton et acier des armatures), de l'acier destiné à des usages structurels et des déblais non valorisables est effectué par voie fluviale, et scénarios dans lesquels cet acheminement se fait respectivement par voie ferroviaire et par voie routière. Contrairement à ce qui a été présenté précédemment lors de l'étude de sensibilité locale, les résultats présentés ci-dessous concernent désormais la totalité des postes Fret entrant et Fret sortant, qui reprennent d'autres modes de transport restant inchangés. Aussi, les scénarios sont-ils dénommés avec des guillemets dans le tableau ci-dessous.

Les postes autres que Fret entrant et Fret sortant sont considérés inchangés. Les émissions liées au béton correspondent au scénario de base général.

Poste	Emissions [teqCO ₂]		
	Scénario de base « Voie fluviale »	« Voie ferroviaire »	« Voie routière »
Energie (sources mobiles de combustion)	21.581	21.581	21.581
Energie (consommations d'électricité)	1.682	1.682	1.682
Intrants	213.621	213.621	213.621
Amortissements	2.705	2.705	2.705
Fret entrant	2.399	1.788	4.663
Fret sortant	2.280	2.397	10.544
Déplacements	2.610	2.610	2.610
Total	246.877	246.384	257.406
Variation par rapport au scénario de base		-0,2%	+4,5%

Tableau 58 : Impact du type de ciment utilisé dans les bétons au niveau de l'ensemble des émissions – Axe Construction des infrastructures (ARIES, 2020)

A l'échelle du bilan global de l'axe Construction des infrastructures, le remplacement de l'acheminement par voie fluviale par un acheminement par voie ferroviaire ne présente qu'un impact marginal, tandis que son remplacement par voie routière engendre une augmentation des émissions de l'ordre de 10.500 teqCO₂, soit une augmentation d'environ 5%.

C. Conclusions

Au regard de l'ensemble des résultats et des études de sensibilité réalisées dans le cadre de l'axe Construction des infrastructures, les **émissions de gaz à effet de serre totales les plus représentatives s'élèvent à 227.012 teqCO₂**. Ces émissions correspondent en effet à l'emploi de ciment CEM III, préconisé dans les prescriptions de BMN en termes de composition des bétons (à l'exception des voussoirs, pour lesquels l'utilisation de ciment CEM I est imposée), et à du transport par voie fluviale, en ce qui concerne le fret.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Les **intrants** constituent de loin le poste le plus prépondérant, suivi des **consommations d'énergie (sources mobiles de combustion)** et du **fret (fret entrant et fret sortant réunis)**.

Le fait d'assurer par voie routière le fret assuré par voie fluviale dans le scénario de base n'engendre pas d'augmentation significative des émissions.

Au regard du bilan carbone et des quantités importantes de matériaux à acheminer, c'est donc bien la voie fluviale qu'il convient de privilégier pour réduire les émissions de la construction de la ligne métro nord

4.1.2. Exploitation de la ligne

4.1.2.1. Désagrégation en sources d'émissions

Le bilan carbone du projet Métro Nord est désagrégé en sources d'émissions, selon les **phases** et les **postes** et ce, identiquement pour tous les sous-projets : tunnel, stations et rames de métro (voir plus haut).

Cette désagrégation propre à l'axe « Exploitation de la ligne » est reprise dans le tableau ci-dessous.

Phases	Poste	Sources d'émissions
En phase Fonctionnement	Energie (Sources fixes de combustion)	Consommation de gaz du dépôt
	Energie (Consommations d'électricité)	Consommations des stations
		Consommations du dépôt
		Energie de traction
	Emissions fugitives	Fuites fluides frigorigènes
	Amortissements	Rames de métro
	Intrants	Matériaux – rames de métro
		Achats – biens et services
	Fret entrant	Convoi exceptionnel rames de métro
		Achats – biens et services
	Déchets	Déchets des stations
Déchets du dépôt		
Déplacements	Domicile-travail	
En phase Entretien et maintenance	Intrants	Coût – entretien/maintenance infrastructures
		Coût – entretien/maintenance rames
		Coût – renouvellement infrastructures
		Matériaux – renouvellement rames
		Matériaux – renouvellement rails

Tableau 59 : Désagrégation du projet Métro Nord, axe Exploitation de la ligne (ARIES, 2020)

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Dans un premier temps, toutes les sources d'émissions sont considérées. Dans un second temps, certaines d'entre elles seront négligées, notamment au regard de leur importance relative.

La méthodologie de calcul du deuxième axe est travaillée selon deux phases bien distinctes qui intègrent des problématiques différentes : le **fonctionnement** et **l'entretien/maintenance**.

La première phase Fonctionnement comprend toutes les activités qui permettent à la future ligne M3 de fonctionner correctement quotidiennement. Cette première phase intègre les activités suivantes :

- Les émissions induites par les **stations et le dépôt** : consommations d'énergie (l'éclairage, le chauffage, la ventilation, le refroidissement et les équipements), émissions fugitives ;
- Les émissions induites par les **rames de métro** : sa construction, son acheminement jusqu'au dépôt de Haren, l'amortissement des rames existantes et l'énergie de traction, nécessaire au mouvement des rames de métro ;
- Les émissions induites par les **activités de gestion** pendant le fonctionnement de la ligne, telles que les trajets domicile-travail des employés, les consommations d'énergie des bureaux, l'amortissement du matériel de bureau, la gestion des produits et équipements entrants et sortants (intrants liés aux achats et gestion des déchets).

La deuxième phase Entretien/maintenance comprend toutes les activités plus ou moins régulières qui assurent une durabilité et une efficacité de l'infrastructure. En effet, l'ensemble de l'infrastructure demande un entretien continu tout au long de sa durée de vie. Les principales émissions sont les suivantes :

- Les émissions induites par **l'entretien quotidien de l'ensemble de l'infrastructure et la maintenance régulière** tout au long de l'année ;
- Les émissions induites par le **renouvellement plus ponctuel des grosses infrastructures** (rames de métro, rails, parachèvements).

4.1.2.2. Calcul des émissions

A. En Phase Fonctionnement

A.1. Consommations d'énergie des stations et du dépôt

La consommation d'énergie de l'infrastructure présente une part importante des émissions de GES liées au fonctionnement de la ligne de métro. Trois postes sont évalués dans ces consommations : **les consommations d'énergie indirecte (électricité) des différentes stations et du dépôt** de la future ligne, **les consommations d'énergie directe (gaz) du dépôt** de et **les émissions fugitives des fluides frigorigènes** s'échappant des groupes de froids (climatisation, pompe à chaleur...).

A.1.1. Energie indirecte (consommations d'électricité)

Les données d'activité correspondent aux **consommations** et **consommations spécifiques** des stations et du dépôt (électricité). Ces consommations exprimées en kWh comprennent le chauffage, la ventilation, l'éclairage, les équipements et le refroidissement des différents locaux et espaces. Le facteur d'émission correspondant est donc exprimé en kgCO_2/kWh consommé.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Les consommations des stations sont évaluées à partir des caractéristiques énergétiques des différents équipements présent dans chaque station et des surfaces correspondantes.

Ces consommations d'énergie ont déjà été calculés et sont donc reprises directement. Les calculs détaillés se trouvent dans le chapitre Energie du livre Généralités Stations.

Voir Livre III Généralités Stations – Chapitre 7. Energie, point 7.3

Les consommations totales d'énergie (électricité, gaz et poste de redressement) du dépôt sont évaluées sur base d'une méthodologie consistant à utiliser les consommations d'énergie du dépôt Jacques Brel dont la géométrie et l'organisation interne sont similaires à celles du futur dépôt. Cette approche présente l'intérêt de considérer des ordres de grandeur réalistes, le dépôt Jacques Brel étant, de plus, le plus récent. Dans cette partie, seules les consommations d'énergie indirectes (électricité) liées au fonctionnement du dépôt sont prises en compte.

Le détail de des calculs de consommations d'énergie se trouve dans le chapitre Energie du livre Dépôt.

Voir Livre IV Dépôt – Chapitre 7. Energie, point 7.6.16

Les **émissions annuelles** évaluées pour la consommation d'énergie des stations et du dépôt dans le poste Energie sont reprises dans le tableau ci-dessous par sous-projet et sources d'émissions.

Sous-projet	Sources d'émissions	Consommations [kWh]	Emissions [teqCO ₂]
Stations	Refroidissement	548.124	86
	Chauffage	28.224	4
	Eclairage	824.615	129
	Ventilation	412.304	65
	Equipements	9.581.898	1.504
	Total	11.391.147	1788
Dépôt	Total	1.100.000	173
Total – Poste énergie indirecte		12.491.147	1.961

Tableau 60 : Emissions – Axe Exploitation de la ligne – Poste Energie indirecte – Stations et dépôt (ARIES, 2020)

Le facteur d'émission retenu est celui utilisé par la STIB pour effectuer ses propres bilans carbone, qui est de 157 geqCO₂/kWh. Ce facteur d'émission est basé sur le « mix énergétique » du fournisseur de la STIB⁴⁸.

A.1.2. Emissions directes (sources fixes de combustion)

Les données d'activité correspondent aux **consommations d'énergie de gaz du dépôt**. Ces consommations sont exprimées en kWh. Le facteur d'émission correspondant est donc exprimé en quantité de CO₂ émise par kWh consommé.

Les consommations totales d'énergie (électricité, gaz et poste de redressement) du dépôt sont évaluées sur base d'une méthodologie consistant à utiliser les consommations d'énergie du dépôt

⁴⁸ Considéré comme constant sur l'ensemble de la période considérée dans le bilan carbone, étant donné l'absence de vision à long terme

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Jacques Brel dont la géométrie et l'organisation interne sont similaires à celles du futur dépôt. Cette approche présente l'intérêt de considérer des ordres de grandeur réalistes, le dépôt Jacques Brel étant de plus le plus récent. Dans cette partie, seules les consommations d'énergie directes (gaz) liées à l'exploitation du dépôt sont prises en compte.

Le détail de des calculs de consommations d'énergie se trouve dans le chapitre Energie du livre Dépôt.

Voir Livre IV Dépôt – Chapitre 7. Energie, point 7.6.16 Evaluation des consommations totales d'énergie

Avec des consommations de gaz liées à l'exploitation du dépôt de 820.000 kWh par an, les **émissions annuelles** évaluées sont de **200 teqCO₂**.

Le facteur d'émission retenu est celui utilisé par la STIB pour effectuer ses propres bilans carbone, qui est de 0,244 kg eqCO₂/kWh. Ce facteur d'émission, issu de la Base Carbone de l'ADEME, correspond à la valeur du gaz naturel en Europe.

A.1.3. Emissions fugitives

Les systèmes de production de froid que l'on retrouve dans les installations de refroidissement des locaux techniques comportent un circuit contenant un fluide frigorigène. Ces systèmes ne sont pas parfaitement hermétiques et présentent des fuites. Les **gaz fluorés issus de ces fuites sont de puissants gaz à effet de serre** pour lesquels il est donc important d'évaluer les émissions. En 2014, les divers gaz fluorés représentaient en effet 2% des émissions mondiales⁴⁹. Une méthodologie développée par la Base Carbone explique comment sont calculés les émissions de gaz à effet de serre des différents gaz fluorés.

*« L'effet de relâchement dans l'atmosphère d'un kilo de gaz à effet de serre n'est pas le même quel que soit le gaz. Chaque gaz possède un « **pouvoir de réchauffement global** » (PRG), qui quantifie son « impact sur le climat ». Plus ce PRG est élevé, plus l'effet de serre additionnel engendré par le relâchement d'un kilo de ce gaz dans l'atmosphère est important. Par convention, le PRG compare les gaz à effet de serre au CO₂, et donc, par convention, le PRG du CO₂ vaut toujours 1. Pour les autres gaz à effet de serre, la méthode est basée sur les PRG à 100 ans figurant dans le dernier rapport du GIEC. »⁴⁴*

Les **fuites de gaz frigorigène concernent les stations et le dépôt**. Elles concernent les pompes à chaleur et les installations de climatisation présentes dans certains locaux refroidis dans le but de garantir le bon fonctionnement des installations qui s'y trouvent et d'en augmenter la durée de vie.

Les données d'activité correspondent aux quantités de fluides frigorigènes émis dans l'atmosphère par les installations, calculées en fonction de leur taux de fuite annuel. Les facteurs d'émission correspondent au PRG des gaz fluorés, permettant de convertir ensuite les quantités de gaz émis en quantités équivalentes de CO₂ émis.

Le tableau ci-dessous reprend les types d'installations présents dans les stations et le dépôt, leur taux de fuite annuels ainsi que les gaz fluorés intégrés dans l'installation.

⁴⁹ Source : Base Carbone de l'ADEME

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Locaux techniques	Types d'installations	Taux de fuites annuelles	Fluides frigorigènes
Stations			
Locaux de télécommunication 1	CRAC (armoire)	6%	R410a
Locaux UPS	Split	5%	R410a
Locaux ATM	DRV	10%	R410a
Pompe à chaleur	Multisplit	6%	R410a
Dépôt			
Groupe d'eau glacée	Climatisation à eau glacée	5%	R410a
Sécheur d'air	Climatisation à air	9%	R410a
Pompe à chaleur	Climatisation à eau glacé	5%	R410a

Tableau 61 : Tableau des caractéristiques des installations de refroidissement (ARIES, 2020)

Les taux de fuite annuels pris en compte dans ce bilan sont ceux repris dans la Base Carbone de l'ADEME. Les informations concernant les installations techniques (y compris le type de fluide) se trouvent dans l'annexe 16 – Listes installations classées de la demande de Permis d'Environnement (BMN, 2018).

Toutes les installations contiennent le même fluide frigorigène, le R410a, qui possède un PRG à 100 ans de 1924⁵⁰.

Les émissions annuelles évaluées du poste Emissions fugitives sont reprises dans le tableau ci-dessous par sous-projet et sources d'émissions.

Sous-projet	Sources d'émissions	Emissions GES [t _{R410a}]	PRG	Emissions [teqCO ₂]
Stations	Refroidissement	0,05161	1924	99
	Chauffage	0,00264	1924	5
	Total			104
Dépôt	Refroidissement	0,001493	1924	3
	Chauffage	0,000395	1924	1
	Total			4
Total Emissions fugitives – Fluides frigorigènes				108

Tableau 62 : Emissions – Axe Exploitation de la ligne – Poste Emissions fugitives – Stations et dépôt (ARIES, 2020)

A.2. Les rames de métro

Cette partie comprend plusieurs postes d'émissions qui concernent le **sous-projet rame de métro**.

43 nouvelles rames de métros ont été commandées par la STIB en 2016. Ces rames M7 sont fabriquées par le constructeur espagnol Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF). La mise en circulation **des 22 premières rames est prévue pour 2022**. Dans un premier temps, ces

⁵⁰ Source : Base Carbone de l'ADEME, d'après le 5^{ème} rapport du GIEC (2013)

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

rames viendront renforcer les lignes 1 et 5 avant de circuler sur la ligne M3 à son ouverture. Sur base d'hypothèses consolidées avec la STIB, il est considéré que les 21 dernières rames du contrat circuleront à partir de 2030 pour l'ouverture de la ligne M3.

L'impact des rames de métros mises en circulation dès 2022 sera évalué via un plan d'amortissement. Les futures rames construites spécialement pour la mise en service de la ligne seront prises en compte dans les postes Intransit - Matériaux (en calculant les émissions liées à la production des matériaux utilisés pour la construction des rames) et Fret entrant.

A.2.1. Energie indirecte

Les données d'activité correspondent à l'énergie de traction est l'énergie nécessaire au mouvement des rames de métros.

Les consommations d'énergie de traction lors de l'exploitation de la future ligne ont été estimées sur base d'une méthodologie proposée par la STIB, consistant à utiliser les consommations mesurées pendant l'année 2019 au niveau des postes de redressement d'un tronçon du réseau existant présentant des caractéristiques similaires.

La méthodologie et le calcul détaillé se trouvent dans le chapitre Energie du livre Tunnel.

Voir Livre II Tunnel – Chapitre 6. Analyse des incidences du projet au regard de la situation de référence et recommandations, point 6.7 Energie

En considérant la fréquence d'un métro toutes les 5 minutes, les **consommations d'énergie annuelles** du tronçon Liedts-Bordet sont évaluées à **8.180.000 kWh**.

L'énergie de traction est également prise en compte au niveau du dépôt, à partir des consommations d'énergie du poste de redressement du dépôt, correspondant au mouvement des rames dans l'enceinte du dépôt.

La méthodologie et le calcul détaillé se trouvent dans le chapitre Energie du livre Dépôt.

Voir Livre IV Dépôt – Chapitre 7. Energie, point 7.6.16 Evaluation des consommations totales d'énergie

Ainsi, les **consommations d'énergie annuelles** du poste de redressement du futur dépôt sont évaluées à **3.300.000 kWh**.

Le facteur d'émission retenu est le même que celui utilisé pour la consommation d'énergie des stations et du dépôt, soit 157 geqCO₂/kWh, basé sur le mix énergétique du fournisseur de la STIB.

Les émissions carbone évaluées du poste Energie du sous-projet Rames de métro sont de **1.802 teqCO₂ par an**.

Dans les années à venir, la STIB souhaite améliorer la fréquence de ces métros. Grâce à l'automatisation de la future ligne M3 et la construction d'une infrastructure adaptée (tunnel, stations, équipements, signalisation, ...), il sera possible de l'augmenter à un intervalle de 90 secondes en heure de pointe. En effet, l'infrastructure de ce nouveau métro sera conçue pour être compatible avec une exploitation à cette fréquence.

L'augmentation de la fréquence de la ligne nécessitera une augmentation du nombre de rames, un entretien et une maintenance des rames et des infrastructures plus fréquents, ainsi qu'une possible extension du dépôt et de l'atelier de remisage afin de pouvoir stocker l'ensemble des

équipements. Cette augmentation aura donc un impact sur les émissions carbone liées à l'exploitation de la ligne.

Cependant, cette augmentation de la fréquence n'est pas prise en compte comme hypothèse dans le bilan carbone puisqu'il s'agit d'un paramètre aujourd'hui trop inconnu. De plus, cette augmentation de la fréquence n'est pas amenée à être mise en place avant plusieurs dizaines d'années, sans certitude qu'elle le soit un jour.

Ainsi, l'hypothèse retenue, en accord avec la STIB, est de considérer que l'énergie de traction sera constante sur les 50 premières années d'exploitation.

A.2.2. Intrants

La livraison des rames de métros dédiées à la ligne de métro M3 est estimée vers 2027. Sur l'ensemble des 21 rames de métro prévues pour la mise en service de la ligne de métro M3, le calcul des intrants ne se fera que sur **10 rames** puisqu'il s'agit du tronçon Liedts-Bordet, soit une partie de la ligne M3. Le calcul du nombre de rames considérées pour le tronçon Liedts-Bordet a été effectué en fonction de la longueur de ce tronçon par rapport à la longueur totale de la ligne (5 km de tronçon sur un axe total de 10,3 km)⁵¹.

Les données d'activité correspondent aux quantités de matériaux qu'on retrouve dans la composition des rames de métro M7. Les facteurs d'émission correspondants sont donc exprimés en quantité de CO₂ émise par tonne de matériaux. Ce poste concerne **les matériaux nécessaires à la fabrication des 10 rames de métro** qui seront commandées pour la mise en service de la ligne M3.

La STIB nous a donné les informations nécessaires pour évaluer l'impact de la construction de ces rames de métro.

Poids à vide d'une rame [t]	Matériaux	Composition	Quantités [t]
166	Acier	66,5%	110
	Aluminium	33,5%	56

Tableau 63 : Caractéristiques d'une rame de métro M7 (ARIES, 2020)

L'acier et l'aluminium sont les principaux constituant d'une rame. L'évaluation de ce poste est simplifiée en prenant comme hypothèse que l'ensemble de la rame est constitué uniquement de ces deux matériaux.

Le facteur d'émission retenu pour l'acier est le même que celui retenu pour l'axe construction, égal à 1.804 kg eqCO₂/t. En ce qui concerne l'aluminium, le facteur d'émission considéré est de 6.100 kg eqCO₂/t. Cette valeur correspond à la moyenne pondérée des facteurs d'émission pour la fabrication d'aluminium neuf (7.803 kg eqCO₂/t) et pour la fabrication d'aluminium recyclé (562 kg eqCO₂/t) issus de la Base Carbone de l'ADEME.

Les émissions ponctuelles évaluées du poste Intrants pour le sous-projet Rames de métro sont reprises dans le tableau ci-dessous par matériau.

⁵¹ Hypothèse validée par la STIB

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Matériaux	Emissions [teqCO ₂]
Acier	176,6
Aluminium	339,2
Total par rame	515,8
Total pour 10 rames	5158

Tableau 64 : Emissions – Axe Exploitation de la ligne – Poste Intrants – Matériaux – Rames de métro (ARIES, 2020)

La durée de vie des rames de métro est estimée à 40 ans. On considère que l'impact carbone lié à la construction d'une rame de métro est de **515,8 teqCO₂ par rame** pour le poste Intrants - Matériaux (émissions ponctuelles à renouveler tous les 40 ans en fonction du nombre de nouvelles rames), soit **un total de 5158 teqCO₂ sur 40 ans**.

En amortissant le résultat total sur la durée de vie, les émissions carbone annuelles obtenues sont égales à **129 teqCO₂ par an** (entre 2030 et 2070).

A.2.3. Fret entrant

Le poste Fret entrant concerne **l'acheminement des rames de métro** considérées dans le poste Intrants. Le transport de ces rames se fera par convoi exceptionnel depuis l'Espagne où se situent les ateliers de fabrication du constructeur CAF.

Les données d'activité liées au fret sont exprimées en tonnes.km et sont déterminées à partir du poids à vide d'une rame de métro (166 t) et des distances estimées correspondent au trajet entre le dépôt de Haren et le siège social de l'entreprise situé à Guipuzcoa en Espagne. La majorité des ateliers de fabrication sont situés dans un périmètre rapproché.

Une rame de métro est composée de 6 voitures. Le poids à vide d'une voiture est de 28 tonnes. Chaque voiture sera transportée en convoi exceptionnel par un camion articulé.

Le facteur d'émission dépend du type de camion choisi. Le facteur d'émission considéré pour le transport des rames est de 0,0666 kg eqCO₂/t.km. Cette valeur est issue de la Base Carbone et correspond, par hypothèse, à un camion articulé, présentant un PTAC comprise entre 40 et 44 t et circulant au diesel routier avec une incorporation de 7% de biodiesel.

Les **émissions ponctuelles** évaluées pour le poste Fret entrant du sous-projet Rames de métro sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Matériaux transportés	Distance [km]	Tonnes.km	Emissions [teqCO ₂]
1 rame de 166 t	1.180	195.880	13
10 rames de 166 t	1.180	1.958.800	130

Tableau 65 : Emissions – Axe Exploitation de la ligne – Poste Fret entrant – Rames de métro (ARIES, 2020)

En amortissant le résultat total sur la durée de vie, les émissions carbone annuelles obtenues sont égales à **3 teqCO₂ par an** (entre 2030 et 2070).

A.2.4. Amortissements

Le poste Amortissements correspond aux émissions liées à la production des **22 rames de métro M7 qui circuleront à partir de 2022**, utilisées sur les lignes M1 et M5 du réseau existant et qui seront également utilisées lors de la mise en service de la ligne M3. Les données d'activité sont déterminées à partir des quantités de matériaux qui les composent en les pondérant par une fraction de leur durée de vie correspondant à leur utilisation pour la ligne M3. Tout comme les intrants, ce poste ne prendra en compte **que 11 rames** sur les 22 rames au total, afin de considérer le tronçon Liedts-Bordet et non l'ensemble de la ligne M3 dans le calcul.

Ces données d'activité se calculent donc de la manière suivante :

$$DA_{\text{Amortissements,rame}} = \frac{t_{\text{utilisation rame/projet}}}{\text{durée de vie rame}} \cdot m_{\text{matériau rames}}$$

Où :

- $t_{\text{utilisation rame/projet}}$: temps d'utilisation de la rame sur la ligne M3 ;
- Durée de vie engin : durée de vie de la rame ;
- $m_{\text{matériau engin}}$: masse du matériau constitutif de la rame.

Le facteur d'émission correspond donc à celui relatif à la production des matériaux dont la rame est composée, soit l'acier et l'aluminium.

Les hypothèses suivantes sont retenues :

- La ligne M3 sera mise en circulation à partir de 2030 ;
- Toutes les rames de métro seront utilisées pour cette ligne ;
- La rame de métro possède une durée de vie de 40 ans.

Les **émissions annuelles liés à l'amortissement** s'élèvent donc à 5.674 teqCO₂/40 ans, soit **141 teqCO₂/an pendant 32 ans** ((2022+40) – 2030).

A.3. Activités de gestion

Les émissions induites par les **activités de gestion de la ligne M3** pendant son fonctionnement concernent les **trajets domicile-travail des employés de la STIB** (agents de conduite, agents de maintenance, ...), **les consommations énergétiques des bureaux, les différents achats de produits et équipements, l'amortissement du matériel de bureau et la gestion des déchets.**

Tout au long de son exploitation, la STIB effectue **des achats de produits, de biens et de services** assurant le bon fonctionnement de l'ensemble de l'infrastructure et ses infrastructures génèrent des **déchets** qui sont traités et envoyés chez différents collecteurs. Ces achats et ces déchets engendreront des émissions carbone évaluées dans les postes Intrants, Gestion des déchets et Fret entrant et sortant.

L'ensemble des bureaux liés à la ligne M3 se situent dans le bâtiment administratif du dépôt. Les émissions carbone des consommations énergétiques des bureaux sont donc calculées dans la partie Consommation d'énergie du dépôt. Concernant l'amortissement du matériel de bureau, ce poste ne représente que des émissions marginales par rapport à l'ensemble des émissions (telles que celles liées à l'amortissement des rames de métro par exemple). Aussi, ce poste est négligé

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

dans le cadre du bilan carbone. Seuls les déplacements domicile-travail et la gestion des produits et équipements (dont les déchets) sont donc pris en compte dans cette partie.

A.3.1. Déplacements

Les données d'activité liées aux déplacements sont exprimées en passagers.km en fonction du mode de transports utilisé par les employés. Les facteurs d'émission correspondants sont donc exprimés en quantité de CO₂ émise par passager.km parcourus.

Il a été possible d'établir un tableau de la **répartition des modes de transports utilisés par le personnel de la STIB** pour venir travailler et des **distances moyennes**. Les chiffres se basent sur les données fournies par la STIB⁵² et une analyse de l'évolution de la mobilité en Belgique et à Bruxelles⁵³. De plus, le lieu de travail étant accessible directement grâce au métro, il est considéré que la part d'employés empruntant ce mode de transport sera plus importante qu'aujourd'hui.

Part modale de transport	Répartition [%]	Facteurs d'émission
Voitures	35	0,193 kg eqCO ₂ /km*
Motos	6	0,154kg eqCO ₂ /km**
Vélos	8	-
Pied	3	-
STIB (métro, tram, bus)	35	0,046 kg eqCO ₂ /passager.km***
Trains	13	0,0484 kg eqCO ₂ /passager.km****

* Base Carbone : Transport de personnes - Voiture – Motorisation moyenne – 2018

** Base Carbone : Transport de personnes - Moto > 250 cm³ – Urbain – 2018

*** Moyenne STIB

**** Base Carbone : Transport de personnes - Train de voyageurs, Belgique

Tableau 66 : Informations sur les déplacements des employés de la STIB (ARIES, 2020)

Nous considérons un nombre de jours de travail annuel moyen égal à 210 jours et une moyenne de 2 trajets par jour (aller-retour), ainsi qu'un taux de remplissage des voitures de 1,1 (pour prendre en compte le covoiturage). Selon les informations de la STIB, 103 personnes seront affectées au site en lien avec la ligne M3 et 35 employés maximum seront présents simultanément sur le site. D'après les données fournies par la STIB, la distance moyenne entre le domicile et le travail des employés de la STIB à Haren en 2018 était de 5,7 km.

⁵² Répartition modale du site de Haren – Enquête mobilité STIB, 2017

⁵³ D'après le Diagnostic fédéral sur les déplacements domicile-travail de 2017, l'utilisation de la voiture dans la Région de Bruxelles a diminué de 20% entre 2005 et 2017, l'utilisation du train a augmenté de 5,5%, l'utilisation des transports en commun a augmenté de 27,5%, l'utilisation du vélo a augmenté de 259% et le déplacement à pied a augmenté de 39%. Ces chiffres montrent globalement que les modes actifs et les transports en communs sont de plus en plus utilisés, contrairement à la voiture. On considère que cette évolution continue dans les années à venir (jusqu'en 2030).

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Les émissions annuelles évaluées pour la partie Activité de gestion du poste Déplacement sont reprises dans le tableau ci-dessous par mode de transports.

Transport	Emissions [teqCO ₂]
Voitures	15
Motos	2
STIB (métro, tram, bus)	4
Trains	2
Total – Poste Déplacements	23

Tableau 67 : Emissions – Axe Exploitation de la ligne – Poste Déplacements (ARIES, 2020)

Contrairement aux autres postes d'émissions, celui-ci considère l'ensemble des sous-projets, soit la totalité de l'infrastructure (tunnel, stations, dépôt, rames).

A.3.2. Intrants

Les données d'activité correspondent aux montants dépensés par la STIB pour acheter des produits, des services ou encore des équipements. Les facteurs d'émission monétaires correspondants sont donc exprimés en quantités de CO₂ émises par k-euros dépensés.

En 2017, les achats de produits, biens et services de la STIB ont généré **26.135 teqCO₂**. Ces émissions correspondent aux achats divers (matériaux plastiques, produits chimiques, vêtements, informatique et bureautique...) mais également aux intrants liés aux budgets prévus dans les services de conseils (consultants, avocats...), d'assurances, d'hébergements et de restaurations...⁵⁴

L'estimation des futures dépenses annuelles effectuées pour la future ligne de métro M3 est réalisée au prorata du nombre de kilomètres développés par la STIB, soit 5 km du tronçon Liedts-Bordet sur un total de 39,9 km d'axes métro, 140 km d'axes tram et 351 km de bus.⁵⁵

Les émissions annuelles évaluées pour le poste Intrants dans la partie consommations de biens et de services sont estimés à **247 teqCO₂**.

A.3.3. Fret entrant

Le poste Fret entrant regroupe l'acheminement des biens, produits et matériaux achetés par la STIB. La provenance de l'ensemble de ces intrants n'étant pas connue aujourd'hui, les émissions carbone y étant liées ont été évaluées sur base d'un pourcentage des émissions totales générées par la totalité des intrants.

D'après les informations de la STIB, les émissions de GES du fret entrant du bilan carbone de la STIB en 2017 correspondent à environ 5% des émissions de GES des achats effectués par la STIB.

En considérant ce même rapport pour le métro Nord de Bruxelles, on peut estimer les émissions annuelles du poste Fret entrant dans la partie Consommations de biens et de services à **12 teqCO₂**.

⁵⁴ Les intrants liés à la maintenance et l'entretien de la ligne sont repris dans la section Partie 1 :4.1.2.2.B

⁵⁵ Source : STIB (2018). *Statistiques 2017*

A.3.4. Gestion des déchets

Les données d'activité correspondent aux quantités de **déchets générés par les voyageurs dans les différentes stations et par les activités du dépôt**. Les facteurs d'émission correspondants sont donc exprimés en quantités de CO₂ émises par tonne de déchets émis, jetés ou recyclés.

Les quantités de déchets générés par l'exploitation des stations et du dépôt de Haren de la future ligne M3 ont été estimées sur base d'une méthodologie consistant à utiliser et extrapoler les quantités collectées pendant l'année 2019 par la STIB pour deux dépôts de tailles similaires au dépôt de Haren et pour l'ensemble des stations de métro.

Dépôt

Les données des déchets collectées dans les dépôts de métro Demets-4 et Jacques Brel ont été adaptées à la taille du dépôt de Haren afin d'estimer les quantités de déchets qui seront générées tous les ans.

Les activités du dépôt engendrent deux catégories de déchets :

- Les **déchets dangereux** (filtres à huile, déchets souillés, aérosols...)
- Les **déchets non-dangereux** :
 - Les DIB (Déchet Industriel Banal) qui correspondent aux ordures ménagères ;
 - Les papiers/cartons ;
 - Les PMC (Plastique, emballage Métalliques et Cartons à boissons)

Sur base des données fournies par la STIB, la majorité des déchets dangereux et des DIB sont incinérés (brûlés) tandis que la totalité des déchets papiers/cartons et PMC sont recyclés.

Le tableau ci-dessous reprend les différentes quantités de déchets générés par le dépôt et le traitement affecté à chaque type de déchets.

Catégories de déchets	Description de déchets	Quantités [t]	Traitement
Déchets dangereux		15,25	Incinérés
Déchets non-dangereux	DIB	30,92	Incinérés
	Papiers/cartons	7,69	Recyclés
	PMC	1,4	Recyclés

Tableau 68 : Quantité et traitement des déchets générés par le dépôt de Haren (ARIES, 2020)

L'ensemble des facteurs d'émission utilisés sont repris de la Base Carbone. Ils dépendent du type de déchets et de leur traitement (en fonction du fait que le déchet est valorisé ou non). Le facteur d'émission du traitement des déchets dangereux (Déchets Industriels Spéciaux – fin de vie incinération) est de 706 kg eqCO₂/t. Le facteur d'émission du traitement des DIB (ordures ménagères – fin de vie incinération) est de 362 kg eqCO₂/t. Enfin, le facteur d'émission du recyclage des déchets papiers/cartons et PMC est de 33 kg eqCO₂/t.

Les émissions annuelles évaluées pour le poste Gestion des déchets du sous-projet dépôt sont reprises dans le tableau ci-dessous par type de déchets.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Catégories de déchets	Description de déchets	Emissions [teqCO ₂]
Déchets dangereux		10,8
Déchets non-dangereux	DIB	11,2
	Papiers/cartons	0,25
	PMC	0,05
	Total – Déchets non dangereux	11,5
Total Déchets - Dépôt		22

Tableau 69 : Emissions – Axe Exploitation de la ligne – Déchets – Dépôt (ARIES, 2020)

Stations

Les données des déchets collectés dans l'ensemble des stations de la STIB en 2019 ont été adaptées au nombre de stations de la future ligne de métro, afin d'estimer la quantité de déchets générés par les voyageurs fréquentant les 7 futures stations.

L'ensemble des stations dispose de poubelles d'ordures ménagères mais seulement quelques-unes d'entre elles proposent des poubelles permettant d'effectuer un tri des déchets avec des poubelles supplémentaires pour le papier, le carton et le PMC.

Le tableau ci-dessous reprend les différentes quantités de déchets générés par les voyageurs des stations et le traitement affecté à chaque type de déchets.

Catégories de déchets	Description de déchets	Quantités [t]	Traitement
Déchets non-dangereux	DIB	109,12	Incinérés pour valorisation
	Papiers/cartons	1,78	Recyclés
	PMC	0,014	Recyclés

Tableau 70 : Quantités et traitement des déchets générés par les stations (ARIES, 2020)

L'ensemble des facteurs d'émission utilisés sont repris de la Base Carbone. Ils dépendent du type de déchets et de leur traitement (en fonction du fait que le déchet est valorisé ou non).

Sur base des données fournies par la STIB, les déchets résiduels issus des stations de métro sont valorisés pour produire de l'énergie. Ainsi, un facteur d'émission correspondant aux émissions évitées par la valorisation s'ajoute au facteur d'émission d'incinération des DIB. Le facteur d'émission du traitement des DIB (ordures ménagères – fin de vue incinération) est de 362 kg eqCO₂/t. Le facteur d'émission correspondant aux évitées du DIB est de -164 kg eqCO₂/t. Le facteur d'émission du recyclage des déchets papiers/cartons et PMC est de 33 kg eqCO₂/t, soit le même que pour les déchets du dépôt.

Les **émissions annuelles** évaluées pour le poste Gestion des déchets du sous-projet stations sont reprises dans le tableau ci-dessous par type de déchets.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Catégories de déchets	Description de déchets	Emissions [teqCO ₂]
Déchets non-dangereux	DIB	21,6
	Papiers/cartons	0,1
	PMC	-*
Total Déchets - Stations		22

* Les émissions de GES des PMC des stations sont négligées en raison de leur faible quantité

Tableau 71 : Emissions – Axe Exploitation de la ligne – Déchets – Stations (ARIES, 2020)

A.3.5. Fret sortant

Le poste Fret sortant regroupe l'acheminement des déchets des stations et du dépôt, qui sont considérés dans le poste Gestion des déchets. Les déchets de la STIB sont soit acheminés vers un centre de traitement situé en Belgique, soit préacheminés vers un centre de regroupement des déchets, toujours en Belgique, afin d'être triés et acheminés ensuite vers les filières adaptées.

Habituellement, le poste est évalué à partir du poids total des déchets et de la distance moyenne entre l'infrastructure et le centre de traitement. Cependant, les facteurs d'émission proposés par la Base Carbone, utilisés pour le poste Gestion des déchets, incluent le transport des déchets jusqu'au lieu de traitement. En considérant ces facteurs d'émission, **il n'est donc pas nécessaire de calculer le fret aval**, qui est compris dans le poste Gestion des déchets.

B. En Phase Entretien et maintenance

L'infrastructure de transport du Métro Nord de Bruxelles aura une durée de vie très longue, pouvant aller jusqu'à 100 ans, voire au-delà. Pour maintenir l'ensemble des stations, du dépôt, du tunnel dans un état optimal de fonctionnement, un **entretien continu quotidien et des opérations de maintenances régulières seront nécessaires**. Certains équipements devront être **renouvelés** et des **opérations de rénovations lourdes** devront être réalisées tout au long de leur durée de vie.

L'évaluation des émissions carbone de la phase Entretien et Maintenance est effectuée à partir des prévisions des **futures opérations qui seront réalisées dans plusieurs dizaines d'années** sur la ligne. Le choix a été fait de retenir des **hypothèses très simplifiées** afin de ne pas multiplier le risque d'erreurs par des données trop précises, de toute manière entachées d'incertitude. L'objectif de cette phase est de **proposer un ordre de grandeur des émissions carbone** qui seront générées indépendamment du fonctionnement quotidien de la ligne de métro.

B.1. Travaux d'entretien et de maintenance

B.1.1. Infrastructures

Un **nettoyage quotidien et une maintenance régulière** tout au long de l'année sont prévus dans les stations et les voies du tunnel. Les émissions carbone sont évaluées sur base d'une méthodologie consistant à utiliser, comme données d'activité, les coûts induits par des opérations de maintenance et d'entretien de stations et de voies de tunnels existantes au sein des infrastructures de la STIB. Les résultats sont ensuite adaptés aux caractéristiques de la future infrastructure du métro Nord.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

D'après les informations de Bruxelles Mobilité, le coût annuel d'entretien de la station de métro Botanique est de 122.000€ et correspond à un nettoyage quotidien incluant les tâches suivantes :

- Vidange des poubelles ;
- Auto-laveuses ;
- Nettoyage des sièges, des AVM (achat tickets), des garde-corps, des valideurs, ...

La station Botanique étant équivalente aux nouvelles stations du métro Nord de Bruxelles, l'hypothèse d'un coût d'entretien annuel des sept stations identique, soit de 122.000€ par station, est prise. Le coût total de l'entretien est de **854.000€/an**.

Le coût d'une maintenance régulière est estimé à **150.000€/station/an**. Elle comprend les petites opérations suivantes :

- Peinture ;
- Réparation des carrelages ;
- Injections ;
- Réparations des bétons et petits travaux divers ;
- Signalétique pour les malvoyants, ...

On considère donc un budget annuel de **1.050.000 €** de maintenance régulière pour la future ligne de métro et l'ensemble de ses stations.

Concernant les voies du tunnel, les coûts de maintenance sont estimés à environ **60.000 €/km/an**. Les différentes opérations qui peuvent être effectuées sont les suivantes :

- Dépoussiérage du tunnel ;
- Etanchéité + anti-carbonatation ;
- Nettoyage des égouts dans les stations ;
- Réparations des bétons ;
- Passage de nappe (régénération des drains).

Le tableau ci-dessous montre un exemple des fréquences et durées d'interventions des rames de services intervenant pour la maintenance dans un tunnel.

Opération	Fréquence d'intervention	Durée d'intervention	Type de train
Meulage des voies	1 fois par an	15 nuits (500m de voies par nuit)	Train meuleur SPENO
Contrôle de l'usure des rails	1 fois par an	25 nuits par an	Train SPENO et Sperry
Dépoussiérage	1 fois par mois	1 nuit par mois	Train dépoussiéreur
Bourrage	1 fois par an	5 nuits par an	Bourreuse ou manuel
Remplacement des aiguillages	-	1 week end	Trains travaux (wagons grues)
Soudures/réparations	3 fois par an	6 nuits par an	Trains travaux

Tableau 72 : Opérations de maintenance des voies (ARIES, 2020)

En considérant les 5 km de tunnel du tronçon Liedts-Bordet (jusqu'au dépôt de Haren), on estime le budget annuel de la maintenance structurelle des voies du tunnel à environ **300.000 €**.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Le tableau ci-dessous reprend les différents budgets annuels estimés pour l'entretien et la maintenance de l'infrastructure et les émissions carbone annuelles engendrées. Le facteur d'émission est de **170 kg eqCO₂/k€**. Issu de la Base Carbone de l'ADEME, il correspond au service de maintenance multi-technique des bâtiments.

Opérations		Budget estimé	Emissions [teqCO ₂]
Entretiens		854.000 €	145
Maintenance	Stations	1.050.000 €	178
	Tunnel	300.000 €	51
Total		2.204.000 €	375

Tableau 73 : Emissions – Axe Exploitation de la ligne – Entretien et maintenance - infrastructure (ARIES, 2020)

Il est important de souligner que les coûts liés à la maintenance et l'entretien des nouvelles infrastructures seront inférieurs aux coûts actuels des stations existantes, en raison des améliorations constantes et de **l'usage de nouvelles techniques toujours plus performantes**. Afin de prendre en compte ces évolutions techniques, il a été décidé de considérer une **diminution annuelle de 1%** des facteurs d'émission retenus⁵⁶ sur une durée de 50 ans (périmètre temporel de l'étude).

Le tableau ci-dessous montre l'évolution des émissions carbone d'entretien et de maintenance entre 2030 et 2080.

Année	2030	2040	2050	2060	2070	2080
Emissions annuelles d'entretien et de maintenance (teqCO ₂)	375	340	307	277	251	227

Tableau 74 : Evolution des émissions carbone d'entretien et de maintenance sur une durée de vie de 50 ans (ARIES, 2020)

B.1.2. Rames de métro

L'entretien courant (nettoyage, lavage) et la maintenance des rames de métro s'effectuent dans le dépôt via les différentes voies (remisage, essais, fosse, dépoussiérage) et zones permettant d'entreposer les rames de métro. Les émissions carbone liées à l'entretien et la maintenance de ces rames sont évaluées sur base d'une méthodologie consistant à considérer, comme données d'activité, les montants dépensés par la STIB pour l'entretien et la maintenance des rames sur une année. Ce résultat a ensuite été adapté au nombre de km du tronçon Liedts-Bordet.

Le tableau ci-dessous reprend les dépenses effectuées sur l'ensemble du réseau de métro et les dépenses supposés pour le tronçon du projet.

⁵⁶ Méthodologie de diminution annuelle utilisée dans le bilan carbone du Grand Paris.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Dépenses de la maintenance des rames	Réseau STIB	Liedts-Bordet
Nombre de km	39,9	5
Coût	3.700.000 €	463.659 €

Tableau 75 : Coût de maintenance des rames (ARIES, 2020)

Le facteur d'émission est de **170 kg eqCO₂/k€**. Issu de la Base Carbone de l'ADEME, il correspond au service de maintenance multi-technique des bâtiments.

Les émissions annuelles liés à l'entretien des rames sont estimées à **79 teqCO₂**.

B.2. Renouvellement de l'infrastructure et des équipements

En plus des petites opérations de maintenance annuelles, un renouvellement ponctuel de gros matériels, des parachèvements et des opérations lourdes de rénovation sont réalisées.

Les principales opérations et les équipements qui nécessitent un renouvellement sont les suivants :

- Des **travaux de parachèvement**⁵⁷ des nouvelles stations de métro sont prévues tous les 20 ans environ ;
- Les **rames de métro**, dont la durée de vie est de 40 ans ;
- Les **rails**, remplacés tous les 15 ans ;

B.2.1. Infrastructures

Les émissions carbone sont évaluées sur base d'une méthodologie consistant à utiliser, comme données d'activité, les coûts estimés pour les renouvellements des parachèvements des nouvelles stations de métro. D'après Bruxelles Mobilité, le coût de ce renouvellement est estimé à **3.500.000 € par station**, ce qui fait un total de **24,5 M€** pour l'ensemble des stations du Métro Nord.

Le facteur d'émission est de **170 kg eqCO₂/k€**. Issu de la Base Carbone de l'ADEME, il correspond au service de maintenance multi-technique des bâtiments.

Les émissions ponctuelles liées au renouvellement des parachèvements tous les 20 ans pour les sept stations de métro sont estimés à **4.165 teqCO₂**. En considérant un **amortissement de ces émissions sur 20 ans**, cela conduit à des émissions de **208 teqCO₂/an**.

On considère également un renouvellement des rails, remplacés environ tous les 15 ans. Les émissions carbone liées à la construction des rails du tunnel sont développées dans l'axe Construction de l'infrastructure au poste Intrants – Matériaux – Acier. Le poids total des rails est de 908 tonnes et le facteur d'émission retenu pour l'acier est de 1.804 kg eqCO₂/t. Ainsi, les **émissions de GES des rails renouvelés tous les 15 ans** à partir de 2045 sont de **1.634 teqCO₂**. En considérant un amortissement de **ces émissions sur la durée de vie des rails**, cela conduit à des émissions de **109 teqCO₂/an**.

⁵⁷ Les équipements électromécaniques, les ventilations, ne sont pas pris en compte dans le renouvellement.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

B.2.2. Rames de métro

D'après le poste Intrants – Matériaux dans la partie relative aux rames de métro, le **facteur d'émission d'une rame** est de **515,8 teqCO₂**. A cela s'ajoute le facteur d'émission lié au transport de chaque rame de métro par convoi exceptionnel qui est de **13 teqCO₂** par rame de métro. On a donc un total de **528,8 teqCO₂** pour chaque rame de métro renouvelée.

La durée de vie d'une rame de métro est d'environ 40 ans. Selon les informations de la STIB, la livraison des rames de métro pour l'ouverture de la ligne M3 est estimée vers 2027. Il faut donc prévoir un renouvellement des rames de métro pour 2067 (soit 40 ans après 2027). Les 21 rames de la ligne M3 seront donc remplacées petit à petit à partir de 2067, à hauteur de 7 rames par an (soit pendant 3 ans au total).

Il faut ensuite, encore une fois, considérer ce renouvellement de rames pour le tronçon Liedts-Bordet, calculé au prorata de la distance (longueur du tronçon par rapport à la longueur totale de la ligne). Le calcul des émissions est donc effectué pour **10 rames** sur les 21 au total. Tout en gardant l'hypothèse d'un renouvellement progressif sur 3 ans, les renouvellements sont répartis comme suit :

- 4 rames en 2067 ;
- 3 rames en 2068 ;
- 3 rames en 2069.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant à la production de matériaux nécessaires à la construction des futures rames de métro, en fonction de leur temporalité.

Matériel roulant	Année de mise en circulation	Emissions ponctuelles [teqCO ₂]	Emissions amorties [teqCO ₂ /an]	Années d'amortissement
4 rames	2067	2.115,2	52,9	2067-2107
3 rames	2068	1.586,4	39,7	2068-2108
3 rames	2069	1.586,4	39,7	2070-2110
Somme des émissions		5.288	132,2	

Tableau 76 : Emissions – Axe Exploitation de la ligne – Poste Intrants – Renouvellement des rames (ARIES, 2020)

4.1.2.3. Synthèse des résultats

Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des émissions calculées pour les différentes parties de l'axe « Exploitation de la ligne », détaillées selon les phases, postes et sources, et précisées en termes d'émissions ponctuelles et annuelles. Certaines émissions sont variables d'une année à l'autre et certaines émissions ne sont présentes que sur une période donnée et non sur l'ensemble des 50 ans du périmètre temporel. Le tableau reprend les chiffres de la première année d'exploitation. Des indications sont ensuite données en fonction des modifications au cours du temps. Ces précisions sont annotées dans le tableau.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Phases	Partie	Postes - sources	Emissions ponctuelles [teqCO ₂]		Emissions annuelles ou amorties [teqCO ₂ /an]
Fonctionnement	Stations et dépôt	Energie indirecte	-	-	1.961
		Energie directe			200
		Emissions fugitives	-	-	108
	Sous-total Stations				2.269
	Rames de métro	Energie (traction)	-	-	1.802
		Intrants - matériaux	40 ans	5.158	*129
		Fret entrant	40 ans	130	*3
		Amortissement	32 ans		**142
	Sous-total Rames de métro				**2.076
	Activité de gestion	Déplacements domicile - travail	-	-	23
		Intrants - Achats	-	-	247
		Fret entrant	-	-	12
		Gestion des déchets (dont fret sortant)	-	-	44
	Sous-total Activité de gestion				326
	Sous-total Fonctionnement				
Entretien/ maintenance	Travaux quotidiens	Coûts infrastructures	-	-	***375
		Coûts rames	-	-	79
	Sous-total Entretien/maintenance				***454
	Renouvellement	Infrastructures	20 ans	****4.165	****208
		Rails	15 ans	*****1.638	*****109
		Rames de métro	40 ans	*****5.288	*****132
Sous-total renouvellement				*****449	

* Emissions amorties jusqu'en 2070 (40 ans à partir de 2030)

** Emissions amorties jusqu'en 2062 (32 ans à partir de 2030)

*** Emissions en 2030 puis diminution annuelle de 1%

**** Emissions induites à partir de 2050 (20 ans après 2030)

***** Emissions induites à partir de 2045 (15 ans après 2030)

***** Emissions induites à partir de 2067

Tableau 77 : Synthèse des résultats – Axe Exploitation de la ligne (ARIES, 2020)

Contrairement à l'axe « Construction de l'infrastructure », la méthodologie et les hypothèses posées n'ont pas été développées ici par poste mais par « activité » constituant l'exploitation de la ligne de métro (son fonctionnement quotidien et sa maintenance). Afin d'avoir cette fois-ci une vision des postes les plus émetteurs et des postes peu émetteurs, le tableau ci-dessous reprend les résultats par poste, détaillés selon les différentes sources d'émissions, avec un indicateur de temporalité de ces émissions.

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Postes	Sources	Indications de temporalité des émissions	Emissions annuelles ou amorties [teqCO ₂]
Energie (sources fixes de combustion)	Consommation de gaz du dépôt	Annuelles	200
Energie (consommations d'électricité)	Consommations stations et dépôt	Annuelles	1.961
	Energie de traction (rames)	Annuelles	1.802
Sous-total Energie			3.963
Emissions fugitives	Fluides frigorigènes	Annuelles	108
Intrants	Rames	Amorties	129
	Rails	Amorties sur 15 ans (à partir de 2045)	109
	Achats de biens et de services	Annuelles	247
	Coût entretien/maintenance rames	Annuelles	79
	Coût entretien/maintenance infrastructures	Annuelles	*De 375 à 227
	Coûts renouvellement infrastructures	Amorties sur 20 ans (à partir de 2050)	208
Sous-total Intrants			**De 781 à 1.079
Amortissement	Rames	Amorties sur 32 ans	142
Fret entrant	Rames	Amorties sur 40 ans	3
	Achats de biens et de services	Annuelles	12
Sous-total Fret entrant			15
Gestion des déchets	Stations	Annuelles	44
Déplacements	Domicile-travail	Annuelles	23

* Diminution annuelle de 1%

** Valeur minimale et maximale, en fonction des années d'amortissement

Tableau 78 : Synthèse des résultats par postes– Axe Exploitation de la ligne (ARIES, 2020)

Les indications de temporalité permettent de nuancer l'interprétation des résultats de ce tableau au niveau de leur importance d'émissions puisque certaines sources sont annuelles et d'autres ponctuelles, voire uniques. L'objectif de cette synthèse par poste est de mettre en évidence les postes les plus impactants en termes d'émissions carbone.

Les graphes ci-dessous permettent de représenter l'ensemble des émissions sur une temporalité définie sur 50 ans à partir de 2030 (jusqu'en 2080). Le premier graphe présente les « incidences réelles », afin d'illustrer les émissions au moment où elles ont lieu. Cela permet d'obtenir une vision plus réelle de l'impact environnemental de l'exploitation et du renouvellement de ses équipements. Le second graphe présente les « incidences amorties », c'est-à-dire les émissions avec un amortissement des émissions ponctuelles sur plusieurs années (souvent définies en fonction d'une durée de vie). Cela permet d'illustrer les émissions globales engendrés par le projet et d'obtenir une moyenne annuelle (voir section 2.4.4).

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

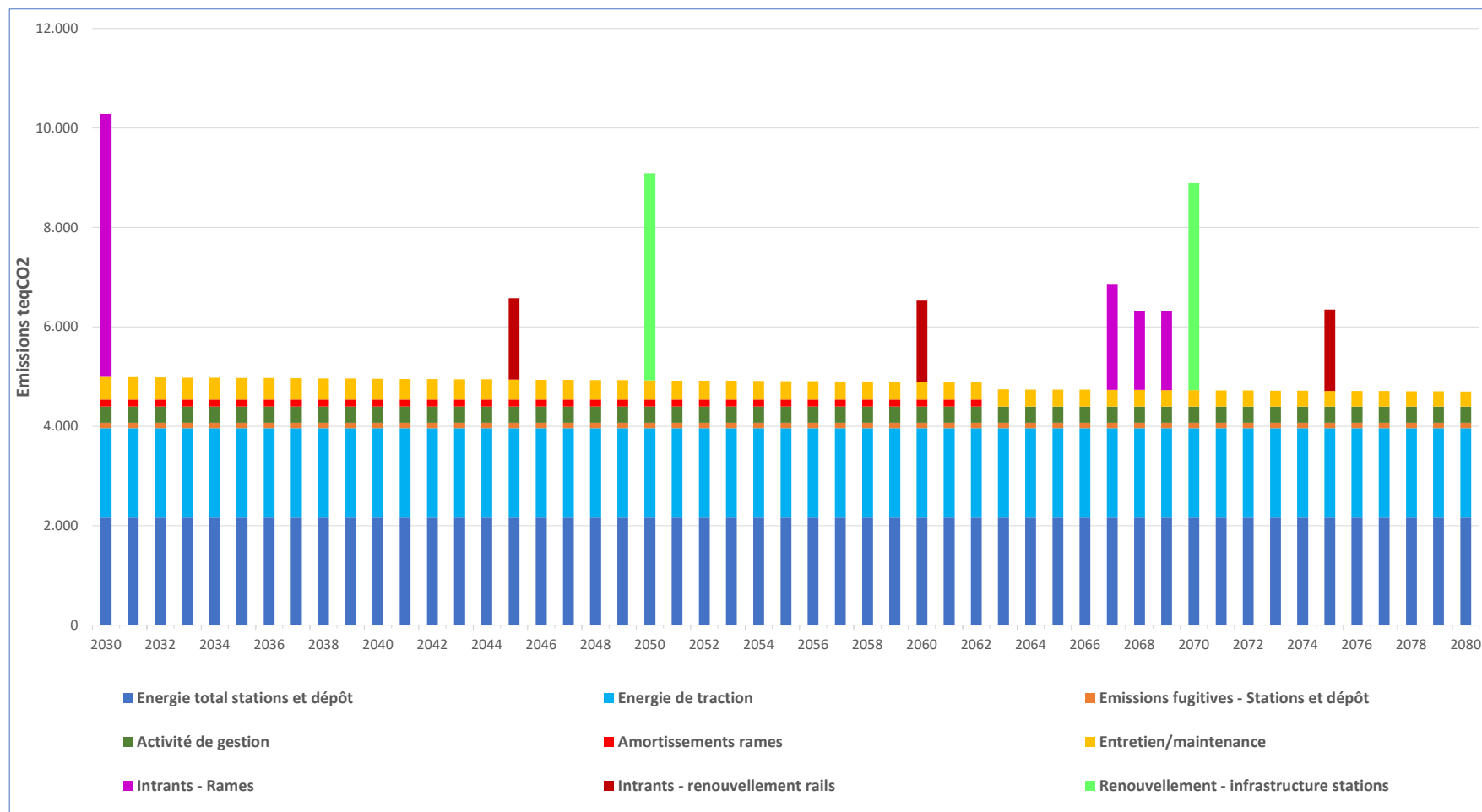


Figure 14 : Synthèse des résultats – Axe Exploitation de la ligne – « Incidences réelles » (ARIES, 2020)

4. Evaluation des émissions du projet et des alternatives

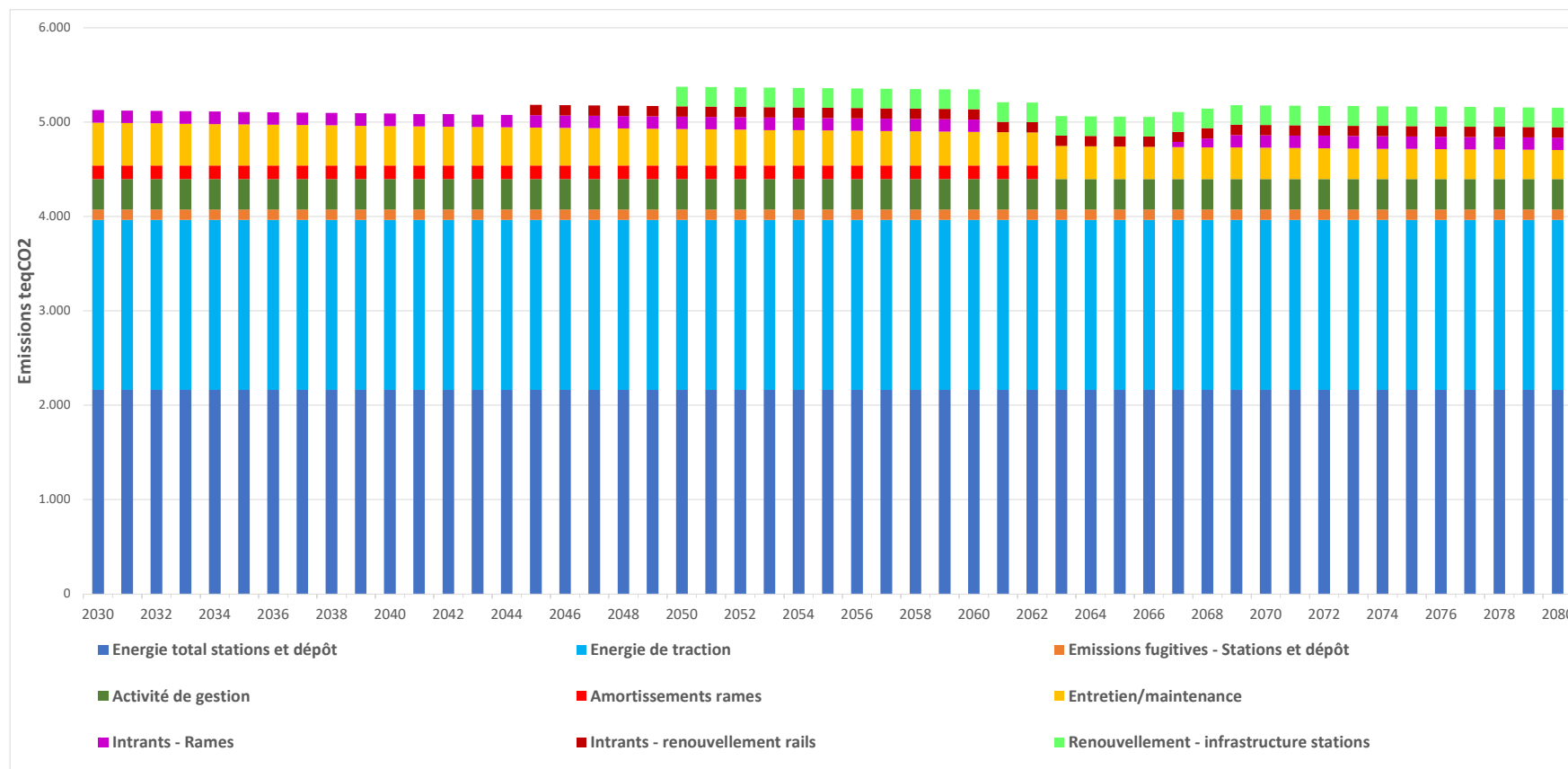


Figure 15 : Synthèse des résultats – Axe Exploitation de la ligne – « Incidences amorties » (ARIES, 2020)

A la lecture des tableaux et des deux graphes « Incidences réelles » et « Incidences amorties », plusieurs enseignements peuvent être tirés :

- Les émissions de CO₂ estimées pour l'axe « Exploitation de la ligne » sont de l'ordre de **5.000 tonnes par an** avec des pics d'émissions pouvant atteindre jusqu'à 10.000 tonnes les années d'achats et de renouvellement du matériel constituant l'infrastructure (**les rames de métro, rails et parachèvements**). En amortissant les émissions ponctuelles de renouvellement des équipements sur leur durée de vie, les émissions moyennes annuelles totales pour l'axe sont d'environ 5.300 teqCO₂.
- **L'énergie constitue de loin le poste prépondérant.** Il représente en effet une grande majorité des émissions de l'axe. Ce poste comprend les consommations d'énergie des stations et du dépôt (chauffage, éclairage, ventilation, refroidissement et équipements) et l'énergie de traction permettant aux rames de métro d'avancer. Ces émissions sont estimées à environ 4.000 teqCO₂ par an.
- Le poste **Intrants est le deuxième poste** en termes d'importance des émissions carbone. Ce poste comprend les émissions liées à la fabrication des matériaux des équipements renouvelés, les émissions liées aux achats de produits, de biens et de services, et les émissions liées aux budgets estimés pour l'entretien et la maintenance de l'infrastructure. L'ensemble de ces émissions annuelles et amorties s'élève à environ **1.000 teqCO₂**.
- Les **autres postes d'émissions** peuvent être considérés comme **négligeables** au regard de l'importance des deux premiers et de leur faible impact sur l'ensemble de l'infrastructure de la ligne de métro (en particulier les activités de gestion avec les déplacements et la gestion des déchets). L'ensemble de ces émissions représente **moins de 10% des émissions globales** de l'axe Exploitation de la ligne.
- Le **graphe des « incidences réelles »** montre assez clairement les catégories d'émissions qui ne sont pas renouvelées tous les ans et qu'on retrouve ponctuellement en 50 ans, représentant des pics d'émissions :
 - Les émissions liées à l'intrant des rames de métro la première année et son renouvellement 40 ans plus tard autour de 2070 ;
 - Les émissions liées au renouvellement des rails tous les 15 ans ;
 - Les émissions liées au renouvellement des parachèvements et des éléments des infrastructures des stations tous les 20 ans.
- Le **graphe des « incidences amorties »** nous montre que les émissions ponctuelles des intrants liés au renouvellement des rames et des rails présentent un impact finalement relativement faible par rapport à l'ensemble des émissions de CO₂ de l'axe Exploitation de la ligne, cela étant dû en partie au poste énergie.
- Entre 2030 et 2080, les émissions globales liées à **l'ensemble du fonctionnement de l'infrastructure** (axe Exploitation de la ligne) de métro génèrent au total environ **267.121 teqCO₂**.
 - Les émissions liées à l'exploitation quotidienne de la ligne de métro, soit **les consommations d'énergie des stations et du dépôt, les consommations d'énergie de traction, les émissions liées au matériel roulant et aux activités de gestion** génèrent au total environ **229.837 teqCO₂**, soit environ **86%** des émissions totales de l'axe Exploitation de la ligne.

- Les émissions liées aux **travaux d'entretien et de maintenance, y compris le renouvellement des infrastructures et des équipements** pendant les 50 ans sont estimées à environ **37.284 teqCO₂**, soit **14%** des émissions totales de l'axe Exploitation de la ligne.

4.2. Analyse des alternatives

4.2.1. Alternative bitube

4.2.1.1. Différences notables avec le projet de base monotube et hypothèses générales

Les principales différences présentant un impact sur le bilan carbone sont reprises dans le tableau ci-dessous, selon les axes d'analyse et les postes.

Différence monotube-bitube	Axe d'analyse	Postes impactés
Présence de deux tunnels de diamètres plus réduits au lieu d'un seul de plus grand diamètre	Construction des infrastructures	<ul style="list-style-type: none"> • Energie (Sources mobiles de combustion), • Energie (Consommations d'électricité) • Intrants, • Amortissements, • Gestion des déchets, • Fret entrant, • Fret sortant
Modification de la géométrie des stations, notamment en termes de la profondeur du niveau quais et de la largeur de ce dernier	Construction des infrastructures	<ul style="list-style-type: none"> • Energie (Sources mobiles de combustion), • Energie (Consommations d'électricité) • Intrants, • Gestion des déchets, • Fret entrant, • Fret sortant, • Déplacements
	Exploitation de la ligne	<ul style="list-style-type: none"> • Consommations d'énergie des stations

Ne sont repris ici que les postes considérés dans le bilan carbone du projet de base monotube.

Présence d'ouvrages particuliers à la solution bitube : <ul style="list-style-type: none"> • Ouvrages de bifurcation*, permettant aux rames de passer d'une voie à l'autre, • Ouvrages de raccordement entre Liedts et la Gare du Nord (« raccordement P5), • Rameaux de connexion** permettant aux piétons de passer d'un tunnel à l'autre 	Construction des infrastructures	<ul style="list-style-type: none"> • Energie (Sources mobiles de combustion), • Intrants, • Gestion des déchets, • Fret entrant, • Fret sortant, • Déplacements
Modification de l'organisation des stations (quai central plutôt que quais latéraux) : modification du nombre d'escalators et d'ascenseurs nécessaires	Construction des infrastructures	<ul style="list-style-type: none"> • Intrants
	Exploitation de la ligne	<ul style="list-style-type: none"> • Consommations d'énergie des stations

* Également appelés ouvrages de connexion

** Également appelés « cross-passages »

Tableau 79 : Différences entre solutions monotube et bitube présentant des impacts sur le bilan carbone (ARIES, 2020)

Dans le cas de l'alternative bitube, les ouvrages supplémentaires nécessaires sont repris dans un **nouveau sous-projet**, appelé dans la suite du texte « **Ouvrages bitube** », à côté des deux tunnels, des stations, de l'ensemble puits P0 et rampe d'accès et du dépôt. Les dimensions de ces différents ouvrages sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Ouvrage bitube	Caractéristiques
Ouvrage de bifurcation Verboekhoven	Longueur : 125 m
Ouvrage de bifurcation Tilleul	Longueur : 150 m
Ouvrages de bifurcation Bordet (2 ouvrages)	Longueur totale : 285 m
Ouvrage de raccordement P5	Longueur : 185 m
Rameaux de connexion	Nombre : 6 Diamètre moyen : 3,94 m Longueur : 20 m

Tableau 80 : Caractéristiques des ouvrages spécifiques à l'alternative bitube (ARIES, 2020)

Ces ouvrages sont réalisés après le passage des deux tunneliers qui réalisent d'abord l'entièreté des tunnels. La longueur de ces ouvrages n'est donc pas déduite de la longueur des tunnels qui reste égale à 3773 m comme dans le cas du projet de base monotube.

Les émissions liées aux ouvrages souterrains (hors stations) doivent cependant être vues comme étant la somme des émissions liées aux deux tunnels et des émissions correspondant aux ouvrages de bifurcation et de raccordement. Les tableaux repris plus bas reprennent les valeurs de manière séparée.

Par ailleurs, entre le projet de base monotube et l'alternative, le dépôt est considéré identique. Bien que le puits P0 et la rampe d'accès soient modifiés, faute de données, ces éléments sont également considérés inchangés, par hypothèse.

Enfin, sauf mention contraire, l'ensemble des facteurs d'émission reste identique par rapport à ceux utilisés dans les calculs réalisés précédemment. En effet, dans la majorité des cas, seules les données d'activité seront impactées par les modifications précitées.

4.2.1.2. Construction de l'infrastructure

A. Energie (Sources mobiles de combustion)

A.1. Consommations d'énergie pour l'excavation des déblais

La méthodologie et les hypothèses appliquées plus haut le sont également dans le cas de l'alternative bitube. Seules les quantités de déblais changent.

Comme explicité dans le cas du projet de base monotube, les émissions engendrées par l'excavation des déblais ne concernent ici que les **stations**, le **puits P0**, la **rampe d'accès**, le **dépôt** et les **ouvrages spécifiques à l'alternative bitube**, sous-projets pour lesquels il est fait appel à des machines excavatrices fonctionnant au fuel. Les consommations relatives à l'excavation des terres des tunnels sont quant à elles comptabilisées au niveau des émissions indirectes dues aux consommations d'électricité du tunnelier (voir poste *Energie (Consommations d'électricité)*).

Les données d'activité correspondent aux consommations de fuel nécessaire et sont évaluées à partir du volume de terres excavées et d'une consommation spécifique de 1 l_{fuel}/m^3 .

Le tableau ci-dessous reprend les volumes excavés et les consommations de fuel correspondantes.

Sous-projet	Volume de déblais [m ³]		Consommations [l_{fuel}]	
	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube
Stations	757.690	816.541	757.590	816.541
Puits P0 et rampe d'accès	65.330	65.330	65.330	65.330
Dépôt	317.180	317.180	317.180	317.180
Ouvrages bitube	0	76.296	0	76.296
Total	1.140.200	1.275.347	1.140.200	1.275.347

Tableau 81 : Volume de déblais et consommations d'énergie nécessaire à leur excavation – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

Pour rappel, le facteur d'émission utilisé est fixé à 3,17 kg eqCO₂/l (gazole non routier pour usage par des sources mobiles).

Le tableau ci-dessous reprend les émissions dues à l'excavation des terres. Les émissions sont proportionnelles aux volumes de déblais excavés.

4 Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]		Variation bitube/monotube
	Monotube	Bitube	
Stations	2.402	2.589	+8%
Puits P0 et rampe d'accès	207	207	0%
Dépôt	1.005	1.005	0%
Ouvrages bitube	0	242	-
Total	3.614	4.043	+12%

Tableau 82 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Energie (Sources mobiles de combustion) – Excavation des déblais – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

Les déblais étant plus importants dans le cas de l'alternative bitube en raison des plus grandes excavations pour les stations et les tunnels, et des excavations nécessaires à la construction des ouvrages spécifiques à l'alternative, les émissions de gaz à effet de serre relatives à celles-ci sont également plus importantes.

A.2. Consommation des engins de chantier pour la mise en œuvre des matériaux

La méthodologie et les hypothèses appliquées plus haut le sont également dans le cas de l'alternative bitube. Seules les quantités de déblais changent.

Les données d'activité, correspondant aux consommations d'énergie des tunneliers, sont calculées sur base des volumes de béton et d'acier mis en œuvre et de consommations spécifiques : respectivement 70 kWh/m³ et 80 kWh/m³ pour le béton et l'acier.

Les émissions engendrées par l'excavation des déblais ne concernent ici que les stations, le puits P0, la rampe d'accès et les ouvrages spécifiques à l'alternative bitube. Le tunnelier étant alimenté en électricité, les consommations de celui-ci sont reprises dans le poste Energie (Consommations d'électricité) (voir poste correspondant).

Le tableau ci-dessous reprend les volumes et consommations des engins correspondantes.

4 Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Sous-projet	Matériau	Volume [m³]		Consommation engins chantier [kWh]	
		Monotube	Bitube	Monotube	Bitube
Stations	Béton	293.192	309.504	20.523.437	21.665.295
	Acier	4.772	4.772	381.744	381.744
Puits P0 et rampe d'accès	Béton	24.214	24.214	1.694.974	1.694.974
	Acier	360	360	28.830	28.830
Dépôt	Béton	30.275	30.275	2.119.250	2.119.250
	Acier	632	632	50.563	50.563
Ouvrages bitube	Béton	0	51.091	0	3.576.367
	Acier	0	753	0	60.221

Tableau 83 : Consommation d'énergie des engins de chantier – Stations, puits P0 et rampe d'accès, dépôt et ouvrages bitube (ARIES, 2020)

Pour rappel, le facteur d'émission utilisé est fixé à 0,323 kg eqCO₂/kWh PCI (gazole non routier pour usage par des sources mobiles).

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant aux consommations d'énergie des engins de chantier.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]		Variation bitube/monotube
	Monotube	Bitube	
Stations	6.752	7.121	+5%
Puits P0 et rampe d'accès	557	557	0%
Dépôt	701	701	0%
Ouvrages bitube	0	1.175	-
Total	8.010	9.553	+19%

Tableau 84 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Energie (Sources mobiles de combustion) – Consommation d'énergie des engins de chantier – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

Les volumes de matériaux à mettre en œuvre étant plus importants dans le cas de l'alternative bitube pour les stations et les tunnels, ainsi qu'en raison de la construction des ouvrages spécifiques à l'alternative, les émissions de gaz à effet de serre relatives à celle-ci sont également plus importantes.

A.3. Consommations d'énergie liées à la congélation

Le tableau ci-dessous reprend les données d'entrée permettant les consommations d'électricité liées à la congélation, qui correspondent aux données d'activité.

Les volumes de sol à congeler correspondent aux 4 stations pour lesquelles il est fait appel à la technique de congélation. Les explications relatives aux calculs sont développées au niveau du projet de base monotube (voir section 4.1.1.2.A.3.4). Par hypothèse, les durées et les

consommations d'électricité unitaires des deux phases sont identiques à celles du projet de base et sont reprises de la note d'évaluation préalable de BMN de 2017.

Station	Volume de sol à congeler [m³]	Phase de mise en congélation			Phase de maintien de la congélation			Total [kWh]
		Durée [mois]	Cons. unitaire [kWh/m³]	Cons. Totale [kWh]	Durée [mois]	Cons. unitaire [kWh/m³]	Cons. Totale [kWh]	
Liedts	10.684	3	110	1.175.240	17	44	2.663.877	3.839.117
Colignon	12.250	3	110	1.347.500	13	44	2.335.667	3.683.167
Verboekhoven	12.116	3	110	1.332.760	16	44	2.843.221	4.175.981
Paix	15.259	3	110	1.678.490	16	44	3.580.779	5.259.269
Total	50.309							16.957.534

Tableau 85 : Consommations d'électricité liées à la congélation – Stations – Alternative bitube (ARIES, 2021, d'après BMN)

Il est également fait appel à cette technique pour la réalisation des ouvrages bitube (les 4 ouvrages de bifurcation et l'ouvrage de raccordement), pour lesquels les données totales sont reprises dans le tableau suivant.

Volume total de sol à congeler [m³]	Phase de mise en congélation			Phase de maintien de la congélation			Total [kWh]
	Durée [mois]	Cons. unitaire [kWh/m³]	Cons. Totale [kWh]	Durée [mois]	Cons. unitaire [kWh/m³]	Cons. Totale [kWh]	
31.359	3	110	3.449.490	16	44	7.358.912	10.808.402

Tableau 86 : Consommations d'électricité liées à la congélation – Station (ARIES, 2021, d'après BMN)

Pour rappel, le facteur d'émission utilisé est fixé à 890 g eqCO₂/kWh.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant aux consommations d'électricité relatives à la congélation.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]		Variation bitube/monotube
	Monotube	Bitube	
Stations	9.956	15.092	+52%
Ouvrages bitube	-	9.619	-
Total	9.956	24.712	+148%

Tableau 87 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Energie (Consommations d'électricité) – Congélation – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

La forte augmentation des émissions pour l'alternative bitube est liée à l'augmentation des volumes de terres à congeler pour les stations plus importants et par des volumes de terres à congeler supplémentaires liées à la réalisation des ouvrages de bifurcation.

B. Energie (Consommations d'électricité)

B.1. Consommations d'énergie du tunnelier

La méthodologie et les hypothèses appliquées plus haut le sont également dans le cas de l'alternative bitube. Seules les quantités de déblais changent.

La donnée d'activité, correspondant aux consommations d'énergie des tunneliers, est calculée sur base de volume de terres excavées et d'une consommation spécifique de 20 kWh/m³.

Le volume total de déblais des deux tunnels étant de 307.245 m³, les consommations s'élèvent à 6.144.893 kWh.

Pour rappel, le facteur d'émission utilisé est fixé à 230 g eqCO₂/kWh.

Les émissions correspondantes sont évaluées à **1.413 teqCO₂**, contre 1.363 teqCO₂ dans le cas du projet de base monotube, soit une augmentation de 4%. Cette différence s'explique simplement par les volumes de déblais en présence (296.339 m³ dans le cas du projet de base).

B.2. Consommations d'énergie des bases-vies

Les données d'activité correspondent aux consommations d'électricité et sont calculées sur base d'hypothèses identiques à celles du projet de base monotube, à l'exception du planning qui est quant à lui adapté. Les durées de chantier sont notamment allongées en raison de la construction des ouvrages particuliers à l'alternative bitube, pour lesquels la durée estimée des chantiers est d'environ 26 mois.

Le tableau ci-après reprend les données considérées pour chaque base-vie.

4 Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Base-vie		Superficie [m ²]	Durée du chantier [mois]	Facteur d'utilisation [-]	Nombre d'heures d'utilisation [h]	Consommations d'électricité totale [kWh]
Site Haren	Fonctionnement continu (creusement des tunnels)	*700	31	0,86	19.397	387.500
	Fonctionnement non continu (puits P0, rampe d'accès et dépôt)		***36	0,48	12.514	250.000
	Logements	**1000	31	0,86	****12.843	366.520
Liedts		50	121	0,74	65.196	93.031
Colignon		50	110	0,74	59.269	84.573
Verboekhoven		50	116	0,74	62.502	89.187
Riga		50	101	0,74	54.420	77.654
Tilleul		50	96	0,74	51.726	73.810
Paix		50	113	0,74	60.885	86.880
Bordet		50	109	0,74	58.730	83.805
Total		2050	-	-	-	1.592.958

* Dont 500 m² de bureaux et 200 m² réservés au vestiaire, au réfectoire, ...

** D'après études BMN

*** La durée totale des chantiers sur le site de Haren (tunnels, puits P0, rampe d'accès et dépôt) a été estimée à environ 67 mois, pendant lesquels le chantier pour les tunnels fonctionnera en continu durant 28 mois, le solde correspondant aux autres travaux.

**** Par hypothèse, les logements sont considérés chauffés 24 heures sur 24 en période de chauffe, étant donné que le creusement des tunnels est réalisé de manière continue. Le nombre d'heures total (19.397) est pondéré par un facteur 0,66 afin de tenir compte de la saison de chauffe (considérée égale à 5.800 heures sur une année).

Tableau 88 : Consommations d'énergie liées à l'utilisation des bases-vies (ARIES, 2020)

Pour rappel, le facteur d'émission utilisé est fixé à 230 g eqCO₂/kWh.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant aux consommations d'électricité relatives à l'utilisation des bases-vies.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]		Variation bitube/monotube
	Monotube	Bitube	
Site de Haren	219	223	+2%
Stations	100	135	+35%
Total	318	358	+13%

Tableau 89 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Energie (Consommations d'électricité) – Bases-vies – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

L'augmentation des émissions est principale due à l'allongement de la durée des travaux dans le cas de l'alternative bitube.

C. Emissions fugitives

Comme pour le projet de base monotube, ce poste n'est pas pris en compte dans le cas de l'alternative bitube.

D. Intrants

D.1. Matériaux

D.1.1. Béton

Au niveau des données d'activité, les quantités de béton nécessaires estimées sont détaillées ci-dessous. En ce qui concerne les **deux tunnels**, le tableau suivant reprend les principales données géométriques.

Grandeur	Unité	Monotube	Bitube
Longueur (hors stations)	m	3.773	3.773
Longueur (avec stations et ouvrages bitube inclus)	m	4.544	4.544
Diamètre intérieur du tunnel/des tunnels	m	8,9	6,2
Diamètre extérieur des anneaux de voussoirs	m	9,7	6,9
Diamètre extérieur total (avec couche de mortier de bourrage)	m	10	7,2

Tableau 90 : Données géométriques du tunnel/des tunnels – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020, d'après BMN, 2018 à 2020)

Ces dimensions supposent donc une épaisseur de voussoirs de 35 cm et une épaisseur de couche de mortier de bourrage moyenne de 15 cm.

Voir Livre II Tunnel, partie 2, point 2.2.2. Coupe-type du tunnel

Les autres principales données et hypothèses relatives aux tunnels, ainsi que les quantités de béton qui en sont déduites, sont quant à elle reprises ci-dessous.

4 Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Composante	Grandeur	Unité	Quantité	
			Monotube	Bitube
Voussoirs	Volume de béton	m ³	44.095	54.349
Radier	Volume de béton**,**	m ³	35.000	33.970
Traverses	Interdistance**	m	0,6	0,6
	Masse de béton par traverse**	kg	245	245
	Nombre de traverses total (2 voies)	pc	15.147	15.147
	Volume de béton	m ³	1.613	1.613
Couche de calage	Volume linéique (pour un seul tunnel)**,**	m ³ /m	1,5	0,73
	Volume de béton	m ³	6.816	6.616
Fond des tunnels	Volume de béton**,**	m ³	3.600	3.494
Total	Volume total de béton	m ³	91.125	100.042

* D'après études BMN

** D'après informations recueillies auprès de BMN.

*** Par hypothèse, en ne considérant qu'un seul tunnel en version bitube, la quantité de béton pour l'alternative bitube est adapté selon le carré du rapport entre le diamètre intérieur des voussoirs en solution bitube et le diamètre intérieur des voussoirs en solution monotube. Ce rapport est de 0,485 ($= (6,2/8,9)^2$). Les quantités totales de béton concernées sont donc multipliées par 0,97 pour les deux tunnels de l'alternative.

Tableau 91 : Principales données et hypothèses relatives aux tunnel(s) – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020, d'après BMN, 2018 à 2020)

Par hypothèse, les aiguillages nécessaires ne sont pas comptabilisés : les quantités de béton considérées pour les traverses sont donc identiques entre le projet et l'alternative.

Pour les **stations**, le niveau de détail de l'alternative bitube étant moindre que pour celui du projet, par hypothèse, un seul type de béton « moyen » est ici considéré. En outre, en ce qui concerne les quantités estimées :

- Les données pour les stations Colignon, Verboekhoven et Riga sont reprises du métré bitube réalisé par BMN ;
- Les données pour les autres stations sont déterminées à partir des quantités totales relatives au projet de base monotube selon les hypothèses suivantes :
 - Stations Liedts, Tilleul et Bordet : quantités identiques à celles du projet de base, le gain engendré par la moindre profondeur de ces stations dans le cas de l'alternative bitube étant supposé être compensé par l'augmentation de la largeur du niveau des quais ou des excroissances nécessaires à l'implantation de locaux techniques ;
 - Station Paix : la quantité de béton estimée pour le projet de base est augmentée de 15%, à l'instar de la station Colignon qui connaît une évolution similaire.

Pour rappel, par hypothèse, le dépôt et l'ensemble puits P0 et rampe d'accès sont considérés identiques entre le projet de base monotube et l'alternative bitube.

Les quantités de béton considérées pour les ouvrages spécifiques à l'alternative bitube sont reprises dans le tableau ci-dessous. A l'exception des 6 rameaux de connexion, les quantités ont été estimées par BMN.

Ouvrage bitube	Quantité [m³]
Ouvrage de bifurcation Verboekhoven	8.503
Ouvrage de bifurcation Tilleul	10.985
Ouvrages de bifurcation Bordet (2 ouvrages)	18.221
Ouvrage de raccordement P5	12.839
Rameaux de connexion	543
Total	51.091

Tableau 92 : Quantités de béton mises en œuvre dans les ouvrages bitube (ARIES, 2020, d'après BMN, 2018)

Le tableau ci-dessous reprend les principales quantités de béton évaluées pour le projet de base monotube et l'alternative bitube. La valeur totale n'est donnée qu'à titre indicatif, les facteurs d'émission des différents bétons considérés variant d'un sous-projet à l'autre, et par conséquent les émissions correspondantes également.

Sous-projet		Quantité [m³]	
		Monotube	Bitube
Tunnels	Béton	91.125	100.042
	Mortier de bourrage	17.477	25.070
Stations		293.192	309.504
Puits P0 et rampe d'accès		24.214	24.214
Dépôt		30.275	30.275
Ouvrages bitube		0	51.091
Total		456.283	540.196

Tableau 93 : Vue générale des quantités de béton mises en œuvre dans le projet Métro Nord – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

Comme mentionné précédemment, le niveau de détails de l'alternative n'étant pas suffisant pour pouvoir déterminer les émissions liées aux différents types de béton à l'instar du projet de base monotube, un facteur d'émission moyen a été considéré pour le calcul des émissions liées aux stations. Ce facteur d'émission moyen est, par hypothèse, pris égal à la moyenne des facteurs d'émission des différents bétons considérés dans le projet de base, pondérée par les volumes respectifs de ces différents bétons mis en œuvre pour l'ensemble des 7 stations. La valeur considérée est dès lors de 245 kg eqCO₂/m³. Les facteurs d'émission pour les autres éléments et sous-projets restent quant à eux identiques au projet de base monotube.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant à la production de béton nécessaire au projet.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]		Variation bitube/monotube
	Monotube	Bitube	
Tunnels	24.248	27.108	+12%
Tunnels (mortier de bourrage)	6.554	9.401	+43%
Stations	72.044	77.067	+7%
Puits P0 et rampe d'accès	6.012	6.012	0%
Dépôt	7.338	7.338	0%
Ouvrages bitube	-	15.736	-
Total	117.221	142.662	+22%

Tableau 94 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Intrants – Béton – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans le cas de l'alternative bitube s'explique par de plus grandes quantités de béton nécessaires pour les tunnels, les stations et la nécessité d'ouvrages spécifiques supplémentaires (principalement les ouvrages de bifurcation).

D.1.2. Acier

En termes de données d'activité, le tableau ci-dessous reprend les principales quantités d'acier évaluées pour le projet Métro Nord.

Sous-projet	Quantité [t]	
	Monotube	Bitube
Tunnels	5.461	6.435
Stations	37.220	37.220
Puits P0 et rampe d'accès	2.811	2.811
Dépôt	5.029	5.029
Ouvrages bitube	-	5.872
Total	50.521	57.367

Tableau 95 : Vue générale des quantités d'acier mises en œuvre dans le projet Métro Nord – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

Le tableau ci-dessous reprend les principales données et hypothèses considérées, ainsi que les quantités d'acier pour les **tunnels**. La longueur de la ligne de métro est, pour rappel, de 4,544 km (voie double). La quantité d'acier pour les rails de roulement et le 3^e rail sont considérés identiques dans l'alternative bitube et dans le projet de base monotube. Comme mentionné ci-

dessus, par hypothèse, les voies des aiguillages nécessaires ne sont pas comptabilisées. Seule la quantité d'acier pour les voussoirs est modifiée. De même, la longueur totale des voies du dépôt est de 7,3 km (voies simples), tandis que la longueur des voies de la rampe d'accès est de 0,34 km (voie simple).

Composante	Masse linéique [kg/m]	Quantité d'acier [t]			
		Tunnel(s)		Rampe d'accès	Dépôt
		Monotube	Bitube	Monotube/bitube	Monotube/bitube
Rails de roulement	*49,97	908	908	68	730
3 ^e rail	**40	364	364	27	292
Armatures voussoirs	*95	4189	5.163	-	-

* D'après informations recueillies auprès de BMN

** D'après informations recueillies auprès de la STIB

Tableau 96 : Principales données et hypothèses relatives aux tunnel(s) (ARIES, 2020, d'après BMN, 2018 à 2020)

En ce qui concerne les **stations**, les quantités d'acier sont considérées identiques entre le projet de base monotube et l'alternative. Les quantités calculées dans le métré réalisé par BMN pour les 3 stations Colignon, Verboekhoven et Riga n'ont en effet montré que de faibles variations en ce qui concerne ce matériau.

Les quantités d'acier sont également considérées inchangées pour l'ensemble **puits P0 et rampe d'accès**, de même que pour le **dépôt**.

Enfin, les quantités d'acier pour les **ouvrages bitube** sont reprises du métré de BMN pour les ouvrages de bifurcation et l'ouvrage de raccordement P5, tandis que celles correspondant aux armatures des rameaux de connexion ont été déterminées en considérant, par hypothèse, une masse d'acier de 95 kg/m³ de béton mis en œuvre.

Pour rappel, le facteur d'émission considéré est fixé à 1.804 kg eqCO₂/t.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant à la production de béton nécessaire au projet.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]		Variation bitube/monotube
	Monotube	Bitube	
Tunnel(s)	9.849	11.606	+18%
Stations	67.132	67.132	0%
Puits P0 et rampe d'accès	5.241	5.241	0%
Dépôt	10.912	10.912	0%
Ouvrages bitube	-	10.590	-
Total	93.135	105.482	+13%

Tableau 97 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Intrants – Acier – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans le cas de l'alternative bitube s'explique par de plus grandes quantités d'acier nécessaires pour les tunnels, les stations et la nécessité d'ouvrages spécifiques supplémentaires.

D.1.3. Verre

Par hypothèse, les quantités de verre sont considérées identiques pour l'alternative bitube par rapport au projet de base monotube. Le facteur d'émission étant supposé inchangé, les émissions le sont également. Celles-ci sont rappelées dans le tableau ci-dessous.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]
Stations	852
Dépôt	431
Total	1.283

Tableau 98 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Intrants – Verre (ARIES, 2020)

D.2. Equipements

Les modifications de géométrie et d'organisation des stations, notamment par la mise en place d'un quai central plutôt que de quais latéraux engendrent des modifications dans le nombre d'**escalators** et d'**ascenseurs** dans les stations, repris dans le tableau ci-dessous.

	Monotube	Bitube
Ascenseurs	27	26
Escalators	92	76

Tableau 99 : Nombre d'ascenseurs et d'escalators – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

En l'absence de données détaillées, ces équipements sont considérés comme étant totalement constitués d'acier. Le facteur d'émission considéré est fixé à 1.804 kg eqCO₂/t.

Les émissions évaluées pour la partie équipements du poste Intrants sont reprises dans le tableau ci-dessous par sous-projet et équipement.

Sous-projet	Equipements	Emissions [teqCO ₂]		Variation bitube/monotube
		Monotube	Bitube	
Stations	Escalators	1.934	1.629	-16%
	Ascenseurs	49	47	-4%
Total		1.982	1.676	-15%

Tableau 100 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Intrants – Equipements – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

Les émissions sont plus faibles dans le cas de l'alternative, étant donné le moindre nombre d'équipements nécessaires qu'engendrent les modifications de l'organisation des stations.

E. Amortissements

Au niveau du poste Amortissements, seuls les **tunneliers** sont considérés, pour les raisons évoquées plus haut.

La donnée d'activité correspond à leur masse totale. Par hypothèse, dans le cas des tunneliers bitube, la masse unitaire du tunnelier monotube (1.500 tonnes) est adaptée selon le carré du rapport entre le diamètre intérieur des voussoirs en solution bitube et le diamètre intérieur des voussoirs en solution monotube. Ce rapport est de 0,485 $(= (6,2/8,9)^2)$. La masse d'un tunnelier est donc considérée égale à 723 tonnes. Les deux tunneliers présentent donc une masse totale de 1.456 tonnes.

Le facteur d'utilisation restant identique, les émissions liées à la production du tunnelier sont donc estimées à **2.626 teqCO₂**, contre 2.705 teqCO₂ dans le cas du projet de base monotube, soit une diminution de 3%.

F. Gestion des déchets

Comme dans le cas du projet de base monotube, dans le cadre de ce bilan carbone, les émissions liées au traitement de ces déchets ne sont pas prises en compte. Les émissions liées aux déchets ne concernent que le fret nécessaire à leur évacuation.

Cette section ne présente donc que les types et les quantités de déchets produits. Les données sont ensuite utilisées au niveau du poste Fret sortant.

F.1. Déblais

La méthodologie et les hypothèses appliquées plus haut le sont également dans le cas de l'alternative bitube. Seules les quantités de déblais changent.

Pour les **stations**, le niveau de détail de l'alternative bitube étant moindre que pour celui du projet, par hypothèse :

- Les données pour les stations Colignon, Verboekhoven et Riga sont reprises du métré bitube réalisé par BMN ;
- Les données pour les autres stations sont déterminées à partir des quantités totales relatives au projet de base monotube selon les hypothèses suivantes :
 - Stations Liedts, Tilleul et Bordet : quantités identiques à celles du projet de base, le gain engendré par la moindre profondeur de ces stations dans le cas de l'alternative bitube étant supposé être compensé par l'augmentation de la largeur du niveau des quais ou des excroissances nécessaires à l'implantation de locaux techniques ;
 - Station Paix : la quantité de déblais estimée pour le projet de base est augmentée de 25%, à l'instar de la station Colignon qui connaît une évolution similaire.

Pour rappel, par hypothèse, le **dépôt** et l'ensemble **puits P0** et **rampe d'accès** sont considérés identiques entre le projet de base monotube et l'alternative bitube.

Par hypothèse également, la répartition des déblais selon leur nature correspondant aux **ouvrages bitube** est identique à celle des déblais des tunnels, les travaux ayant lieu dans les deux cas à des profondeurs similaires.

Le tableau ci-dessous reprend les principales quantités de déblais pour le projet de base monotube et l'alternative bitube.

Sous-projet	Valorisables				Non valorisables				Total [m³]	
	Monotube		Bitube		Monotube		Bitube		Monotube	Bitube
	Sables bruxelliens	Déblais valorisables hors sables bruxelliens	Sables bruxelliens	Déblais valorisables hors sables bruxelliens	Inertes	A traiter	Inertes	A traiter		
Tunnel(s)	228.181		236.578		68.158		70.666		296.339	307.245
Stations	155.320	259.119	167.391	279.257	143.955	199.264	155.143	214.750	757.657	816.541
Puits P0 et rampe d'accès	0		0		65.321		65.321		65.321	65.321
Dépôt	0		0		317.180		317.180		317.180	317.180
Ouvrages bitube	0		58.748		0		17.548		0	76.296
Total	642.620		741.974		793.878		840.608		1.436.497	1.582.583

Tableau 101 : Volume et nature des déblais excavés au niveau du projet Métro Nord – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

F.2. Déchets de génie civil

Les déchets de génie civil seront issus de la mise en œuvre des chantiers au niveau des stations, du puits P0 et de la rampe d'accès.

Pour les **stations**, le niveau de détail de l'alternative bitube étant moindre que pour celui du projet, par hypothèse :

- Les données pour les stations Colignon, Verboekhoven et Riga sont reprises du métré bitube réalisé par BMN ;
- Les données pour les autres stations sont déterminées à partir des quantités totales relatives au projet de base monotube selon les hypothèses suivantes :
 - Stations Liedts, Tilleul et Bordet : quantités identiques à celles du projet de base, le gain engendré par la moindre profondeur de ces stations dans le cas de l'alternative bitube étant supposé être compensé par l'augmentation de la largeur du niveau des quais ou des excroissances nécessaires à l'implantation de locaux techniques ;
 - Station Paix : la quantité de déchets de génie civil estimée pour le projet de base est augmentée de 80%, à l'instar de la station Colignon qui connaît une évolution similaire.

Pour rappel, par hypothèse, le **dépôt** et l'ensemble **puits P0** et **rampe d'accès** sont considérés identiques entre le projet de base monotube et l'alternative bitube.

Les déchets de génie civil seront issus de la mise en œuvre des chantiers au niveau des stations, du puits P0 et de la rampe d'accès.

Sous-projet	Quantité [m ³]	
	Monotube	Bitube
Stations	31.876	42.671
Puits P0 et rampe d'accès	1.893	1.893
Dépôt	1.200	1.200
Ouvrages bitube	0	10.138
Total	34.969	55.902

Tableau 102 : Volume des déchets de génie civil produits lors de la mise en œuvre du projet Métro Nord – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

G. Fret entrant

G.1. Matériaux

G.1.1. Béton

Pour les sous-projets Tunnels, Stations, Puits P0 et rampe d'accès, et Dépôt, la méthodologie et les hypothèses restent identiques au niveau de l'alternative bitube, seules les quantités changent. En ce qui concerne les ouvrages bitube, des hypothèses simplificatrices ont consisté à considérer une distance égale à la moyenne des distances entre les 4 centrales à béton et les différents chantiers concernés (Liedts, Verboekhoven, Tilleul et Bordet), à savoir 3,6 km.

Le tableau ci-dessous reprend les tonnages-kilomètres correspondant aux différents sous-projets.

4 Evaluation des émissions du projet et des alternatives

		Tonnage-km total [t.km]			
		Voie routière		Voie fluviale	
		Monotube	Bitube	Monotube	Bitube
Tunnels	Béton coulé sur place (radier, couche de calage et fond des tunnels)	504.005	489.178	0	0
	Voussoirs	314.399	387.506	40.567.674	50.000.749
	Traverses	222.656	222.656	0	0
	Mortier de bourrage	168.652	194.158	0	0
Stations		2.339.452	2.465.850	0	0
Puits P0 et rampe d'accès		268.714	268.714	0	0
Dépôt		335.979	335.979	0	0
Ouvrages bitube		0	423.033	0	0

Tableau 103 : Tonnages-kilomètres entre diverses centrales à béton et les chantiers des tunnels, du puits P0 et de la rampe d'accès – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

La diminution du tonnage-kilomètre observée dans le cas de l'alternative bitube pour le béton coulé sur place (radier, couche de calage et fond des tunnels) est liée aux moindres quantités nécessaires de celui, malgré le fait qu'il y ait deux tunnels (voir les hypothèses posées au niveau des *Intrants béton*).

Les facteurs d'émission considérés sont, pour rappel, de 0,124 kg eqCO₂/t.km pour le transport du béton coulé sur place par camions-toupies, de 0,0919 kg eqCO₂/t.km pour le transport par semi-remorques de 20 tonnes et de 0,0298 kg eqCO₂/t.km pour le transport par péniches.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant au fret nécessaire à l'approvisionnement en béton, tant coulé sur place qu'utilisé sous forme de voussoirs et de traverses.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]					
	Voie routière		Voie fluviale		Total	
	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube
Tunnel(s)	127	135	1.209	1.490	1.336	1.625
Stations	290	306	0	0	290	306
Puits P0 et rampe d'accès	33	33	0	0	33	33
Dépôt	42	42	0	0	42	42
Ouvrages bitube	0	52	0	0	0	52
Total	492	568	1.209	1.490	1.701	2.058

* Y compris le mortier de bourrage (18 teqCO₂)

Tableau 104 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Béton – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans le cas de l'alternative bitube s'explique par de plus grandes quantités de béton à transporter pour les tunnels, les stations et les ouvrages spécifiques supplémentaires.

G.1.2. Acier

Pour les sous-projets Tunnels, Stations, Puits P0 et rampe d'accès, et Dépôt, la méthodologie et les hypothèses restent identiques au niveau de l'alternative bitube, seules les quantités changent. En ce qui concerne les ouvrages bitube, une hypothèse simplificatrice a consisté à considérer une distance égale à la distance moyenne entre le port de Bruxelles et les chantiers concernés, à savoir 6,6 km.

Par extrapolation à partir des quantités données dans le métré de BMN pour les stations Colignon, Verboekhoven et Riga, les quantités d'acier sont considérées identiques pour l'ensemble des stations, par rapport au projet de base monotube.

Les données d'activité, sous forme de tonnages-kilomètres, sont reprises dans le tableau ci-dessous.

4 Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Sous-projet	Tonnage-km total [t.km]			
	Voie routière		Voie fluviale	
	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube
Tunnel(s)	1.348.350	1.351.369	1.675.621	2.065.248
Stations	89.441	89.441	1.116.601	1.116.601
Puits P0 et rampe d'accès	108.631	108.631	84.326	84.326
Dépôt	1.088.229	1.088.229	150.859	150.859
Ouvrages bitube	0	38.752	0	176.147
Total	2.634.651	2.676.422	3.027.407	3.593.181

Tableau 105 : Tonnages-kilomètres pour les différents sous-projets – Acier – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

Les facteurs d'émission considérés sont, pour rappel, de 0,919 kg eqCO₂/t.km pour le transport par semi-remorques de 20 tonnes et de 0,0298 kg eqCO₂/t.km pour le transport par péniche.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant au fret nécessaire à l'approvisionnement en acier.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]					
	Voie routière		Voie fluviale		Total	
	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube
Tunnel(s)	124	124	49	62	173	186
Stations	8	8	33	33	41	41
Puits P0 et rampe d'accès	10	10	3	3	12	12
Dépôt	100	100	5	5	105	105
Ouvrages bitube		4		5	0	9
Total	242	246	90	95	332	353

Tableau 106 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Acier – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans le cas de l'alternative bitube s'explique par de plus grandes quantités d'acier à transporter pour les tunnels et les ouvrages spécifiques supplémentaires.

G.1.3. Remblais

Les données d'activité, correspondant aux tonnages-kilomètres obtenus, sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Sous-projet	Volume remblais [m³]		Tonnage-kilomètre [t.km]	
	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube
Stations	32.030	32.127	3.203.010	3.212.700
Dépôt	7.680	7.680	768.000	768.000
Total	39.710	39.807	3.971.010	3.980.700

Tableau 107 : Volumes et tonnages-kilomètres – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Remblais – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

Le facteur d'émission considéré est, pour rappel, de 0,0919 kg eqCO₂/t.km pour le transport par semi-remorques de 20 tonnes.

Les émissions correspondant au fret nécessaire à l'approvisionnement en remblais sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]		Variation bitube/monotube
	Monotube	Bitube	
Stations	294	295	0%
Dépôt	71	71	0%
Total	365	366	0%

Tableau 108 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret entrant – Remblais – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

Les variations entre l'alternative et le projet de base monotube sont pratiquement nulles.

G.2. Engins de chantier

Comme dans le cas du projet de base monotube, le fret correspondant aux engins de chantier n'est pas pris en compte, pour les raisons exposées plus haut.

H. Fret sortant

H.1. Déchets de chantier

Les hypothèses considérées pour le projet de base monotube le sont également dans le cas de l'alternative bitube. Seules les quantités changent, hormis pour les déchets de génie civil pour lesquels une distance d'évacuation égale à la distance moyenne entre le port de Bruxelles et les chantiers concernés a été considérée, à savoir 6,6 km.

4 Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Les données d'activité, correspondant aux tonnages-kilomètres obtenus, sont reprises dans les tableaux ci-dessous, correspondant respectivement au fret routier et au fret fluvial.

Sous-projet	Valorisables		Non valorisables pollués		Non valorisables inertes		Déchets de génie civil	
	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube
Tunnel(s)	1.414.724	1.466.786	0	0	422.580	438.131	0	0
Stations	1.952.242	2.096.930	938.646	1.008.213	678.110	728.367	197.547	258.101
Puits P0 et rampe d'accès	0	0	0	0	404.990	404.990	14.671	14.671
Dépôt	0	0	0	0	1.966.516	1.966.516	0	0
Ouvrages bitube	0	775.473	0	0	0	340.433	0	245.847

Tableau 109 : Tonnages-kilomètres pour les différents types de déchets issus du projet Métro Nord – Fret routier – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

Sous-projet	Valorisables		Non valorisables pollués		Non valorisables inertes		Déchets de génie civil	
	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube
Tunnel(s)	0	0	0	0	9.542.128	9.893.278	0	0
Stations	0	0	27.896.930	30.065.054	20.153.675	21.720.001	0	0
Puits P0 et rampe d'accès	0	0	0	0	9.144.940	9.144.940	0	0
Dépôt	0	0	0	0	44.405.200	44.405.200	0	0
Ouvrages bitube	0	0	0	0	0	2.456.731	0	0

Tableau 110 : Tonnages-kilomètres pour les différents types de déchets issus du projet Métro Nord – Fret fluvial – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

Les facteurs d'émission considérés sont, pour rappel, de 0,919 kg eqCO₂/t.km pour le transport par semi-remorques de 20 tonnes et de 0,0139 kg eqCO₂/t.km pour le transport par péniche.

Le tableau ci-dessous reprend les émissions correspondant au fret nécessaire à l'évacuation des déchets de chantier.

4 Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Sous-projet	Emissions [teqCO ₂]		Variation bitube/monotube
	Monotube	Bitube	
Tunnel(s)	301	313	+4%
Stations	1.014	1.096	+8%
Puits P0 et rampe d'accès	166	166	0%
Dépôt	799	799	0%
Ouvrages bitube	0	159	-
Total	2.280	2.532	+11%

Tableau 111 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Fret sortant – Déchets de chantier – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans le cas de l'alternative bitube s'explique par de plus grandes quantités de déchets de chantier à évacuer pour les tunnels, les stations et les ouvrages spécifiques supplémentaires.

H.2. Engins de chantier

Comme dans le cas du projet de base monotube, le fret correspondant aux engins de chantier n'est pas pris en compte, pour les raisons exposées plus haut.

I. Déplacements

Comme dans le cas du projet de base monotube, les déplacements considérés correspondent aux **trajets entre le domicile et les différents chantiers**, auxquels les travailleurs prennent part.

De même, seuls les déplacements effectués par les travailleurs participant aux **chantiers des stations** sont comptabilisés. Les déplacements correspondant à la construction des ouvrages bitubes y sont inclus.

La méthodologie et les hypothèses appliquées plus haut le sont également dans le cas de l'alternative bitube. Seules les durées de chantier varient.

Chantier	Nombre de travailleurs moyen par jour	Nombre de déplacements par semaine	Durée du chantier [mois]	Nombre de déplacements par travailleur sur la durée du chantier [-]*
Liedts	40	10	121	5.244
Colignon	40	10	110	47.68
Verboekhoven	40	10	116	5.028
Riga	40	10	101	43.78
Tilleul	40	10	96	4.160
Paix	40	10	113	4.898
Bordet	40	10	109	4.724

* Arrondi au multiple de 2 supérieur

Tableau 112 : Hypothèses générales relatives aux déplacements domicile-travail concernant les chantiers du projet Métro Nord – Alternative bitube (ARIES, 2020)

Le tableau ci-dessous reprend le nombre de passagers.km par mode.

Chantier	Nombre de passagers.kilomètres	
	Camionnette	Métro, tram, bus
Liedts	2.884.200	52.440
Colignon	2.622.400	47.680
Verboekhoven	2.765.400	50.280
Riga	2.407.900	43.780
Tilleul	2.288.000	41.600
Paix	2.693.900	48.980
Bordet	2.598.200	47.240
Total	18.260.000	332.000

Tableau 113 : Nombre de passagers-kilomètres total par chantier – Alternative bitube (ARIES, 2020)

Pour rappel, les facteurs d'émission considérés sont les suivants : 0,193 kg eqCO₂/km pour les camionnettes et 0,046 kg eqCO₂/passager.km pour les transports en commun urbains (métro, tram, bus). Faute de données, le facteur d'émission correspondant aux camionnettes considéré ici est par hypothèse celui correspondant aux voitures particulières.

Le tableau ci-dessous reprend, par mode, les émissions liées aux déplacements domicile-travail des travailleurs participant aux chantiers des stations.

Mode	Emissions [teqCO ₂]		Variation bitube/monotube
	Monotube	Bitube	
Camionnette	2.599	3.535	+36%
Métro, tram, bus	11	15	+36%
Total	2.610	3.550	+36%

Tableau 114 : Emissions – Axe Construction des infrastructures – Poste Déplacements – Déplacements domicile-travail des travailleurs affectés aux chantiers des stations – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans le cas de l'alternative bitube s'explique par de plus longues durées de chantier pour les stations et un allongement nécessaire à la construction des ouvrages spécifiques à l'alternative bitube.

J. Synthèse des résultats

J.1. Scénario de base

A l'instar du projet monotube, le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des émissions calculées pour les différents postes de l'axe Construction des infrastructures, détaillées selon les différents sous-projets. Pour rappel, les postes Emissions fugitives et Gestion des déchets, non pris en compte ne sont pas repris.

4 Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Poste	Source	Sous-projet					Total
		Tunnels	Stations	Puits P0 et rampe d'accès	Dépôt	Ouvrages bitube	
Energie (sources mobiles de combustion)	Consommations excavation déblais	-*	2.589	207	1.005	242	4.043
	Consommations engins de chantier pour mise en œuvre matériaux	**	7.121	557	701	1.175	9.553
	Congélation	-	15.092	-	-	9.619	24.712
	Sous-total	-	24.802	764	1.706	11.036	38.308
Energie (consommations d'électricité)	Consommations tunnelier	1.413	0	0	0	0	1.413
	Consommations bases-vies	223	135	***	***	***	358
	Sous-total	1.636	135	0	0	0	1.772
Intrants	Béton	36.510	77.067	6.012	6.012	15.736	142.662
	Acier	11.606	67.132	5.241	10.912	10.590	105.482
	Verre	0	852	0	431	0	1.283
	Equipements	-	1.676	-	-	-	1.676
	Sous-total	48.116	146.726	11.253	18.681	26.326	251.103
Amortissements	Engins de chantier	2.626	NC	NC	NC	NC	2.626
	Sous-total	2.626	0	0	0	0	2.626
Fret entrant	Béton	1.625	306	33	42	52	2.058
	Acier	186	41	12	105	9	353
	Remblais	-	295	-	71	0	366
	Engins de chantier	NC	NC	NC	NC	NC	-
	Sous-total	1.495	643	46	217	61	2.777
Fret sortant	Déchets de chantier	313	1.096	166	799	159	2.532
	Engins de chantier	NC	NC	NC	NC	NC	-
	Sous-total	313	1.096	166	799	159	2.532
Déplacements	Domicile-travail	NC	3.550	NC	NC	NC	3.550
	Sous-total	0	3.550	0	0	0	3.550
Total		54.501	176.952	12.229	21.403	37.583	302.667

* Les consommations liées à l'excavation des tunnels sont comptabilisées au niveau des émissions liées aux consommations d'électricité du tunnelier.

** Les consommations liées au creusement des tunnels sont comptabilisées au niveau des émissions liées aux consommations d'électricité du tunnelier.

*** Cette valeur correspond à la base-vie nécessaire à l'ensemble des chantiers sur le site du dépôt de Haren, ainsi que des containers de logements.

**** Y compris le mortier de bourrage.

NC : Non considéré dans ce bilan carbone

Tableau 115 : Synthèse des résultats – Axe Construction des infrastructures – Travaux de construction – Alternative bitube (ARIES, 2020)

A la lecture de ce tableau et des sections précédentes, plusieurs enseignements peuvent être tirés :

- Les **émissions de totales** estimées pour l'**axe Construction des infrastructures** sont de l'ordre de **305.000 teqCO₂** dans le cas de l'alternative bitube, pour l'ensemble des postes pris en compte, soit environ 60.000 teqCO₂ de plus que pour le projet de base monotube. Cela correspond à une augmentation globale de 23%.
- **Tous les postes présentent une augmentation des émissions au niveau de l'alternative**, à l'exception des équipements (ascenseurs et escalators), dont le nombre diminue, et des amortissements liés à l'utilisation du tunnelier, compte tenu des hypothèses posées. Ces augmentations s'expliquent principalement par de plus grandes quantités des matériaux à mettre en œuvre et à acheminer, et par de plus grands volumes de déblais à excaver et à évacuer. Ces variations engendrent des modifications dans la plupart des postes : énergie, intrants, amortissements, fret entrant et sortant. Les augmentations les plus notables concernant les intrants (+18% de manière générale et +22% pour le béton) et les consommations d'énergie (sources mobiles de combustion) (+78% de manière générale, augmentation principalement due à la forte augmentation des émissions liées à la congélation (+148%)). Ces dernières sont dues à des volumes congelés plus importants au niveau des stations, mais également à la nécessité de réaliser les ouvrages spécifiques à l'alternative bitube (ouvrages de bifurcation et de raccordement) par cette technique.
- **L'ordre d'importance des postes reste identique à celui observé pour le projet de base monotube** : les intrants représentent environ 85% des émissions, suivis des consommations d'énergie (sources mobiles de combustion) des engins de chantier et de la congélation pour un peu plus de 10%. Le solde est réparti entre le fret (entrant et sortant réunis), les déplacements domicile-travail, les émissions liées à la fabrication du tunnelier (amortissements) et les consommations d'énergie indirectes (électricité).

Les figures ci-dessous illustrent la répartition des émissions estimées selon les différents sous-projets et les différents postes considérés. Etant donné la différence d'échelle entre les émissions liées aux intrants et les autres postes, la seconde figure présente un zoom du premier graphique sur les émissions inférieures à 30.000 teqCO₂.

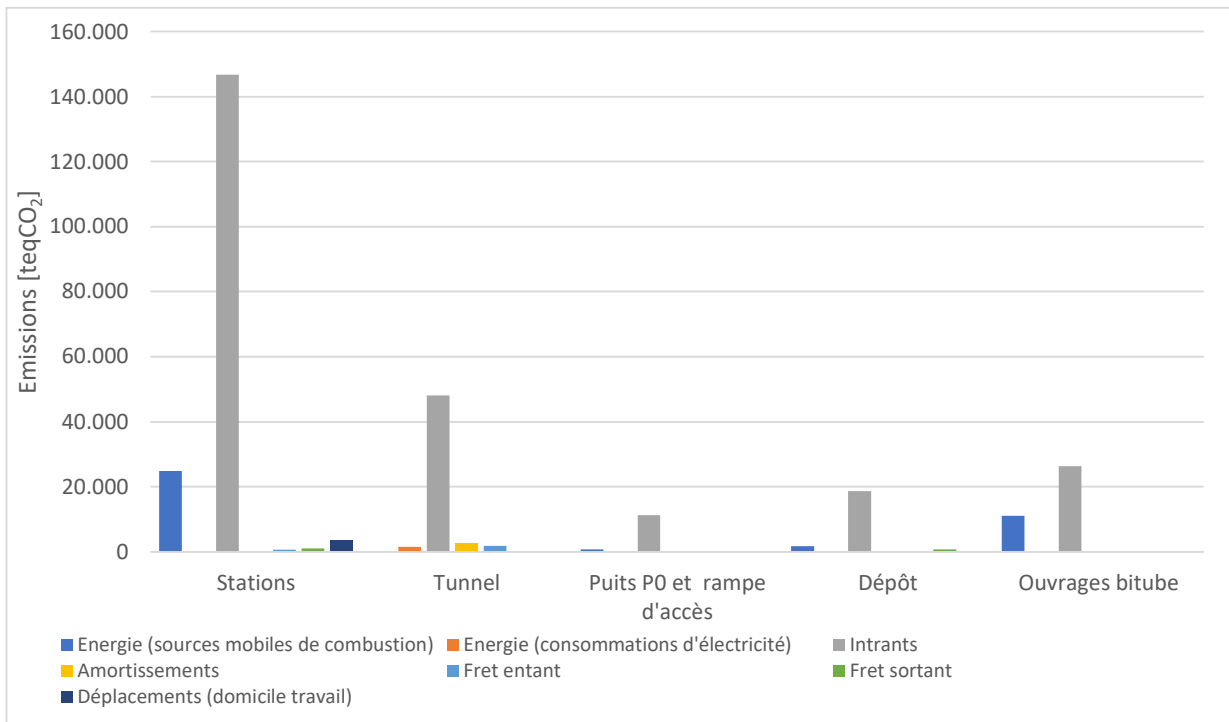


Figure 16 : Synthèse des résultats – Axe Construction des infrastructures – Travaux de construction – Répartition des émissions par sous-projets et postes – Alternative bitube (ARIES, 2020)

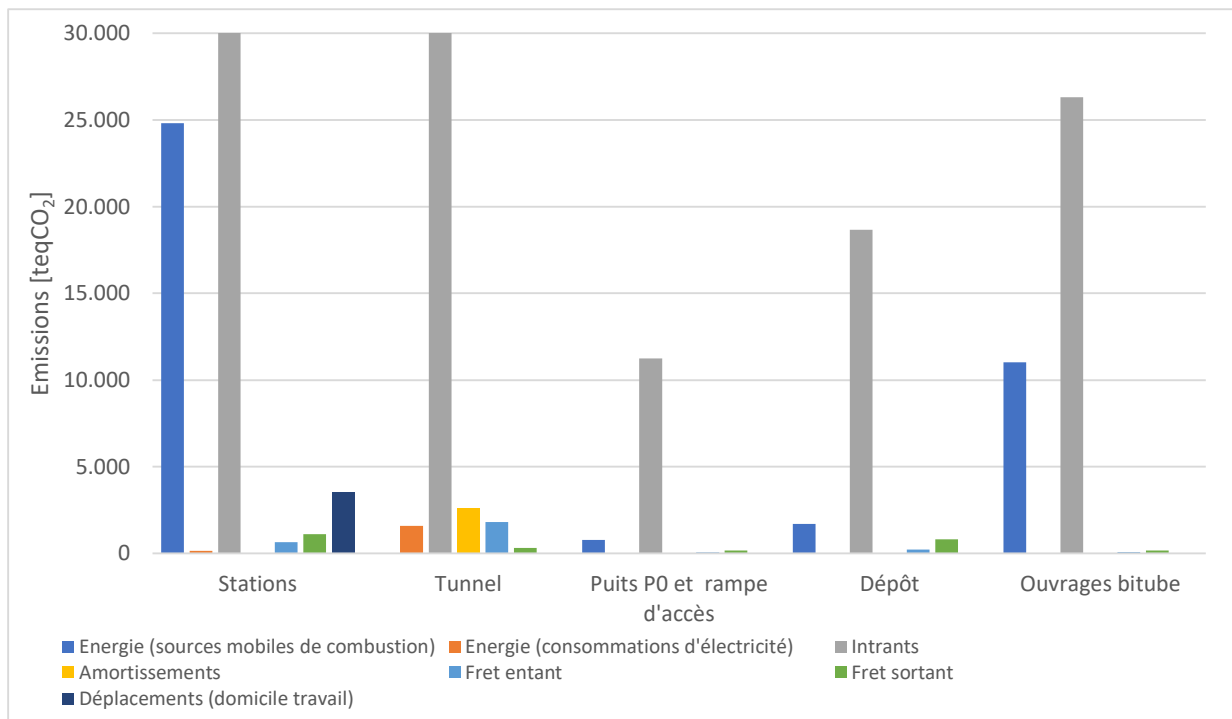


Figure 17 : Synthèse des résultats – Axe Construction des infrastructures – Travaux de construction – Répartition des émissions par sous-projets et postes (zoom) – Alternative bitube (ARIES, 2020)

Le graphique suivant détaille les émissions du poste Intrants, entre le béton, l'acier, le verre et les équipements.

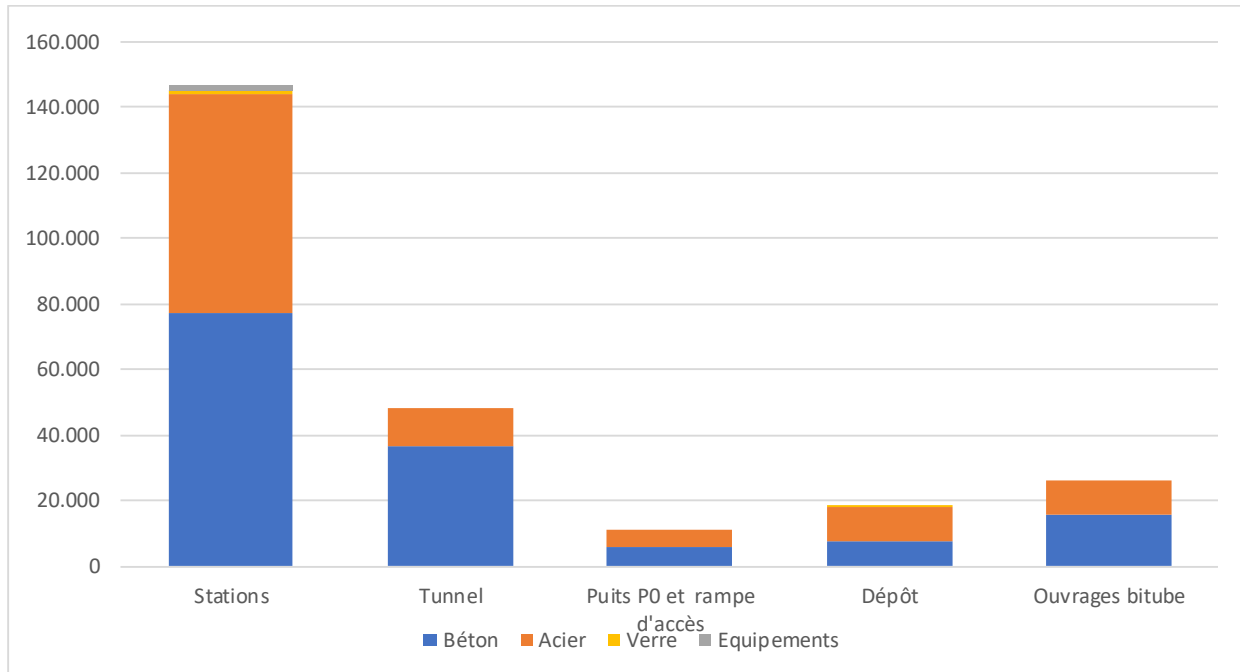


Figure 18 : Synthèse des résultats – Axe Construction des infrastructures – Répartition des émissions du poste Intrant (ARIES, 2020)

La répartition des émissions est semblable à celle observée pour le projet de base monotube : les émissions de béton représentent 57% des émissions liées aux intrants, suivies de celles liées à l'acier, 42%). Les émissions estimées pour le verre et les équipements sont marginales.

Le tableau ci-dessous synthétise les différences observées entre les émissions calculées pour le projet de base monotube et l'alternative bitube.

	Monotube	Bitube	Variation bitube/monotube
Energie (sources mobiles de combustion)	21.581	38.308	+78%
Energie (Consommations d'électricité)	1.682	1.772	+5%
Intrants	213.621	251.103	+18%
Amortissements	2.705	2.626	-3%
Fret entrant	2.399	2.777	+16%
Fret sortant	2.280	2.532	+11%
Déplacements	2.610	3.550	+36%
Total	246.877	302.667	+23%

Tableau 116 : Emissions par poste – Projet de base monotube et alternative bitube (ARIES, 2020)

J.2. Etudes de sensibilité

Le transport par voie fluviale étant privilégié, l'impact de son remplacement par du transport ferroviaire ou routier ne sera pas analysé au niveau de l'alternative bitube. Etant donné les volumes de matériaux à acheminer plus importants dans le cas de cette dernière, les émissions liées au fret seront plus élevées. Cependant, comme analysé pour le projet de base monotube, les impacts du remplacement du fret fluvial par du fret ferroviaire ou du fret routier seront relativement limités (augmentation de l'ordre de 4,5% dans le cas du fret routier, à l'échelle du bilan global de l'axe Construction des infrastructures).

Dès lors, seul l'impact du type de ciment est développé. Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des postes considérés, pour les 3 scénarios considérés : scénario de base dans lequel les facteurs d'émission des bétons sont définis par classe de résistance (provenant de la Société du Grand Paris) et les scénarios Ciment CEM I et Ciment CEM III dans lesquels les facteurs d'émission des bétons ont été recalculés en considérant les facteurs d'émission correspondant aux ciments du même nom. Les résultats relatifs au ciment CEM III tiennent toutefois compte du fait que pour les voussoirs, l'utilisation de ciment CEM I est imposée).

Les autres postes sont considérés inchangés.

Poste	Source	Emissions [teqCO ₂]		
		Scénario de base	Ciment CEM I	Ciment CEM III
Energie (sources mobiles de combustion)		38.308	38.308	38.308
Energie (consommations d'électricité)		1.772	1.772	1.772
Intrants	Béton	142.662	183.643	118.721
	Acier	105.482	105.482	105.482
	Verre	1.283	1.283	1.283
	Equipements	1.676	1.676	1.676
Amortissements		2.626	2.626	2.626
Fret entrant		2.777	2.777	2.777
Fret sortant		2.532	2.532	2.532
Déplacements		3.550	3.550	3.550
Total		302.667	343.648	278.726
Variation par rapport au scénario de base		-	+13,5%	-7,9%
Variation scénario CEM III par rapport au scénario CEM I		-	-	-18,9%

Tableau 117 : Impact du type de ciment utilisé dans les bétons au niveau de l'ensemble des émissions – Axe Construction des infrastructures – Alternative bitube (ARIES, 2020)

L'augmentation de près de 65.000 teqCO₂ due à l'utilisation de ciment CEM I au lieu de ciment CEM III engendre une augmentation de 23% des émissions à l'échelle du bilan global de l'axe

Construction des infrastructures. Cela démontre le rôle prépondérant du choix du ciment à mettre en œuvre.

Pour rappel, l'emploi de ciment CEM III est préconisé dans les prescriptions de BMN (hormis pour les voussoirs), aussi les **émissions de gaz à effet de serre totales les plus représentatives pour l'axe Construction des infrastructures s'élèvent à 278.726 teqCO₂**. Ces émissions sont de 23% plus élevées que celles estimées pour la version du projet monotube (227.012 teqCO₂).

J.3. Conclusions

Au regard de l'ensemble des résultats et des études de sensibilité réalisées dans le cadre de l'axe Construction des infrastructures, les **émissions de gaz à effet de serre totales les plus représentatives s'élèvent à 278.726 teqCO₂**. En effet, ces émissions correspondent à l'emploi de ciment CEM III, préconisé dans les prescriptions de BMN en termes de composition des bétons, et à du transport par voie fluviale, en ce qui concerne le fret.

La comparaison des cas extrêmes, entre le projet de base monotube avec ciment CEM III (227.012 teqCO₂) et l'alternative bitube avec ciment CEM I (343.648 teqCO₂), montre une augmentation de 51%. En outre, la comparaison entre le projet de base monotube et l'alternative bitube avec emploi de ciment CEM III dans les deux cas montre une augmentation d'environ 50.000 teqCO₂, soit 23%.

Les **intrants** constituent de loin le poste le plus prépondérant, suivi des **consommations d'énergie (sources mobiles de combustion)** et du **fret** (fret entrant et fret sortant réunis).

Le fait d'assurer par voie routière le fret assuré par voie fluviale dans le scénario de base n'engendre pas d'augmentation significative des émissions.

4.2.1.3. Exploitation de la ligne

Les émissions carbone liées à l'exploitation de la ligne diffèrent très peu dans l'alternative de conception bitube, par rapport au projet de base monotube. Le **seul poste présentant des modifications est le poste Energie indirecte pour les consommations d'énergie des stations.**

A. Consommations d'énergie des stations

La géométrie des stations, notamment au niveau de la profondeur et de la largeur des quais est impactée par la configuration du tunnel en bitube. De plus, leur organisation en quai central modifie le nombre d'équipements (ascenseurs, escalators) nécessaires. Ces modifications entraînent donc des consommations d'électricité parfois différentes en comparaison au projet de base (monotube).

Ces consommations d'énergie ont déjà été calculées au niveau des stations. et sont donc reprises ici directement. Les calculs détaillés se trouvent dans le chapitre Energie des livres Stations : les informations sont réparties dans le livre Généralités des stations et dans le livre relatif à chacune d'elles.

Voir Livres III Stations – Chapitre 7. Energie, point 7.6 Analyse des incidences des alternatives et des variantes en situation de référence

Les données d'activité concernées correspondent donc aux **consommations** et **consommations spécifiques** des stations. Ces consommations, exprimées en kWh, comprennent le chauffage, la ventilation, l'éclairage, les équipements et le refroidissement des différents locaux et espaces.

Le facteur d'émission correspondant est donc exprimé en quantités de CO₂ émises par kWh consommé. La valeur retenue est celle utilisée par la STIB pour effectuer ses propres bilans carbone, qui est de 157 g eqCO₂/kWh. Ce facteur d'émission est basé sur le « mix énergétique » du fournisseur de la STIB⁵⁸.

Les émissions annuelles évaluées pour les consommations d'énergie des stations en configuration bitube dans le poste Energie sont reprises dans le tableau ci-dessous, par source d'émissions.

Sources d'émissions	Consommations [kWh]		Emissions [teqCO ₂]		Variation bitube/monotube
	Monotube	Bitube	Monotube	Bitube	
Refroidissement	548.124	548.124	86	86	0%
Chauffage	28.224	28.224	4	4	0%
Eclairage	824.615	829.650	129	130	+0,6%
Ventilation	412.304	412.304	65	65	0%
Equipements	9.581.898	9.309.898	1.504	1.462	-2,8%
Total	11.395.165	11.128.199	1.788	1.747	-2,3%

Tableau 118 : Emissions – Axe Exploitation de la ligne – Poste Energie – Stations et dépôt (ARIES, 2020)

B. Conclusion

La configuration bitube permet de réduire les émissions carbone liées à l'exploitation de la ligne de **41 teqCO₂ par an**, réduction principalement due aux gains réalisés en bitube par un nombre réduit d'ascenseurs et d'escalators, à une surface éclairée moindre (en moyenne 1 étage en moins) et à la rationalisation de l'espace par un quai central.

Cette **réduction peut être considérée comme négligeable**, étant donné l'impact annuel d'environ 5.000 teqCO₂ pour l'exploitation de la ligne. La configuration bitube n'entraîne par conséquent pas d'impact positif ou négatif sur les émissions carbone liées à cette exploitation, par rapport à la configuration du projet de base en monotube⁵⁹.

⁵⁸ Considéré comme inchangé étant donné l'absence de vision à long terme

⁵⁹ Détails des émissions carbone de l'exploitation de la ligne du projet de base : voir section Partie 1 :4.1.2

4.2.2. Alternative Tram

4.2.2.1. Introduction

Tout comme l'étude d'incidences de l'alternative Tram, le bilan carbone propose l'étude d'alternatives au projet introduit (métro) et une évaluation de leurs émissions carbone. Deux alternatives sont retenues par le Comité d'Accompagnement et étudiées dans le livre Tram :

- Une **alternative « zéro »** de non-réalisation du projet de métro, à savoir le maintien de la situation existante (la ligne de tram 55) en tenant compte des évolutions pertinentes dans la zone d'étude ;
- Une **alternative « zéro + »** de non-réalisation du projet de métro, qui comprend l'optimisation de la situation existante du tram 55, via des opérations techniques permettant d'en améliorer la vitesse commerciale et la fréquence.

La description de la ligne de tram 55 en situation existante ainsi que des deux alternatives étudiées est détaillée dans le livre Tram.

Voir Livre V Tram

Il est important de rappeler que l'étude **des alternatives n'atteint pas le même niveau de détail que le projet introduit** qui a fait l'objet de plusieurs années de travail par une équipe complète. Le travail de conception des alternatives 0 et 0+ a été réalisé par le chargé d'étude, en collaboration avec la STIB et BELIRIS. Le détail du niveau de définition des alternatives est repris dans le livre Tram.

L'évaluation du bilan carbone des alternatives est donc **adaptée aux informations récupérées** qui sont parfois **extrapolées et simplifiées** afin d'obtenir des résultats et des ordres de grandeurs cohérents.

Les informations récupérées ne permettent pas d'évaluer précisément les émissions de CO₂ liées au fonctionnement de la ligne de tram 55. En effet, la STIB ne dispose pas de données mesurables ou exploitables, aussi bien pour la situation existante que pour les situations projetées des alternatives. L'évaluation carbone est donc simplement analysée à travers une étude et une comparaison qualitative du matériel roulant et des différentes caractéristiques de fonctionnement de la ligne. Quelques chiffres théoriques sont décrits mais il n'est pas possible d'évaluer des consommations d'énergie absolues en situations existante et projetée. En revanche, les émissions carbone des travaux de rénovation nécessaires à l'optimisation de la ligne sont bien évaluées mais sont simplifiées au maximum.

Dans le cadre du bilan carbone, trois scénarios sont étudiés :

1. **La situation existante**, soit les consommations d'énergie actuelles de la ligne 55 avec l'utilisation des **tramways T3000**, circulant en 2020 sur le tronçon actuel Liedts-Bordet ;
2. **L'alternative 0**, soit les consommations d'énergie de la ligne après l'intégration des T4000 et les interventions et opérations techniques nécessaires à l'intégration de ces nouveaux tramways (notamment le **remplacement de rails usagés** sur certains tronçons et le déplacement des arrêts de tramways) ;
3. **L'alternative 0+**, soit les consommations d'énergie de la ligne après la mise en site propre de l'ensemble du tracé Liedts-Bordet.

Comme pour le projet de métro, par souci d'exhaustivité, toutes les sources d'émissions sont considérées dans un premier temps. Dans un second temps, certaines d'entre elles seront négligées, notamment au regard de leur importance par rapport à d'autres sources.

Il est important de préciser que tout comme l'étude d'incidences de l'alternative tram, le **bilan carbone n'évalue pas la possibilité d'une extension du dépôt de Haren** où sont actuellement stockés les tramways T3000 qui circulent sur la ligne 55.

Pour reprendre l'explication dans le livre tram : « *la mise en service des trams T4000 sur la ligne de tram 55 n'est actuellement pas prévue par la STIB d'un point de vue programmatique et budgétaire. De ce fait, aucune étude de capacité de remisage de ces trams dans le dépôt de Haren n'a été réalisée et il n'est pas possible de conclure que le remplacement des T3000 de la ligne 55 par des T4000 soit possible en termes de remisage. En effet, le tram T4000 étant 10 m plus long que le T3000, cela nécessiterait une capacité supplémentaire d'environ 25%. [...] Dans le cadre de la présente étude, il est cependant considéré que le remisage des trams T4000 sera possible au dépôt de Haren. Cela impliquera vraisemblablement des réorganisations logistiques qui auront un impact en cascade sur les autres dépôts de trams. En cas de mise en œuvre effective de cette alternative, des études approfondies seront néanmoins réalisées.* »⁶⁰

Il est donc évident que le bilan carbone ne peut prendre en compte une possible extension du dépôt de Haren puisque celle-ci n'est pas étudiée à ce stade. Les hypothèses du bilan carbone sont donc les mêmes qu'au niveau de l'étude d'incidences : dans les alternatives 0 et 0+, les trams T4000 sont simplement stockés au dépôt de Haren.

Les interventions qui représentent un très faible impact CO₂ sont également négligées dans le bilan carbone, à savoir les différentes interventions de gestion de flux automobiles et intégration de panneaux de circulation permettant de réorganiser la circulation, notamment lors de la mise en site propre sur l'ensemble du tracé dans l'alternative 0+.

La **variante de l'alternative 0+ qui intègre des barrières d'une part et d'autres des voies de circulations** est également d'emblée négligée. En effet, l'étude d'incidences a montré que cette variante présentait très peu d'impacts sur la vitesse de circulation des tramways de la ligne 55. Il n'est donc pas nécessaire de s'intéresser à cet aspect dans le bilan carbone.

⁶⁰ Voir Livre V Tram Tram – Chapitre 5. Présentation des alternatives « tram », point 5.1.2.1.C

4.2.2.2. Situation existante

A. Fonctionnement de la ligne

A.1. Description du matériel roulant

Les **tramways « T3000 »** de la marque Bombardier circulent actuellement sur la ligne de tram 55. Il s'agit de trams bidirectionnels à plancher bas intégral, dont les caractéristiques sont les suivantes :

<p>Nombre de places : 46 places assises 134 places debout (4 personnes/m²) 180 au total</p>	<p>Dimensions : Longueur : 31,85 m Largeur : 2,30 m Hauteur du plancher à l'entrée : 35 cm Largeur du couloir : 63 cm</p>
<p>Nombre de portes par côté : 5 portes doubles + 1 porte simple</p>	<p>Poids du véhicule (à vide) : 38,6 tonnes</p>
<p>Nombre de caisses (modules) : 5</p>	

Figure 19 : Caractéristiques du tram T3000 exploité sur la ligne de tram 55 (STIB, s.d.)

A l'heure actuelle, un maximum de 15 trams en charge utile (transportant des voyageurs) circule sur la ligne dans les 2 sens. A cela s'ajoutent 3 trams de réserve (20%) ne transportant pas de voyageurs et se situant aux terminus pendant les temps de battement.

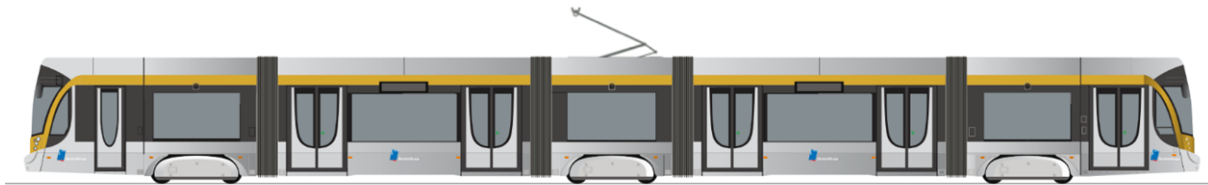


Figure 20 : Profil extérieur d'un tram T3000 (STIB, s.d.)

Le tableau ci-dessous comprend les valeurs théoriques des consommations d'énergie d'un tram Court (équivalent au T3000) et les émissions carbone équivalentes. Ces valeurs sont théoriques puisqu'elles correspondent aux TNG (Trams Nouvelles Générations), qui ne seront pas utilisés sur la ligne 55. En effet, il n'est pas prévu à moyen ou long terme de les intégrer sur la ligne bien qu'ils aient été commandés par la STIB en 2018, qu'ils soient compatibles avec l'infrastructure existante et qu'ils présentent des gabarits similaires.

Tram Court	Récupération d'énergie	Consommations énergétique	Emissions de CO ₂ *
Consommation d'énergie maximale	0%	8,12 kWh/(km-tram)	1,27 kg eqCO ₂ /(km-tram)
Consommation d'énergie minimale	100%	4,19 kWh/(km-tram)	0,66 kg eqCO ₂ /(km-tram)

* En considérant le mix énergétique de la STIB : 0,157 kg eqCO₂/kWh

Tableau 119 : Consommations d'énergie et émissions carbone théoriques d'un T3000 (STIB, 2018)

A.2. Caractéristiques de la ligne

Sur base du nombre de trams maximum circulant sur la ligne dans les deux sens en heure de pointe (15 trams) et de la capacité individuelle de chaque tram T3000, la **capacité maximale théorique de la ligne par heure** durant les périodes de pointes est estimée à :

- 2.700 personnes assises et debout maximum (ratio 4 personnes/m²) ;
- 2.200 personnes assises et debout de manière relativement confortable (ratio 3 personnes/m²).

Des comptages automatiques de fréquentation ont été réalisés à bord du tram 55 et ont permis de donner un nombre de montées de voyageurs. Les résultats journaliers moyens sont présentés ci-dessous, en fonction de jour de la semaine.

	Jour ouvrable	Samedi	Dimanche
Montées	43.500	28.000	22.000

Tableau 120 : Nombre de montées de voyageurs selon le jour de la semaine (STIB, 2018)

La **fréquence de passage du tram** varie entre 4 à 20 minutes en fonction du moment de la journée, de la période dans l'année, de la localisation et d'évènements externes pouvant impacter la circulation. Ces fréquences correspondent globalement aux fréquences des lignes de tramways de la ville de Bruxelles.

En revanche, la ligne **55 subit de nombreux aléas de circulation**, entraînant des retards, des ralentissements et des temps de parcours de la ligne très importants. Par conséquent, le tramway est amené à accélérer et freiner très souvent à cause de ces irrégularités, ce qui provoque une **augmentation des consommations d'énergie** non négligeables, entraînant par conséquent une **augmentation des émissions de CO₂ sur la ligne**.

B. Synthèse

Le tableau ci-dessous reprend les principales caractéristiques et émissions calculées pour les trams T3000, ainsi que certaines caractéristiques de la ligne 55 en situation existante.

Fonctionnement de la ligne		
Composantes	Type d'évaluation	Données
Matériel roulant (T3000)	Capacité	180 places assises et debout
	Consommation d'énergie	Max : 1,27 kg eqCO ₂ /(km-tram) Min : 0,66 kg eqCO ₂ /(km-tram)
Caractéristique de la ligne	Capacité de la ligne	2700 personnes/h (4 personnes/m ²) 2200 personnes/h (3 personnes/m ²)
	Fréquence	4 à 20 minutes
	Temps de parcours	Très variable/beaucoup d'irrégularités

Tableau 121 : Synthèse des résultats – Situation existante (ARIES, 2020)

Ce tableau permet de **contextualiser les données** concernant les émissions de carbone actuelles émises par l'utilisation du tram sur la ligne 55. L'étude des deux alternatives permettra ensuite de comparer les résultats et d'évaluer les différences en termes d'émissions carbone et de consommations d'énergie.

4.2.2.3. Alternative 0

A. Fonctionnement de la ligne

Pour rappel, la définition de l'alternative 0 du projet Métro Nord donnée dans l'étude d'incidences est la suivante :

« *Maintien de la situation actuelle en prenant en compte les évolutions pertinentes dans la zone d'étude (situation de référence).* »

La mise en service de trams T4000 sur la ligne 55 est la modification majeure apportée dans cette alternative par rapport à la situation existante. Ces nouveaux tramways impacteront le fonctionnement de la ligne, les consommations d'énergie, la capacité d'accueil des voyageurs, et entraîneront une série de travaux sur l'infrastructure afin d'adapter la ligne à ces nouvelles rames.

A.1. Description du matériel roulant

Le tram « T4000 » est la version « haute capacité » du T3000. Ces trams seront mis en circulation afin d'améliorer la capacité de la ligne. Les caractéristiques du tram sont les suivantes :

<p>Nombre de places: 66 places assises 186 places debout (4 personnes/m²) 252 au total</p>	<p>Dimensions: Longueur: 43,22 m Largeur: 2,30 m Hauteur du plancher à l'entrée: 35 cm Largeur du couloir: 63 cm</p>
<p>Nombre de portes par côté: 7 portes doubles + 1 porte simple</p>	<p>Poids du véhicule (à vide): 51,8 tonnes</p>
<p>Nombre de caisses (modules): 7</p>	

Figure 21 : Caractéristiques du tram T4000 (STIB, s.d.)

Il comporte 2 modules additionnels par rapport au T3000. Sa capacité maximale est augmentée de 20 places assises et de 52 places debout, soit un accroissement de 40% sur la capacité totale.

Le tableau ci-dessous comprend les valeurs théoriques des consommations d'énergie d'un tram Long (équivalent au T4000) et les émissions carbone équivalentes. Tout comme les T3000, ces valeurs sont théoriques puisqu'elles correspondent aux TNG (Trams Nouvelles Générations), qui ne seront pas utilisés sur la ligne 55.

Tram Court	Récupération d'énergie	Consommations énergétique	Emissions de CO ₂ *
Maximale	0%	10,6 kWh/(km-tram)	1,66 kg eqCO ₂ /(km-tram)
Minimale	100%	5,22 kWh/(km-tram)	0,82 kg eqCO ₂ /(km-tram)

* En considérant le mix énergétique de la STIB : 0,157 kg eqCO₂/kWh

Tableau 122 : Consommations d'énergie et émissions carbone théorique d'un T4000 (STIB, 2018)

Les consommations énergétiques théoriques d'un tram long (T4000) sont 25 à 30% plus élevées qu'un tram court (T3000), probablement en raison du dimensionnement du tram T4000 qui est plus long, plus lourd et qui peut accueillir davantage de personnes à bord. Cependant, ces consommations d'énergie ne prennent pas en compte les caractéristiques de fonctionnement de la ligne telles que la fréquence, la vitesse ou encore le type de conduite du tram sur la ligne.

A.2. Caractéristiques de la ligne

Sur base du nombre de trams maximum circulant sur la ligne dans les deux sens en heure de pointe (15 trams) et de la capacité individuelle de chaque tram T4000, la **capacité maximale théorique de la ligne par heure** durant les périodes de pointes est estimée à :

- 3.780 personnes assises et debout maximum (ratio 4 personnes/m²) ;
- 3.080 personnes assises et debout de manière relativement confortable (ratio 3 personnes/m²).

La mise en place des trams T4000 et les interventions sur la ligne afin de l'optimiser dans le cadre de l'alternative 0 n'influencent pas significativement la fréquence et la régularité sur la ligne, qui restent alors identiques à la situation existante.

B. Optimisation de l'infrastructure

Les optimisations de l'alternative 0 sont reprises sous 2 catégories :

- Les optimisations prévues à court terme : il s'agit des modifications certaines, prévues dans les budgets de la STIB, qui constituent donc une situation prévisible.
- Les optimisations envisageables à moyen terme : il s'agit de pistes de réflexion de la STIB, non appuyées par des études spécifiques (faisabilité technique, économique, ...), mises sur la table pour la définition de l'alternative 0 dans le cadre de la présente étude.

B.1. Optimisations prévues à court-terme

Entre 2020 et 2025, la STIB prévoit de **renouveler les rails de certains tronçons** de la ligne de tram 55 en raison de leur **usure ou de leur fin de vie**. En effet, il est indispensable de les remplacer une fois devenus vétustes afin de maintenir une vitesse optimale, de garantir la sécurité des usagers et de limiter les niveaux de bruit et les vibrations.

Les tronçons de voies renouvelés sur le tracé de la ligne 55 sont les suivants (localisés sur le plan suivant).

4 Evaluation des émissions du projet et des alternatives

	Adresse	Tronçon	Nombres de voies	Longueur des rails
1	n°31 rue Edouard Dekoster	25 m	2 voies/4 rails	100 m
2	n°23 place de la Paix	57,7 m	2 voies/4 rails	230 m
3	Intersection rue du Biplan/rue Frans Van Cutsem	25 m	2 voies/4 rails	100 m
4	Rue Edouard Stuckens	400 m	1 voie/2 rails	800 m
5	Rue Edouard Stuckens	212,5 m	1 voie/2 rails	850 m
6	Chaussée d'Helmet	1000 m	1 voie/2 rails	2000 m
7	Rue Walhem	350 m	1 voie/2 rails	700 m
8	Rue Edouard Dekoster et rue Fonson	600 m	1 voie/2 rails	1.200 m
Longueur totale des rails				5.980 m

Tableau 123 : Données de renouvellement du tracé (ARIES, 2020 d'après STIB)

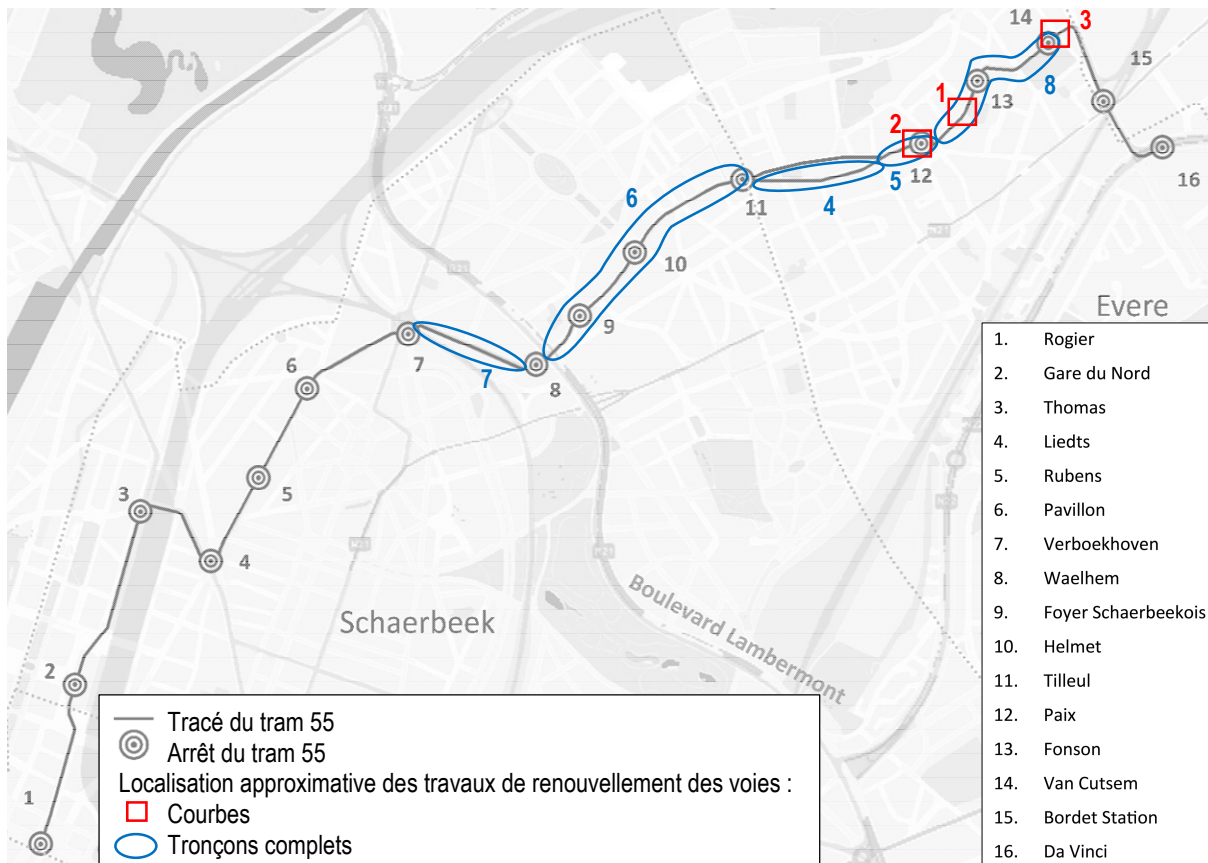


Figure 22 : Localisation des travaux de renouvellement des voies du tram 55 (ARIES sur fond BruGIS, 2020)

La STIB ne dispose pas à l'heure actuelle de précisions quant aux durées des travaux ni aux déviations et signalisations qui seront mises en place. Ainsi, seuls les intrants des matériaux renouvelés, le fret entrant relatif à ces matériaux et les consommations d'énergie des engins de

chantier nécessaires à la mise en œuvre des matériaux sont évalués dans le bilan carbone. Le reste des postes est considéré comme négligeable au vu de l'impact relativement faible de ce chantier.

B.1.1. Intrants

Le poste Intrants représente les matériaux mis en œuvre pour le renouvellement des rails, à savoir l'acier. En termes de données d'activité, le tableau ci-dessous reprend les principales données et hypothèses considérées, ainsi que les quantités d'acier.

Grandeur	Unité	Quantité
Longueur des rails	m	5.980
Masse linéique*	kg/m	49,97
Quantité d'acier	t	299

* D'après informations recueillies auprès de BMN

Tableau 124 : Données de renouvellements du tracé (ARIES, 2020 d'après STIB)

Le facteur d'émission considéré pour l'acier est de 1.804 kg eqCO₂/t⁶¹. Les émissions carbone liées à la production de l'acier nécessaire au renouvellement des rails usagés sont estimées à **539 teqCO₂**.

B.1.2. Fret entrant

Le poste Fret entrant correspond à **l'acheminement de l'acier** considéré dans le poste Intrants.

Les données d'activité liées au fret sont exprimées en tonnes-km. Les hypothèses retenues sont les mêmes que celle du projet introduit⁶², à savoir que l'acier des rails de roulement est supposé provenir d'un laminoir situé à Donawitz en Autriche (à 1050 km du chantier).

Les tonnages-kilomètres correspondant à l'acheminement de l'acier depuis l'entreprise jusqu'au chantier sont donc de **313.950 t.km**.

Le facteur d'émission lié au fret dépend du mode de transport utilisé. Comme pour le projet Métro Nord, il est envisagé de recourir à des semi-remorques d'une capacité de 20 t. Le facteur d'émission considéré pour le transport de l'acier s'élève à 0,0919 kg eqCO₂/t.km.

Les émissions carbone liées au fret nécessaire à l'approvisionnement en acier sont de **29 teqCO₂**.

B.1.3. Consommation des engins de chantiers pour la mise en œuvre des matériaux

Les consommations d'énergie liées aux engins de chantiers ne sont pas aisées à évaluer de façon tangible en amont de la mise en œuvre effective de celui-ci, en raison des grandes incertitudes relatives aux méthodes d'exécution à partir desquelles le nombre, la nature exacte des engins de chantier (marque, modèle, puissance, ...) et leur durée d'utilisation sont définis, très variables d'un projet à un autre. Il s'agit dès lors d'obtenir un ordre de grandeur réaliste relative à cette

⁶¹ Voir section Partie 1 :4.1.1.2.A.2

⁶² Voir section Partie 1 :4.1.1.2.G.1.1

source d'émission. Tout comme pour la construction de l'infrastructure du métro, une approche top-down à partir d'indicateurs globaux est privilégiée et retenue⁶³.

La donnée d'activité est calculée à partir d'une consommation spécifique de fuel exprimée par unité de volume de matériaux mis en œuvre, soit 80 kWh/m³ pour l'acier. En considérant une masse volumique de 7,8 t/m³ pour l'acier, cela conduit à une quantité totale d'acier de 385 m³ et à des consommations de fuel de **3.040 kWh**.

Le facteur d'émission utilisé, issu de la Base Carbone, est fixé à 0,323 kg eqCO₂/kWh PCI (gazole non routier pour usage par des sources mobiles).

Les émissions carbone liées aux consommations d'énergie des engins de chantier sont de **981 kg eqCO₂, soit 1 tonne de CO₂**.

B.2. Optimisations envisageables à moyen-terme

Le tram T4000 mesure 43,22 m de long, soit une augmentation de 11,37 m par rapport au T3000. Les arrêts actuels, dont la plupart sont dimensionnés pour des trams T3000, doivent donc être agrandis.

Mise à part la longueur, les autres dimensions du T4000 (largeur et hauteur du tram, dimensions intérieures, etc.) sont identiques au T3000. L'infrastructure nécessaire (voies, alimentation électrique, dépôt, etc.) est également identique pour les 2 types de tram. En effet, des trams T4000 circulent déjà aujourd'hui sur le tracé du tram 55. L'infrastructure est en effet partagée avec des lignes exploitant des T4000. En outre, des T4000 l'empruntent pour accéder au dépôt de Haren.

Les arrêts nécessitant une extension ou un déplacement sont présentés au tableau suivant.

⁶³ Voir section Partie 1 :4.1.1.2.A.2

Arrêt	Extension de l'arrêt (m)	
	Direction Da Vinci	Direction Rogier
Rogier	Non modifié	Non modifié
Gare du Nord	Non modifié	Non modifié
Thomas	Non modifié	Non modifié
Liedts	Non modifié	Déplacé
Rubens	-	+1
Pavillon	Non modifié	Non modifié
Verboekhoven	Déplacé	Déplacé
Waelhem	+11	Non modifié
Foyer Schaerbeekois	+5	+11
Helmet	+3	+10
Tilleul	+1	Déplacé
Paix	+8	+8
Fonson	+9	+9
Van Cutsem	+10	+10
Bordet Station	Non modifié	Non modifié
Da Vinci	Non modifié	Non modifié

**Tableau 125 : Extensions des arrêts du tram 55 au gabarit T4000
(ARIES sur base de STIB, 2020)**

D'après les informations de la STIB⁶⁴, un arrêt doit être d'une longueur adaptée aux véhicules qui la desservent, soit d'au moins 45 m pour un arrêt de tram standard. La largeur minimale est de 3 m lorsqu'il s'agit d'un embarcadère tram en site propre, et de 1,50 m pour un arrêt en voirie partagée. Enfin, la hauteur de bordure d'arrêt est d'environ 27,5 cm.

Ces informations permettent d'estimer les quantités de matériaux nécessaires à l'extension ou aux déplacements de ces arrêts dans le cadre de l'optimisation de la ligne 55. Par hypothèse, l'ensemble de ces arrêts est considéré construit en béton. Chacun arrêt présente les dimensions suivantes : 3 m de large, 0,28 m d'épaisseur et une longueur totale de 45 m.

B.2.1. Intrants

Les données d'activité correspondent aux quantités de béton entrant dans l'exécution de l'ouvrage d'extension des arrêts.

Le tableau ci-dessous reprend les quantités de béton évalués pour l'extension et déplacement des arrêts de la ligne 55.

⁶⁴ Source : STIB (2015) 4. *Principe pour l'aménagement d'un arrêt accessible et confortable dans le réseau de surface*

Arrêts	Extension d'arrêts (m)			Quantité** (m³)
	Direction Da Vinci	Direction Rogier	Longueur totale	
Liedts	-	45*	45	37,8
Rubens	-	1	1	0,84
Verboekhoven	45*	45*	90	75,6
Waelhem	11	-	11	9,24
Foyer Schaerbeekois	5	11	16	13,44
Helmet	3	10	13	10,92
Tilleul	1	45*	46	38,64
Paix	8	8	16	13,44
Fonson	9	9	18	15,12
Van Cutsem	10	10	20	16,8
Volume total de béton			276	231,84

* On considère une extension de 45 m pour un déplacement d'arrêt, soit la longueur standard d'un arrêt de tram

** On multiplie la longueur par sa largeur (3m) et son épaisseur (0,28m)

Tableau 126 : Quantités de béton mises en œuvre pour l'extension et le déplacement des arrêts de la ligne 55 (ARIES sur base de STIB, 2020)

Les facteurs d'émission correspondants sont donc exprimés en quantités de CO₂ émises par m³ ou tonne de matériaux. A l'instar de l'approche suivie pour la construction des infrastructures, ceux-ci sont définis en fonction de la classe de résistance du béton utilisé. Dans le cadre de l'extension des arrêts, un béton de classe C30/37 est généralement utilisé pour les bordures de quais de tramways et les dalles de quai pour les métros, et présente un facteur d'émission de **248 kg eqCO₂/m³**.

Les émissions carbone liées à la production de béton nécessaire à l'extension et le déplacement des arrêts sont estimées à **57 teqCO₂**.

B.2.2. Fret entrant

Le poste Fret entrant correspond à l'**acheminement de béton** considéré dans le poste Intrants.

Les données d'activité liées au fret sont exprimées en tonnes.km, ce qui suppose de connaître les quantités de matériaux exprimées en termes de masse, ce qui n'est pas le cas du béton. L'hypothèse retenue est reprise de l'analyse Construction de l'infrastructure du projet de métro, où l'on fixe la masse volumique à 2,3t/m³. La quantité de béton à transporter est donc de **533 tonnes**.

La provenance du béton prise en compte est également la même que pour le projet de construction du métro. Par hypothèse, le béton utilisé sur les chantiers est considéré prêt à l'emploi. Le tracé de la ligne 55 est localisé non loin de centrales à béton susceptibles d'alimenter les différents chantiers (distances inférieures à 10 km). Sur base des quatre centrales identifiées en région bruxelloise à proximité du tracé, et vu la quantité relativement faible de béton à acheminer (en comparaison au projet de construction de métro), l'hypothèse considérée ici est de prendre la distance maximale entre les lieux de chantiers et les centrales. D'après le Tableau

31, la distance la plus importante est de 6,3 km, soit la distance entre la centrale à béton « Inter-Béton » et la station Bordet.

Le tonnage-kilomètres estimé est de **3.359 t.km**

Le facteur d'émission lié au fret dépend du mode de transport utilisé. Il est envisagé de recourir à des camions-toupies d'une capacité de 6 m³. Le facteur d'émission considéré pour le transport du béton est de 0,124 kg eqCO₂/t.km. Cette valeur est issue de la Base Carbone et correspond, par hypothèse, à un camion rigide, présentant une PTAC comprise entre 20 t et 26 t et circulant au diesel routier avec une incorporation de 7% de biodiesel. Les hypothèses sous-jacentes consistent à considérer un taux de remplissage de 60% et un taux de retour à vide de 17%.

Les émissions carbone liées au fret nécessaire à l'approvisionnement en béton sont de **417 kg eqCO₂, soit 0,4 tonne de CO₂**.

B.2.3. Consommation des engins de chantiers pour la mise en œuvre des matériaux

Les consommations d'énergie liées aux engins de chantiers ne sont pas aisées à évaluer de façon tangible en amont de la mise en œuvre effective de celui-ci, en raison des grandes incertitudes relatives aux méthodes d'exécution à partir desquelles le nombre, la nature exacte des engins de chantier (marque, modèle, puissance, ...) et leur durée d'utilisation sont définis, très variable d'un projet à un autre. Il s'agit dès lors d'obtenir un ordre de grandeur réaliste relative à cette source d'émission. Tout comme pour la construction de l'infrastructure du métro, une approche top-down à partir d'indicateurs globaux est privilégiée et retenue⁶⁵.

La donnée d'activité est calculée à partir d'une consommation spécifique de fuel exprimée par unité de volume de matériaux mis en œuvre, soit 70 kWh/m³ pour le béton, soit **16.240 kWh**.

Le facteur d'émission utilisé issu de la Base Carbone est fixé à 0,323 kg eqCO₂/kWh PCI (gazole non routier pour usage par des sources mobiles).

Les émissions carbone liées aux consommations d'énergie des engins de chantier sont de **5.245 kg eqCO₂, soit 5 teqCO₂**.

C. Synthèse

Le tableau ci-dessous reprend les principales caractéristiques et émissions calculées pour les trams T4000, ainsi que certaines caractéristiques de la ligne 55 dans le cas de l'alternative 0.

⁶⁵ Voir section Partie 1 :4.1.1.2.A.2

4 Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Fonctionnement de la ligne		
Composantes	Type d'évaluation	Données
Matériel roulant (T4000)	Capacité	252 places assises et debout
	Consommation d'énergie	Max : 1,66 kg eqCO ₂ /(km-tram) Min : 0,82 kg eqCO ₂ /(km-tram)
Caractéristique de la ligne	Capacité de la ligne	3780 personnes/h (4 personnes/m ²) 3080 personnes/h (3 personnes/m ²)
	Fréquence	4 à 20 minutes
	Temps de parcours	Très variable/beaucoup d'irrégularités
Optimisation de la ligne		
Poste	Source	Quantités (teqCO ₂)
Energie (sources mobiles de combustion)	Consommations engins de chantier pour mise en œuvre matériaux	6
Intrants	Béton	57
	Acier	539
	Sous-total Intrants	596
Fret entrant	Béton	0,4
	Acier	29
	Sous-total Fret entrant	29,4
Sous-total infrastructure		631

Tableau 127 : Synthèse des résultats – Alternative 0 (ARIES, 2020)

4.2.2.4. Alternative 0+

A. Fonctionnement de la ligne

Pour rappel, la définition de l'alternative 0+ du projet Métro Nord dans l'étude d'incidences est la suivante :

« Cette alternative prendra en compte l'optimisation de la ligne 55 via des opérations techniques permettant d'en améliorer la vitesse commerciale et la fréquence (déplacement d'arrêt, site propre, tunnels, changement de sens de circulation, etc...). »

Il s'agit donc d'une situation optimisée de la situation existante, portant sur les paramètres de vitesse et de fréquence de manière à obtenir une ligne pouvant être qualifiée de Haut Niveau de Service (HNS).

Il est considéré pour cette alternative que l'ensemble des améliorations de l'alternative 0 ont déjà été intégrées, à savoir la mise en exploitation du modèle de tram T4000 et les adaptations nécessaires au niveau des arrêts (allongement des quais et relocalisations des arrêts dans l'évaluation du bilan carbone).

L'alternative 0+ se caractérise par la mise en site propre de l'ensemble du tracé. Cette optimisation de la ligne ne concerne que les portions du tracé qui ne le sont pas déjà, à savoir le

tronçon démarrant à la place Liedts et terminant sur Houtweg. Les principaux aménagements prévus au niveau des voiries traversées par le tram sont décrits dans le livre Tram.

Voir Livre V Tram – Partie 1 Chapitre 5. Présentation de l'alternative 0+, point 5.2.3

A.1. Description du matériel roulant

La description du tramway T4000 prévu dans l'alternative 0+ est détaillée dans la section 4.2.2.3.A.1, relative à l'alternative 0.

A.2. Caractéristiques de la ligne

Contrairement à l'alternative 0, les **interventions de mise en site propre de l'ensemble du tracé améliore la régularité et le temps de parcours** des tramways sur la ligne. En effet, la variabilité du temps de parcours pour un usager entre 2 moments de la journée est plus faible. La circulation automobile n'est plus source de ralentissement des trams aux heures de pointe. Cependant, toute comme l'alternative 0, les interventions sur la ligne n'influencent pas significativement la fréquence de la ligne, qui restent alors identiques à la situation existante.

La mise en site propre est un atout pour le voyageur qui voit son temps de parcours total réduit et est assuré d'une efficacité de circulation. Mais cette mise en site propre présente également un avantage sur les consommations d'énergie. Les irrégularités engendrent des accélérations et des freinages fréquents, entraînant une hausse dans les consommations d'énergie et par conséquent des émissions de CO₂. La diminution de ces irrégularités avec la mise en site propre permettra aux conducteurs d'**adopter une écoconduite** dont l'avantage est de réduire les consommations d'énergie.

B. Optimisation de l'infrastructure

Pour calculer les émissions carbone d'une mise en site propre dans le bilan carbone, on considère le **renouvellement complet des rails et des voiries sur l'ensemble du tracé de la ligne 55**. Par hypothèse, les surfaces des voiries sont calculées de façade à façade, sur la longueur des différentes rues qui constituent le tracé (de la place Liedts à Houtweg).

B.1. Intrants

B.1.1. Béton

Les données d'activité sont les quantités de matériaux à mettre en œuvre. Une hypothèse simplificatrice consiste à considérer que l'ensemble des voiries est renouvelé, de façade à façade. Celles-ci sont revêtues de béton (pavés en béton et stabilisé), d'une épaisseur de 50 cm.

Les largeurs de voiries sont décrites dans l'atlas cartographique de l'étude d'incidences. Les données sont reprises dans le tableau ci-dessous. Par hypothèses, les valeurs retenues pour les largeurs de voiries sont les largeurs minimales.

Localisation	Largeur voiries	Longueur de voirie	Surfaces des voiries
Rue Gallait	15,5 m	625 m	9.687,5 m ²
Rue Van Oost	15,4 m	300 m	4.620 m ²
Rue Waelhem	15,8 m	400 m	6.320 m ²
Chaussée de Helmet (tunnel)	16 m	100 m	1.600 m ²
Chaussée de Helmet	18,4 m	120 m	2.208 m ²
Chaussée de Helmet	14 m	780 m	10.920 m ²
Rue Vanhamme	8,4 m	217 m	1.822,8 m ²
	10,1 m	220 m	2.222 m ²
Rue E. Stuckens	6,4 m	235 m	1.504 m ²
	9,5 m	218 m	2.071 m ²
Rue E. Stuckens (place Paix)	14,4 m	200 m	2.880 m ²
Rue E. Dekoster	11,4 m	130 m	1.482 m ²
	13,5 m	170 m	2.295 m ²
Rue Fonson	14,5 m	115 m	1.667,5 m ²
	9,5 m	185 m	1.757,5 m ²
Rue Biplan	13,7 m	50 m	685 m ²
Surface totale			53.063,3 m²

Tableau 128 : Données des surfaces de voiries (ARIES, 2020 d'après STIB)

En multipliant les surfaces par l'épaisseur des voiries de 50 cm, la quantité totale de béton estimée est de **26.531,65 m³**. Par hypothèse, le volume de béton comprend les aménagements spécifiques tels que les arrêts. Les données d'activité correspondent aux quantités de béton entrants dans l'exécution de l'ouvrage de mise en site propre. Les facteurs d'émission correspondants sont donc exprimés en quantités de CO₂ émises par m³.

Les facteurs d'émission correspondants sont donc exprimés en quantités de CO₂ émises par m³ ou tonne de matériaux. A l'instar de l'approche suivie pour la construction des infrastructures, ceux-ci sont définis en fonction de la classe de résistance du béton utilisé. Dans le cadre de l'extension des arrêts, un béton de classe C30/37 est généralement utilisé pour les bordures de quais de tramways et les dalles de quai pour les métros, et présente un facteur d'émission de **248 kg eqCO₂/m³**.

Les émissions carbone liées à la production de béton nécessaire à la mise en site propre sont estimées à **6.580 teqCO₂**.

B.1.2. Acier

La mise en site propre s'effectue entre la place Liedts et Houtweg. La donnée d'activité correspond aux quantités d'acier mises en œuvre. Le tableau ci-dessous reprend les longueurs de rails nécessaires aux travaux de rénovation.

Rue	Longueur du tracé (m)	Longueur des rails*(m)
Rue Gallait	625	2.500
Rue Van Oost	300	1.200
Rue Waelhem	400	1.600
Chaussée de Helmet	1.000	4.000
Rue Edouard Stuckens/ Rue Henri Van Hamme	450	1.800
Rue Edouard Stuckens (place de la Paix)	200	800
Rue Edouard Dekoster	300	1.200
Rue Fonson	300	1.200
Rue du Biplan	50	200
Longueur totale des rails	3.625	14.500

* Les voies de tramways sont constituées de 2 voies et 4 rails

Tableau 129 : Données des longueurs des rails (ARIES, 2020 d'après STIB)

Le tableau ci-dessous reprend les quantités d'acier nécessaires dans le poste Intrants – Acier en fonction de la longueur des rails et de leur masse linéique.

Grandeur	Unité	Quantité
Longueur des rails	m	14.500
Masse linéique*	kg/m	49,97
Quantité d'acier	t	725

* D'après informations recueillies auprès de BMN

Tableau 130 : Données de renouvellements du tracé (ARIES, 2020 d'après STIB)

Le facteur d'émission considéré pour l'acier est de 1.804 kg eqCO₂/t. Les émissions carbone liées à la production de l'acier nécessaire au renouvellement des rails usagés sont estimées à **1308 teqCO₂**.

B.2. Fret entrant

Le poste Fret entrant correspond à **l'acheminement de béton et d'acier** considéré dans le poste Intrants.

Les données d'activité liées au fret sont exprimées en tonnes.km, ce qui suppose de connaître les quantités de matériaux exprimées en termes de masse, ce qui n'est pas le cas du béton, dont les quantités sont exprimées en volume. L'hypothèse retenue est reprise de l'analyse Construction de l'infrastructure du projet de métro, consiste à considérer une masse volumique de 2,3 t/m³.

B.2.1. Béton

Pour la détermination de la donnée d'activité, la quantité de béton à transporter est donc de **61.023 tonnes**.

Les hypothèses sur la provenance du béton considérées sont les mêmes que celles prises pour le fret entrant du béton dans le cas de l'alternative 0.

Le tonnage-kilomètres moyen est estimé à **384.443 t.km**.

Les hypothèses relatives au facteur d'émission sont également identiques à celles prises dans le cas de l'alternative 0. Le facteur d'émission considéré pour le transport du béton est dès lors de 0,124 kg eqCO₂/t.km.

Les émissions carbone liées au fret nécessaire à l'approvisionnement en béton sont de **47.671 kg eqCO₂, soit 48 teqCO₂**.

B.2.2. Acier

Les données d'activité liées au fret sont exprimées en tonnes-km. Les hypothèses retenues consistent à considérer que l'acier des rails de roulement provient d'un laminoir situé à Donawitz en Autriche. Les tonnages-kilomètres correspondant à l'acheminement de l'acier depuis l'entreprise jusqu'au chantier sont donc de **761.250 t.km**.

Le facteur d'émission lié au fret dépend du mode transport utilisé. Comme pour le projet Métro Nord, il est envisagé de recourir à des semi-remorques d'une capacité de 20 t. Le facteur d'émission considéré pour le transport de l'acier s'élève à 0,0919 kg eqCO₂/t.km.

Les émissions carbone liées au fret nécessaire à l'approvisionnement en acier sont de **70 teqCO₂**.

B.3. Consommation des engins de chantiers pour la mise en œuvre des matériaux

De manière analogue à ce qui précède, les données d'activité sont calculées à partir de consommations spécifiques de fuel exprimées par unité de volume de matériaux mis en œuvre (70 kWh/m³ pour le béton et 80 kWh/m³ pour l'acier).

Les données d'activité correspondent aux consommations de fuel, soit **1.857.215 kWh pour le béton et 7.440 kWh pour l'acier**⁶⁶.

Le facteur d'émission utilisé, issu de la Base Carbone, est fixé à 0,323 kg eqCO₂/kWh PCI (gazole non routier pour usage par des sources mobiles).

Les émissions carbone totales liées aux consommations d'énergie des engins de chantier sont de **602 teqCO₂**.

C. Synthèse

Le tableau ci-dessous reprend les principales caractéristiques et émissions calculées pour les trams T4000, ainsi que certaines caractéristiques de la ligne 55 dans le cas de l'alternative 0+.

⁶⁶ En considérant une masse volumique de l'acier de 7,8 t/m³

4 Evaluation des émissions du projet et des alternatives

Fonctionnement de la ligne		
Composantes	Type d'évaluation	Données
Matériel roulant (T4000)	Capacité	252 places assises et debout
	Consommation d'énergie	Max : 1,66 kg eqCO ₂ /(km-tram) Min : 0,82 kg eqCO ₂ /(km-tram)
Caractéristique de la ligne	Capacité de la ligne	3780 personnes/h (4 personnes/m ²) 3080 personnes/h (3 personnes/m ²)
	Fréquence	4 à 20 minutes
	Temps de parcours	Régularité/baisse du temps de parcours
Optimisation de la ligne		
Poste	Source	Quantités (teqCO ₂)
Energie (sources mobiles de combustion)	Consommations engins de chantier pour mise en œuvre matériaux	602
Intrants	Béton	6.580
	Acier	1.308
	Sous-total Intrants	7.888
Fret entrant	Béton	48
	Acier	70
	Sous-total Fret entrant	118
Sous-total infrastructure		8.608

Tableau 131 : Synthèse des résultats – Alternative 0+ (ARIES, 2020)

4.2.2.5. Synthèses des résultats – comparaison des alternatives

La comparaison de la situation existante avec les deux alternatives s'effectue en deux étapes. Dans un premier temps, une **comparaison qualitative des principales caractéristiques du matériel roulant** (notamment concernant l'énergie de traction liée au fonctionnement de la ligne) **et de la ligne** est présentée. Ensuite, un **bilan carbone simplifié permet d'estimer les émissions carbone engendrées par les travaux de rénovation de la ligne pour les alternatives 0 et 0+** par rapport à la situation existante.

Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des résultats des trois scénarios d'évaluation du bilan carbone. Les chiffres entre parenthèses indiquent les évolutions par rapport à la situation existante.

4 Evaluation des émissions du projet et des alternatives

	Situation existante	Alternative 0	Alternative 0+
Informations influençant les émissions carbone liées au fonctionnement de la ligne			
Matériel roulant	T3000	T4000	T4000
Capacité	180 places assises et debout	252 places assises et debout (+40%)	252 places assises et debout (+40%)
Consommations énergétiques	Max* : 1,27 kg eqCO ₂ /(km-tram) Min** : 0,66 kg eqCO ₂ /(km-tram)	Max* : 1,66 kg eqCO ₂ /(km-tram) (+30%) Min** : 0,82 kg eqCO ₂ /(km-tram) (+25%)	Max* : 1,66 kg eqCO ₂ /(km-tram) (+30%) Min** : 0,82 kg eqCO ₂ /(km-tram) (+25%)
Capacité de la ligne	2700 personnes/h (4 p/m ²) 2200 personnes/h (3 p/m ²)	3780 personnes/h (4 p/m ²) 3080 personnes/h (3 p/m ²) (+40%)	3780 personnes/h (4 p/m ²) 3080 personnes/h (3 p/m ²) (+40%)
Fréquence	4 à 20 minutes	4 à 20 minutes	4 à 20 minutes
Temps de parcours/régularité	Beaucoup d'irrégularité/Très variable	Beaucoup d'irrégularité/Temps de parcours très variable	Régularité/Baisse du temps de parcours
Emissions carbone liées aux travaux d'optimisation de l'infrastructure par rapport à la situation existante (tCO₂)			
Energie	-	6	602
Intrants	-	596	7.888
Fret entrant	-	29	118
Total	-	631	8.608

* Sans récupération d'énergie

** Avec récupération d'énergie

Tableau 132 : Synthèse des résultats – Comparaison des alternatives (ARIES, 2020)

A la lecture de ce tableau et des différents sujets abordés dans cette alternative, plusieurs conclusions peuvent être tirées :

- Tout d'abord, l'utilisation d'un T4000 dans les alternatives 0 et 0+ permet un accroissement de 40% de la capacité maximale du tramway et donc de la ligne pendant une journée (2.700 personnes/h → 3.780 personnes/h en heure de pointe) par rapport à la situation existante. L'impact des émissions carbone rapportées par passager est donc logiquement diminué.
- En raison de son poids et de ses dimensions plus importantes permettant d'accueillir un plus grand nombre de passagers, la **consommation énergétique théorique d'un tram Long (T4000) est plus élevée qu'un tram Court (T3000)**⁶⁷. Elle augmente de 30% (dans l'hypothèse où il n'y a pas de récupération d'énergie), ce qui amène également une augmentation des émissions carbone théoriques des tramways en circulation. Cependant, ces **consommations théoriques ne sont pas inscrites dans un contexte** et les paramètres de déplacements des tramways sont considérés

⁶⁷ Pour rappel, on se base sur les consommations d'énergie des trams longs et courts des TNG pour estimer les consommations d'énergie des T3000 et T4000.

comme parfaitement identiques dans les trois scénarios, ce qui ne devrait pas être le cas dans la réalité.

- En effet, dans la **situation existante**, les tramways subissent de nombreuses irrégularités sur la ligne 55, **augmentant leur consommation d'énergie en raison d'accélération et de freinages répétés**.
- Dans **l'alternative 0**, la **circulation change très peu** et reste irrégulière, entraînant potentiellement de plus grandes consommations d'énergie encore, dues aux trams T4000 qui consomment plus.
- En revanche, dans **l'alternative 0+**, la **mise en site propre de la ligne améliore la régularité de la ligne** et permet de diminuer les consommations d'énergie et par conséquent les émissions carbone. Le tramway peut alors adopter une écoconduite puisque les accélérations et les freinages inutiles peuvent être limités. Cette baisse des émissions est, de plus, bénéfique sur le long terme.
- La **fréquence de la ligne reste quasiment inchangée** malgré les travaux d'optimisation de la ligne. La comparaison des émissions carbone entre la situation existante et les alternatives liées à la fréquence n'est donc pas évaluée.
- Les émissions totales de CO₂ estimées pour les **travaux de mise en site propre de l'alternative 0+** sont de l'ordre de **9.000 tonnes**, pour lesquels seuls les postes les plus importants sont évalués. Ces émissions sont bien plus importantes que l'alternative 0, dont les travaux engendrent **630 teqCO₂**. Cependant, il est important de rappeler que ces émissions induites seront **compensées sur le long terme par les émissions évitées dues à l'amélioration de circulation** des tramways sur la ligne.
- Enfin, il n'est pas **possible d'affirmer que les alternatives relatives au tram permettent, à elles seules, d'engendrer un report modal significatif** et de provoquer une diminution des émissions de CO₂ en Région de Bruxelles-Capitale. Les modifications apportées par ces alternatives entraînent principalement une amélioration du confort des voyageurs et de la circulation de la ligne.

5. Contextualisation des résultats

5.1. Mise en relation avec des indicateurs de mobilité

Les émissions pour la construction des infrastructures et pour l'exploitation de la ligne calculées précédemment peuvent être annualisées afin d'être contextualisées.

Pour le projet de base monotube, les émissions de gaz à effet de serre liées à la construction des infrastructures ont été évaluées à 227.012 teqCO₂ (dans le cas où le béton est composé de ciment CEM III)⁶⁸, tandis que les émissions totales engendrées par l'exploitation de la ligne sur les 50 premières années, correspondant au périmètre temporel de l'étude choisi, ont été estimées à 267.121 teqCO₂.

En considérant une durée d'amortissement de 50 ans pour les émissions relatives à la construction, les émissions annualisées sont de 4.540 teqCO₂, tandis que les émissions moyennes annuelles liées à l'exploitation sont de 5.342 teqCO₂, soit un total de 9.882 teqCO₂.

En ne considérant que l'exploitation de la ligne, les émissions annualisées représentent environ 0,5% des **émissions annuelles de gaz à effet de serre relatives au secteur du transport en Région de Bruxelles-Capitale**. En 2018, ces dernières s'élevaient à 991 kteqCO₂, pour une moyenne de 1.018 kteqCO₂ pour les années 1990 à 2018⁶⁹. En considérant cette fois tant la construction des infrastructures que l'exploitation de la ligne, ce pourcentage est d'environ 1%.

Le **nombre de véhicules.kilomètres annuel relatif aux voitures particulières correspondant à ces émissions annualisées** peut être déduit en utilisant le facteur d'émission relatif aux voitures particulières, à savoir 0,193 kg eqCO₂/km (ou 0,193 kg eqCO₂/véhicule.km). Le nombre de véhicules.kilomètres à éviter s'élève donc à 51.202.073 véhicules.km par an. En considérant le fait que la distance moyenne annuelle parcourue par une voiture en Région de Bruxelles-Capitale est de l'ordre 15.000 km⁷⁰, cela représente environ 3.426 véhicules.

Ce chiffre peut ensuite être **comparé au nombre de véhicules.kilomètres relatif aux voitures particulières renseigné dans le plan Good Move de 2016**, qui s'élève à 3.084.413.000 pour l'ensemble de la Région de Bruxelles-Capitale. En considérant par hypothèse ce nombre constant pendant la durée du périmètre temporel fixé, la construction et l'exploitation du métro représentent alors 1,7% des déplacements effectués en voiture particulière, exprimés en véhicules.km. L'exploitation seule représente quant à elle 0,9% de ces déplacements. Il s'agit là de chiffres indicatifs, liés à une situation en un instant donné. Etant donné la durée d'amortissement considérée et les évolutions des pratiques de mobilité, de la démographie, ... qui sont susceptible d'avoir lieu dans l'intervalle, cette proportion est en effet amenée à varier dans le temps.

Cet exercice de contextualisation des émissions obtenues peut également être effectué pour **l'alternative bitube**. Toujours en considérant une durée d'amortissement de 50 ans pour les émissions de la construction, les émissions annualisées sont de 5.575 teqCO₂, tandis que les

⁶⁸ Hormis les voussoirs, pour lesquels l'utilisation de ciment CEM I est imposée.

⁶⁹ Source : inventaire d'émissions de gaz à effet de serre de la Région de Bruxelles-Capitale (Soumission 2020)

⁷⁰ Chiffre de 2016 : 14.945 km/an. Cette distance n'est pas nécessairement parcourue en Région de Bruxelles-Capitale (Source : SPF Mobilité et Transports (2017). *Kilomètres parcourus par les véhicules belges en 2016*)

émissions moyennes annuelles pour l'exploitation sont de 5.383 teqCO₂. Le nombre de véhicules.kilomètres à éviter s'élève à 56.777.202 véhicules.km par an. Rapporté au nombre de véhicules.kilomètres relatif aux voitures particulières renseigné dans le plan Good Move de 2016, cela représente 1,8% des déplacements effectués, exprimés en véhicules.km, en faisant toujours l'hypothèse d'une évolution constante sur la durée du périmètre temporel fixé. Les émissions annualisées sont dès lors 10% plus élevées dans le cas de l'alternative bitube par rapport au projet de base monotube.

Par ailleurs, à titre d'ordre de grandeur indicatif, les **émissions annualisées pour le projet de base monotube** représentent l'équivalent des émissions annuelles d'environ 915 Belges, en considérant que chaque personne émet en moyenne 10,8 teqCO₂ par an⁷¹ pour l'ensemble de leurs activités (transport, utilisation des bâtiments, consommation, ...). Une fois encore, cette comparaison se rapporte à une situation en un instant donné et ne tient pas compte de l'évolution future des émissions au cours de la durée d'amortissement, notamment liée à l'évolution des comportements en termes de mobilité, ni de l'évolution démographique.

5.2. Evaluation d'un facteur d'émission propre à la mise en œuvre du projet

Il est intéressant d'**estimer l'ordre de grandeur du facteur d'émission correspondant à la mise en œuvre du projet Métro Nord**, en évaluant :

- Un facteur d'émission correspondant à **la construction et l'exploitation** ;
- Un facteur d'émission correspondant à **l'exploitation seule**. Ce facteur d'émission peut alors être comparé aux ordres de grandeur rencontrés dans la littérature.

L'ordre de grandeur du **facteur d'émission correspondant à la construction et l'exploitation du tronçon du Métro Nord (FE_{Métro nord})** peut être évalué sur base des émissions annualisées (voir section précédente) :

$$FE_{Métro\ nord} = \frac{E_{const.\ infrast.} + E_{exploit}}{N_{passagers.km}}$$

où :

- E_{const. Infrast} : émissions annualisées correspondant à la construction des infrastructures ;
- E_{exploit} : émissions moyennes annuelles correspondant à l'exploitation du tronçon ;
- N_{passagers.km} : nombre de passagers.km annuels.

Ce facteur d'émission est exprimé en geqCO₂/passager.km.

A ce stade, seul le nombre passagers.km est inconnu. Son évaluation fait appel à des hypothèses portant sur le nombre de passagers annuel et la distance parcourue.

Ce **nombre de passagers annuel** est calculé à partir :

⁷¹ Source : Eurostat (chiffre de l'année 2018) :
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020_rd300/default/table?lang=fr

- Du nombre de montées et de descentes en HPM⁷² (7-9h), calculées dans le livre Tunnel, sur base de la modélisation Musti ;
- D'une conversion des données HPM (7-9h), en considérant, par hypothèse, que le nombre de déplacements effectués sur cette tranche horaire représente 20% du nombre de déplacements journalier. La fréquentation est en outre, par hypothèse, considérée identique, quel que soit le jour (jour ouvrable, férié, week-end, ...).

La prise en compte de la **distance parcourue**, se base en premier lieu, également par hypothèse, sur la distance moyenne parcourue en transport en commun en Région de Bruxelles-Capitale, sur base des données fournies dans le Cahier de l'Observatoire de la mobilité de la RBC)⁷³, à savoir 4,4 km.

Certaines nuances doivent toutefois être apportées. Dans un premier temps, il n'est pas toujours possible de parcourir 4,4 km sur la ligne. C'est le cas, par exemple, de voyageurs prenant le métro à la station Riga en direction de Bordet. L'évaluation considère alors que, lorsqu'il n'est possible de parcourir cette distance sur le tronçon Liedts-Bordet⁷⁴, selon la station de départ/arrivée et le sens du trajet, la distance considérée est la distance maximale qu'il est possible de parcourir (la distance séparant les stations Riga et Bordet, dans le cas de l'exemple).

Dans un second temps, étant donné que le projet ne porte que sur un tronçon et non sur la totalité de la ligne, **deux approches** sont possibles :

- Les distances parcourues tiennent compte des portions de trajets effectués en dehors du tronçon Liedts-Bordet : il s'agit par exemple des portions de trajets effectués par des voyageurs qui prennent le métro à partir d'une station du tronçon Liedts-Bordet en direction d'Albert et qui en descendent à une station située au-delà de Liedts (ou, plus précisément, au-delà du puits P5).
- Les distances parcourues ne tiennent compte que des portions de trajets effectués sur le tronçon Liedts-Bordet.

Le tableau ci-dessous met en parallèle les distances maximales parcourues potentielles obtenues dans chacune de ces deux approches. Les colonnes « montée »/« descente » correspondent aux montées/descentes des voyageurs dans les stations concernées.

⁷² HPM : Heure de pointe du matin

⁷³ Source : Bruxelles Mobilité (2013). *Cahiers de l'Observatoire de la mobilité de la Région de Bruxelles-Capitale – Les pratiques de déplacements à Bruxelles*

⁷⁴ Il s'agit du tronçon accessible aux voyageurs, soit le tronçon entre le puits P5 et la station Bordet. Pour des raisons de lisibilité, ce tronçon sera appelé « tronçon Liedts-Bordet » dans la suite du texte.

Station de départ/arrivée	Déplacements <u>non limités</u> au tronçon Liedts-Bordet				Déplacements <u>limités</u> au tronçon Liedts-Bordet			
	Sens Nord > Bordet		Sens Bordet > Nord		Sens Nord > Bordet		Sens Bordet > Nord	
	Montée	Descente	Montée	Descente	Montée	Descente	Montée	Descente
Liedts	3,81	4,40	4,40	3,81	3,81	0,19	0,19	3,81
Colignon	3,18	4,40	4,40	3,18	3,18	0,95	0,95	3,18
Verboekhoven	2,58	4,40	4,40	2,58	2,58	1,57	1,57	2,58
Riga	2,00	4,40	4,40	2,00	2,00	2,11	2,11	2,00
Tilleul	1,29	4,40	4,40	1,29	1,29	2,82	2,82	1,29
Paix	0,87	4,40	4,40	0,87	0,87	3,26	3,26	0,87
Bordet	0,00	4,40	4,40	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00

Tableau 133 : Distances potentielles parcourues sur le tronçon Liedts-Bordet selon les 2 approches : portions de trajets limités ou non au tronçon Liedts-Bordet (ARIES, 2021)

Le tableau suivant reprend les nombres de montées et de descentes annuels au niveau de chacune des stations du tronçon Liedts-Bordet.

Station de départ/arrivée	Déplacements <u>non limités</u> au tronçon Liedts-Bordet		Déplacements <u>limités</u> au tronçon Liedts-Bordet	
	Sens Nord > Bordet	Sens Bordet > Nord	Sens Nord > Bordet	Sens Bordet > Nord
Liedts	2.020.275	3.100.675	3.398.150	3.724.825
Colignon	556.625	1.576.800	2.691.875	527.425
Verboekhoven	1.164.350	4.363.575	8.073.800	1.140.625
Riga	1.116.900	1.930.850	2.294.025	981.850
Tilleul	335.800	1.089.525	2.757.575	197.100
Paix	25.550	956.300	994.625	164.250
Bordet	0	7.270.800	4.602.650	0

Tableau 134 : Nombre de montées et de descentes annuels au niveau des stations du tronçon Liedts-Bordet (ARIES, 2021)

Ces données conduisent à une fréquentation totale annuelle de 57 millions de passagers.

Pour chacune des deux approches, le tableau ci-dessous synthétise les résultats obtenus :

- Nombre de passagers.km annuel obtenus à partir des valeurs ci-dessus ;
- Facteur d'émission pour la construction et l'exploitation du tronçon Liedts-Bordet ($FE_{\text{Métro Nord}}$), évalué pour la construction et l'exploitation d'une part et pour l'exploitation uniquement d'autre part.

		Déplacements <u>non limités</u> au tronçon Liedts-Bordet	Déplacements <u>limités</u> au tronçon Liedts-Bordet
Nombre de passagers.km		234.766.963	134.780.170
FE _{Métro Nord} [geqCO ₂ /passager.km]	Construction et exploitation	42,10	73,32
	Exploitation uniquement	22,76	39,64

Tableau 135 : Résultats obtenus (nombre de passagers.km et FE_{Métro Nord}) par les 2 approches d'évaluation de la distance parcourue – Projet de base monotube (ARIES, 2021)

Les 2 approches (distances parcourues limitées au tronçon Liedts-Bordet ou non) conduisent à des **résultats très différents**, mais présentent toutefois chacune un intérêt :

- Le fait de ne pas limiter les déplacements au tronçon Liedts-Bordet permet de rendre compte d'une situation plus réaliste de la fréquentation de la ligne M3 (de nombreux trajets concernent en effet les autres stations de la ligne) ;
- A l'inverse, le fait de limiter les déplacements au tronçon Liedts-Bordet, bien que correspondant à une situation plus théorique, permet de considérer les impacts en se focalisant sur l'objet de la demande.

Les écarts constatés mettent en lumière la **forte sensibilité du facteur d'émission au nombre de passagers.kilomètres**.

Aussi, en l'absence de données réelles, il est donc important et essentiel de considérer ces deux approches conjointement, sans dissocier les résultats obtenus correspondants.

Le facteur d'émission présente **potentiellement une forte sensibilité au nombre de passagers** : une fréquentation de la ligne réduite de moitié n'engendrera pas une réduction de moitié des émissions de gaz à effet de serre induites par l'exploitation de cette ligne (en partant du principe que les rames assurent a priori le service, quelle que soit la fréquentation), mais conduira en revanche au doublement du facteur d'émission exprimé en passagers.km⁷⁵.

Cette sensibilité montre l'intérêt d'assurer la fréquentation du futur tronçon Liedts-Bordet. La mise en service du métro ne sera dès lors efficace et intéressante en termes d'émissions de gaz à effet de serre que si sa fréquentation est favorisée par des politiques de mobilité coordonnées.

Les **ordres de grandeur des facteurs d'émission obtenus pour l'exploitation seule**, quelle que soit l'approche adoptée pour le calcul du nombre de passagers.km (distances parcourues limitées au tronçon Liedts-Bordet ou non), sont similaires à ceux rencontrés dans la littérature, à savoir quelques unités ou quelques dizaines de geqCO₂/passager.km. Les valeurs rencontrées sont en effet assez variables. Le site de la STIB renseigne un facteur d'émission de 20 geqCO₂/passager.km pour le métro, tandis que la Base Carbone de l'ADEME indique un facteur d'émission de l'ordre de 3 pour le métro en Ile-de-France (Paris) et de 5 geqCO₂/passager.km pour la catégorie trams, les métros et les trolleybus pour les agglomérations des autres régions de France⁷⁶. A titre illustratif, le facteur d'émission relatif au métro de Glasgow a été évalué à

⁷⁵ En faisant l'hypothèse que les distances parcourues restent identiques : le nombre de passagers parcourant une distance donnée entre 2 stations données est divisé par deux.

⁷⁶ Ces valeurs plus basses pourraient notamment s'expliquer par le mix énergétique utilisé pour la production d'électricité en France (où la part assurée par le nucléaire est plus importante qu'en Belgique).

42 geqCO₂/passager.km⁷⁷, tandis qu'une étude⁷⁸ mentionne des facteurs d'émission évalués pour les métros de Lisbonne, Bilbao et São Paulo assez disparates (respectivement 49, 28 et 4 geqCO₂/passager.km). L'article mentionnant ces facteurs d'émission indique que les différences sont dues à différents facteurs, tels que le mix énergétique, l'efficacité énergétique, la technologie utilisée, l'âge des infrastructures et du matériel roulant, le taux d'occupation, les fréquences, ...

En **comparaison avec le tram et dans le cas où seule l'exploitation est considérée**, les facteurs d'émission obtenus pour le métro présentent également un ordre de grandeur similaire au facteur d'émission du tram renseigné sur le site de la STIB (30 geqCO₂/passager.km, exploitation seule).

Les **facteurs d'émission obtenus sont également sensiblement inférieurs aux facteurs d'émission pour le bus** (Base Carbone (motorisation moyenne) : de l'ordre de 130 à 150 geqCO₂/passager.km selon la taille de l'agglomération, STIB : 110 geqCO₂/passager.km) et la voiture (Base Carbone (motorisation moyenne) : 193 geqCO₂/km ou 121 geqCO₂/passager.km, sur base de l'hypothèse d'une occupation moyenne de 1,6 passagers par véhicule).

Dans le cas de l'**alternative bitube**, les valeurs obtenues sont reprises dans le tableau ci-dessous.

		Déplacements <u>non</u> limités au tronçon Liedts-Bordet	Déplacements <u>limités</u> au tronçon Liedts-Bordet
Nombre de passagers.km		234.766.963	134.780.170
FE _{Métro Nord} [geqCO ₂ / passager.km]	Construction et exploitation	46,67	81,30
	Exploitation uniquement	22,93	39,94

Tableau 136 : Résultats obtenus (nombre de passagers.km et FE_{Métro Nord}) par les 2 approches d'évaluation de la distance parcourue – Alternative bitube (ARIES, 2021)

En considérant la construction des infrastructures et l'exploitation de la ligne, les facteurs d'émission obtenus sont environ 10% supérieurs à ceux obtenus pour le projet de base, mais restent globalement dans les ordres de grandeur mentionnés précédemment. En ne considérant que l'exploitation de la ligne, les facteurs d'émission sont cette fois similaires entre le projet de base et l'alternative. Cela s'explique par l'impact marginal de l'alternative sur l'exploitation.

En raison des évolutions précédemment citées en termes de mobilité, de technologies et également de mix énergétique, difficiles à prévoir et à quantifier étant donné l'intervalle de temps considéré, les comparaisons menées ici reposent sur des hypothèses de facteurs d'émission (voitures, tram, ...) constants. Dans les faits, il est important de garder à l'esprit que ces facteurs d'émission, de même que le facteur d'émission propre au tronçon Liedts-Bordet tel que défini ci-dessus devraient présenter une variation au cours du temps.

⁷⁷ Source : Department for Business, Energy and Industrial strategy (2020). *2020 Government greenhouse gas conversion factors for company reporting - Methodology Paper for Conversion factors Final Report* (Royaume-Uni)

⁷⁸ Source : Sanches de Andrade, de Almeida d'Agosto (2015). *Procedure for Calculating CO2 Emissions in the Operation of Integrated Subway and Bus Systems: Application in Rio de Janeiro Subway*

6. Difficultés rencontrées

Le bilan carbone est **réalisé en amont de la mise en œuvre de celui-ci**, à un stade où de nombreux paramètres n'ont pas encore été fixés. Les choix sont en effet laissés ultérieurement aux entreprises qui devront y apporter des réponses au moment de l'adjudication (tels que la composition des bétons, les engins de chantier utilisés, les futurs travaux de maintenance, ...). Les évaluations ont donc été réalisées en fonction des sources et des données disponibles lors de l'élaboration de l'étude.

De ce fait, de nombreuses inconnues subsistent, tant au niveau de la construction des infrastructures qu'au niveau du fonctionnement de la ligne. Aussi, un grand nombre d'hypothèses ont dû être posées afin d'obtenir des ordres de grandeur d'émissions. Ces hypothèses ont été élaborées sur base de valeurs moyennes, de données issues de la littérature, d'informations ou d'hypothèses fournies par la STIB ou BMN, ainsi que lors des différentes étapes de validation du Comité d'Accompagnement. Contrairement à des bilans carbone réalisés annuellement pour rendre compte la situation d'une entreprise, les estimations réalisées dans le présent bilan carbone comprennent donc de grandes incertitudes, liées principalement aux données d'activité. Le bilan carbone est **réalisé à un instant donné**, dans un contexte donné. En raison de l'ampleur et du calendrier du projet, certains paramètres sont amenés à évoluer avec le temps, en fonction des évolutions technologiques, des innovations, des opportunités, ...

Dans le cas du fret, par exemple, qui constitue le 3^{ème} poste d'émission en termes d'importance au niveau de la construction des infrastructures, en l'état actuel des informations à notre disposition, il conviendrait d'utiliser principalement la voie fluviale pour le transport des matériaux (principalement les intrants et les déblais). Il se pourrait toutefois que l'entreprise (belge ou européenne) qui remporte le marché ait son site de production de béton, d'acier et de voussoirs situé le long d'une voie ferrée. Cette situation pousserait le choix d'un transfert maximal vers un acheminement par voie ferrée et par conséquent, vers une utilisation renforcée du site du dépôt de Haren ou celui de Schaerbeek formation, au lieu du port de Bruxelles.

En particulier, les indicateurs liés à la mobilité, à l'aide desquels les résultats de cette étude sont contextualisés, sont également appelés à évoluer au cours des prochaines décennies, par les nouvelles pratiques de déplacements, les développements technologiques futurs, ... Ces évolutions étant difficiles à estimer et à appréhender, les indicateurs correspondants ont fait l'objet d'hypothèses. Il s'agit notamment des facteurs d'émission des différents modes de transport (véhicules particuliers, bus, tram, ...), du nombre de véhicules.kilomètres en Région de Bruxelles-Capitale (valeur du plan Good Move dont l'évolution est supposée constante), de la fréquentation estimée du tronçon Liedts-Bordet, ...).

Le bilan carbone est donc un outil informatif d'aide à la décision destiné à éclairer les administrations et le demandeur quant aux choix à faire sur certaines options qui seront données par les entreprises lors de la phase d'adjudication des travaux.

Enfin, les **émissions globales calculées dans le présent bilan carbone, concernant la construction des infrastructures et l'exploitation de la ligne, constituent un résultat brut**. L'ampleur et la vitesse d'amortissement de ces émissions grâce à des gains en termes de transfert modal que la future ligne de métro engendrera dépendront des multiples leviers à l'échelle régionale qui devront être activés pour favoriser ce transfert modal (développement d'autres lignes de transports en commun, politique de stationnement, réduction du nombre de bandes de circulation, fiscalité, péage urbain, ...).

Les impacts de la future ligne de métro en termes d'émissions de gaz à effet de serre seront conditionnés par la manière dont ces leviers seront mis en œuvre et pourront donc être favorables, neutres ou défavorables selon les cas. A l'heure où ce bilan carbone est rédigé, cela ne peut être déterminé, les modalités d'application de ces leviers étant encore largement inconnues.

7. Recommandations

7.1. Prise en compte de l'aspect bilan carbone dans le choix des autres matériaux

En termes d'émissions de gaz à effet de serre relatives aux matériaux (postes intrants et fret), le présent bilan carbone porte sur le béton, l'acier, le verre et certains équipements. Il s'agit en effet des postes les plus importants. Peu d'informations sur les autres matériaux sont en outre disponibles au stade actuel de l'étude.

Cependant, les potentielles émissions liées à ces autres matériaux ne devront pas être négligées et devront également être examinées avec attention, notamment lors du choix des matériaux de parachèvement des stations, de revêtement de sol des abords sur l'ensemble du périmètre d'intervention, ...

Il s'agira de prendre en considération la **nature** des matériaux elle-même, mais également de leur **degré de transformation**, de leur **origine géographique** et de leur **mode d'acheminement**.

7.2. Prise en compte du potentiel de réemploi, de réutilisation et de recyclabilité dans le choix des matériaux

La production de nouveaux matériaux engendre des émissions de gaz à effet de serre, parfois très importantes.

Afin de limiter ces émissions, il est nécessaire d'analyser la potentielle exploitation des matériaux au moment à partir duquel ils ne sont plus utilisés pour leur destination initiale dans le projet. Il s'agit d'optimiser le futur **potentiel de réemploi** (utilisation d'un matériau pour le même usage), **de réutilisation** (nouvelle utilisation d'un matériau devenu déchet pour le même usage ou un usage détourné) **ou de recyclabilité** (utilisation de la matière première d'un déchet pour un autre usage, nécessitant un traitement plus important que dans le cas de la réutilisation) **des matériaux mis en œuvre**.

En termes de bilan carbone, **privilégier le réemploi au recyclage** permet d'éviter les émissions liées au traitement des déchets.

A cette fin, outre les critères présentés dans la recommandation précédente, il sera nécessaire d'opter pour des **matériaux de qualité**, présentant une **grande durée de vie** et une **grande résistance aux sollicitations** auxquelles ils sont amenés à être confrontés (usure, dégradations par vandalisme, salissures, ...).

Cette attention sera notamment apportée au niveau des matériaux à moindre durée de vie et faisant l'objet de remplacements plus fréquents, tels que les matériaux de parachèvement (murs, châssis, vitrages, protections solaires, ...) et des équipements (luminaires, ...).

Il s'agira par ailleurs de privilégier les **matériaux et des assemblages favorisant la déconstruction sélective**, permettant de ce fait la récupération des éléments mis en place sans dégradation. L'usage de matériaux composites, dont il est moins aisé de séparer les constituants en vue d'une réutilisation potentielle, sera limité autant que possible.

En ce qui concerne des matériaux de revêtement, tels que la pierre bleue, **l'utilisation d'éléments de plus grande taille** favorisera également leur réemploi. Une plus grande liberté sera en effet laissée aux futurs utilisateurs de ces matériaux, en comparaison à des matériaux davantage débités en plus petits morceaux ou tronçons, dont les possibilités d'usages seront plus restreintes.

7.3. Prise en compte des critères liés au bilan carbone dans les cahiers des charges Travaux

Certains postes ont été identifiés comme engendrant des émissions de gaz à effet de serre importantes, au niveau de la construction des infrastructures.

Aussi, il est recommandé de prendre en compte cet aspect dans les cahiers des charges Travaux, dans l'établissement des critères de désignation des entreprises. Les postes concernés pourraient être, entre autres :

- Les matériaux, et plus particulièrement la composition des différents bétons à mettre en œuvre (type de ciment, ...) ;
- Le mode d'acheminement des matériaux, notamment des composants des bétons, des voussoirs et de l'acier ;
- Le mode d'évacuation des déblais.

8. Tableau de synthèse des recommandations

Incidences	Recommandations
Emissions de gaz à effet de serre liées aux matériaux non pris en compte dans le présent bilan carbone	Prendre en considération, dans le choix des autres matériaux, leur nature, leur degré de transformation, leur provenance géographique et leur mode d'acheminement.
Emissions de gaz à effet de serre liées à la production de nouveaux matériaux	Prendre en compte le potentiel de réemploi, de réutilisation et de recyclabilité dans le choix des matériaux. Par exemple : <ul style="list-style-type: none">• Privilégier le réemploi au recyclage afin d'éviter les émissions liées au traitement des déchets ;• Opter, notamment pour ce qui concerne les parachèvements et les équipements, pour des matériaux de qualité, présentant une grande durée de vie et une grande résistance aux sollicitations (usure, dégradations, salissures, ...) ;• Privilégier des matériaux et des assemblages favorisant la déconstruction sélective ;• Privilégier la mise en œuvre de matériaux de plus grande taille afin de favoriser leur réemploi par une plus grande liberté d'utilisation.
Emissions de gaz à effet de serre importantes pour certains postes	Prendre en compte l'aspect bilan carbone dans l'élaboration des critères de désignation des entreprises dans les cahiers des charges Travaux.

Tableau 137 : Tableau de synthèse des recommandations (ARIES, 2021)

9. Conclusions

Le présent bilan carbone a consisté en une **évaluation des émissions de gaz à effet de serre engendrées par la mise en œuvre du projet du Métro nord** en tant qu'outil d'aide à la décision.

Ce bilan carbone a été élaboré avec le suivi du Comité d'Accompagnement de l'étude d'incidences du projet Métro Nord, par lequel la méthodologie et les hypothèses ont été validées tout au long du processus. Les évaluations et l'obtention de données propres au projet ont en outre été menées en partenariat avec le demandeur (Beliris), l'exploitant (STIB) et BMN, qui ont également participé à la détermination de certaines hypothèses.

Il est important de garder à l'esprit que le bilan carbone a forcément été réalisé en amont de la mise en œuvre du projet. Les évaluations ont donc été réalisées en fonction des sources et des données disponibles lors de l'élaboration de l'étude, ainsi que sur base d'hypothèses détaillées dans l'étude. Par ailleurs, le bilan carbone a été réalisé à un instant donné, dans un contexte donné. En raison de l'ampleur et du calendrier du projet, certains paramètres sont dès lors amenés à évoluer avec le temps, en fonction des évolutions technologiques, des innovations, des opportunités, ...

La réalisation de cette évaluation a d'abord consisté à élaborer une **méthodologie**, visant à **fixer certaines terminologies, déterminer des objectifs**, les **périmètres d'étude** (les postes et les sources d'émissions à prendre en compte dans l'évaluation), les **axes d'analyse** (construction de l'infrastructure, exploitation de la ligne, ...) et l'élaboration d'un **outil de calcul**.

Le **périmètre temporel de l'étude choisi** correspond à une période de 50 ans, s'étendant de 2030 à 2080. Etant donné l'impossibilité de prévoir à plus long terme les multiples évolutions (comportements de mobilité, avancées technologiques, ...) amenées à se produire, cet objectif semble en effet plus réaliste, bien qu'engendrant évidemment un grand nombre d'hypothèses.

Cette **première partie de l'étude** s'est basée sur une **analyse des outils existants et de la littérature**, axés sur le domaine des travaux publics et sur des infrastructures similaires à celles du projet du Métro Nord.

Plus particulièrement, cette analyse a permis de fixer la **signification de certains termes pour la suite de l'analyse**, en vue de structurer celle-ci. Aussi, une source d'émissions a-t-elle été définie comme une unité physique ou un processus rejetant des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (par exemple : le fret nécessaire à l'acheminement de matériaux, le fait de consommer de l'énergie pour la fabrication du béton, le fait de consommer de l'énergie pour mettre en circulation une rame de métro, le fait de consommer de l'énergie pour l'éclairage des stations, ...), tandis qu'un poste d'émissions a été défini comme correspondant aux émissions de gaz à effet de serre provenant de sources ou de types de sources homogènes.

Les **principaux postes identifiés pour le projet du Métro Nord** consistent ainsi en les intrants (émissions notamment liées à la fabrication des biens consommés lors de la mise en œuvre du projet), le fret (émissions liées au transport de marchandises entrant ou sortant), les consommations d'énergie (émissions directes, lorsqu'elles sont liées à des processus de combustion, ou émissions indirectes, lorsqu'il s'agit notamment des consommations d'électricité), les émissions fugitives (notamment liées aux émissions accidentelles de fluides frigorigènes issus d'installations de climatisation), les amortissements (émissions liées à la production de biens utilisés pour la mise en œuvre du projet, tels que des engins de chantier), les déchets générés

(émissions liées à leur traitement) et les déplacements (émissions liées notamment aux déplacements domicile-travail).

Les émissions correspondant à chaque source sont déterminées par le produit d'une donnée d'activité, mesure quantitative d'une activité occasionnant ces émissions, (par exemple : tonnage-kilomètre pour l'acheminement de matériaux, quantités de béton à fabriquer, consommations d'énergie en kWh pour la mise en circulation d'une rame de métro, consommations d'énergie en kWh pour l'éclairage des stations, ...) et d'un facteur d'émission, qui permet de convertir la donnée d'activité en des valeurs d'émissions en tonnes équivalent CO₂ (kg eqCO₂/t.km, kg eqCO₂/kg de matériaux, kg eqCO₂/kWh, ...). Les gaz à effet de serre concernés pouvant être de différentes natures, les émissions sont exprimées en tonnes équivalent CO₂. Une grande partie des facteurs d'émission utilisés dans le cadre de ce bilan carbone est issue de la Base Carbone, base de données en ligne de facteurs d'émission, administrée par l'ADEME, remise constamment à jour.

En outre, **l'élaboration d'un outil spécifique** au présent bilan carbone, alimentée par des éléments issus d'outils existants tels que la méthode Bilan Carbone, développée par l'ADEME, et l'outil CarbOptimum, développé par la Société du Grand Paris dans le cadre de l'extension du réseau de métro de la région parisienne (projet du Grand Paris), a permis de répondre aux **particularités du projet du Métro Nord** (projet composé de différents « sous-projets » : tunnel, stations, puits P0 et rampe d'accès, dépôt, ...) et à **certains objectifs**, tels que la maîtrise de nombreuses données à manipuler, la récupération des résultats à différents niveaux de désagrégation du projet (par axe d'analyse, par sous-projet, par poste, par source, ...), la souplesse d'entrée des données en fonction de la disponibilité de celles-ci, la paramétrisation de l'ensemble des calculs visant à pouvoir faire varier les hypothèses en cours d'étude, ...

La **seconde partie de l'étude** a ensuite consisté à **évaluer les émissions pour les différents axes d'analyse**, en décomposant le projet en les différents postes et sources d'émissions. Spécifiquement à l'axe Construction des infrastructures, les calculs ont d'abord été effectués pour un **scénario de base**, correspondant à la **version du projet monotube**. Pour certains postes, une **étude de sensibilité** à certains paramètres a été menée localement puis contextualisée à l'échelle du bilan complet de l'axe. Le bilan carbone a par la suite été évalué pour l'**alternative bitube** et les alternatives tram (alternative 0 et alternative 0+).

Au niveau des **résultats**, en ce qui concerne l'axe **Construction des infrastructures**, plusieurs enseignements peuvent être tirés.

Les **émissions totales ont été estimées à environ 245.000 teqCO₂** pour l'ensemble des postes pris en compte pour le **scénario de base** défini pour cet axe.

Les **7 stations réunies représentent le sous-projet pour lequel les émissions sont les plus élevées** (environ 165.000 teqCO₂), loin devant le tunnel (environ 45.000 teqCO₂), le dépôt (environ 20.000 teqCO₂) l'ensemble puits P0 et rampe d'accès (10.000 teqCO₂).

En termes d'ordre d'importance des différents postes, les **intrants constituent de loin le poste prépondérant**, avec plus de 210.000 teqCO₂. Ceux-ci reprennent les émissions liées à la fabrication du béton, de l'acier, du verre, ainsi qu'à la fabrication des ascenseurs et des escalators des stations. Parmi ces intrants, les stations représentent le sous-projet pour lequel la part des émissions est la plus importante (environ deux tiers des émissions), suivis par le tunnel (environ 20%), le solde étant constitué par les émissions liées au dépôt puis à l'ensemble puits P0 et rampe d'accès.

A l'échelle du projet complet, les **émissions liées au béton sont les plus importantes** (environ 120.000 teqCO₂) et représentent un peu plus de la moitié des émissions du poste intrants et un peu moins de la moitié des émissions totales liées à la construction des infrastructures. Ces émissions ont été évaluées à l'aide de facteurs d'émission définis par classe de résistance, permettant de traduire la diversité des bétons nécessaire aux différents usages prévus par le projet (parois moulées, poutres, colonnes, dalles, radier, remplissage, ...). L'utilisation de l'acier engendre quant à elle un peu moins de la moitié des émissions du poste intrants (environ 95.000 teqCO₂). **Les émissions liées au verre et aux escaliers et ascenseurs, de l'ordre de 3.000 teqCO₂, sont marginales.**

Le **deuxième poste en termes d'importance concerne les émissions dues aux consommations d'énergie des sources mobiles de combustion** (environ 20.000 teqCO₂), correspondant à l'utilisation des engins de chantier (excavation des déblais et mise en œuvre des matériaux) et à la congélation des quais de certaines stations.

Les émissions liées à l'excavation des déblais (environ 3.500 teqCO₂) ont été évaluées à partir du volume de déblais et d'une valeur de consommations spécifiques proposée dans le cadre du bilan carbone réalisé dans le cadre du projet du Grand Paris. Etant donné le manque d'éléments développés à ce sujet dans la littérature, les émissions engendrées par le fonctionnement des engins de chantier (environ 8.000 teqCO₂), considérées de manière générale comme relativement marginales par rapport à des postes tels que les intrants, ont été estimées en fonction du volume de matériaux mis en œuvre, à l'aide de consommations spécifiques déduites d'une étude américaine. Enfin, les émissions provoquées par la congélation des terres (environ 10.000 teqCO₂), nécessaires à la réalisation des quais de certaines stations ont été estimées sur base des volumes de terres à congeler et de consommations unitaires évaluées par BMN à l'occasion d'une étude préalable.

Les **émissions liées au fret entrant et sortant réunis représentent ensemble le 3^e poste d'émissions** (environ 5.000 teqCO₂) et dépendent des scénarios analysés.

Les hypothèses relatives au fret ont été posées afin de traduire les scénarios les plus probables à l'heure actuelle. Le mode d'acheminement principal des voussoirs et de l'acier, ainsi que l'évacuation des déblais non valorisables ont été considérés être réalisés par voie fluviale. Les acheminements annexes (pré- ou post-acheminements) de ces matériaux, ainsi que les acheminements principaux des autres matériaux (béton prêt à l'emploi, traverses, rails, remblais, déchets de chantier, déblais valorisables) ont quant à eux été considérés être effectués par voie routière. Les voussoirs ont été supposés provenir de la région parisienne (acheminement principal de 400 km par voie fluviale), le béton depuis des centrales à béton situées à proximité des chantiers (moins de 10 km), les traverses depuis les alentours de Bruxelles (acheminement principal de 60 km par voie routière), l'acier destiné à des usages structurels depuis les alentours de Bruxelles (acheminement principal de 30 km par voie fluviale), les rails de roulement et les 3^e rails depuis l'Autriche (acheminement principal de 1.050 km par voie routière) et les remblais depuis les alentours de Bruxelles (acheminement principal de 50 km par voie routière). Les déblais valorisables et les déchets de génie civil ont quant à eux été considérés évacués jusqu'au port de Bruxelles (acheminement principal par voie routière), tandis que les déblais non valorisables ont été considérés transportés jusqu'à la frontière néerlandaise (acheminement principal de 70 km par voie fluviale), à partir de laquelle ils seront acheminés pour être utilisés comme remblais destinés à renforcer les digues aux Pays-Bas.

En ce qui concerne le fret entrant (environ 2.500 teqCO₂), l'alimentation en béton des chantiers des stations, considérée depuis des centrales à béton situées à proximité des chantiers, représente environ un cinquième des émissions liées au tunnel, pour lequel des éléments

parcourent des distances plus importantes (voussoirs, traverses), ce qui est globalement également le cas pour l'acier. En ce qui concerne le fret sortant (environ 2.500 teqCO₂), les émissions les plus importantes concernent les stations, en raison d'un plus grand volume de déblais excavés et d'une plus grande proportion de terres non valorisables devant être évacuées par voie fluviale.

Le **poste suivant** concerne les **amortissements** (environ 2.500 teqCO₂), consistant en les émissions issues de la fabrication du tunnelier, évaluées à partir de la quantité d'acier dont il est constitué. Celles-ci sont évaluées à environ le double des consommations d'électricité du tunnelier. Cela s'explique notamment par la grande quantité d'acier (de l'ordre de 1.500 tonnes).

Les deux derniers postes sont les **déplacements** (environ 2.500 teqCO₂), qui concernent les déplacements domicile-travail, correspondant principalement aux chantiers des stations et les **consommations d'électricité** (tunnelier et bases-vies (containers de chantiers)) (environ 1.500 teqCO₂), représentant à eux deux moins de 2% des émissions totales. Les émissions liées au fonctionnement du tunnelier sont estimées à partir de la quantité de déblais excavés et d'une valeur de consommations spécifiques proposée dans le cadre du projet du Grand Paris. Les émissions liées à l'utilisation des bases-vies sont quant à elles évaluées en fonction de leur superficie, de la durée des différents chantiers, du nombre d'heures d'utilisation journalier et de consommations spécifiques annuelles, également proposées dans le bilan carbone du projet du Grand Paris.

En **marge du scénario de base**, des études de sensibilité ont été réalisées, portant sur le poste Intrants et les postes Fret entrant et Fret sortant.

En ce qui concerne les **Intrants**, il s'est agi d'analyser l'influence de la composition des bétons. Etant donné l'importance marginale des autres constituants (sable, graviers, additifs, ...), l'étude s'est focalisée sur le ciment. D'un point de vue méthodologique, la composition des bétons correspondant aux facteurs d'émission définis par classe de résistance utilisés dans le scénario de base étant inconnue, a, dans une première étape, dû être déterminée sur base d'hypothèses. Un facteur d'émission et des quantités correspondant au ciment seul ont de cette manière été déterminés pour chaque type de béton utilisé. Dans une seconde étape, le facteur d'émission du ciment a été remplacé par celui du ciment CEM I, puis par celui du ciment CEM III (dont la proportion de clinker est réduite), afin de déterminer de nouveaux facteurs d'émission des bétons tenant compte de ces autres types de ciment, à l'exception des voussoirs pour lesquels le Cahier des charges de BMN impose l'utilisation de ciment CEM I. Le remplacement des facteurs d'émission initialement utilisés dans le scénario de base par des facteurs d'émission correspondant à du béton composé de ciment CEM I conduit à une augmentation des émissions globales d'environ 35.000 teqCO₂ (de 245.000 à 280.000 teqCO₂, soit une augmentation d'environ 14%), tandis que l'utilisation de facteurs d'émissions correspondant à du béton composé de ciment CEM III (hormis pour les voussoirs : CEM I) conduit à une baisse des émissions globales d'environ 20.000 teqCO₂ (de 245.000 à 225.000 teqCO₂, soit une diminution d'environ 8%).

Les prescriptions de BMN en termes de composition de béton préconisant l'utilisation de ciment CEM III, la valeur des émissions totales de l'axe Construction des infrastructures la plus représentative du projet est de 225.000 teqCO₂ (soit une baisse d'environ 19% par rapport à l'utilisation de ciment CEM I).

En ce qui concerne le **fret entrant** (au niveau de l'acheminement des voussoirs et de l'acier) et le fret sortant (au niveau de l'acheminement des déblais non valorisables), l'analyse a consisté à

remplacer le transport fluvial, considéré dans le scénario de base, par du transport ferroviaire, puis par du transport routier.

A l'échelle du bilan global de l'axe Construction des infrastructures, le remplacement du fret fluvial par du fret ferroviaire n'a pratiquement aucune incidence, les émissions s'élevant également à environ 245.000 teqCO₂. Le remplacement du fret fluvial par du fret routier engendre une augmentation des émissions d'environ 10.000 teqCO₂, soit une hausse d'environ 5% par rapport au scénario de base.

Le fret fluvial correspondant au scénario le plus probable, la valeur des émissions totales de l'axe Construction des infrastructures la plus représentative du projet de base monotube reste de 225.000 teqCO₂.

En ce qui concernant l'axe **Exploitation de la ligne**, les émissions globales sont estimées à environ **265.000 teqCO₂** sur les 50 premières années, entre 2030 et 2080.

86% de ces émissions concernent le **fonctionnement quotidien de la ligne**, à savoir les **consommations d'énergie des stations et du dépôt, les consommations d'énergie de traction, le matériel roulant et les activités de gestion**.

Les **14%** des émissions globales restantes concernent les **travaux d'entretien et de maintenance de la ligne, y compris le renouvellement ponctuel des infrastructures et des équipements**.

La majorité des émissions liées à l'exploitation de la ligne sont des **émissions annuelles constantes**. Certaines émissions liées au renouvellement des équipements et de l'infrastructure sont **ponctuelles** et n'interviennent que deux à trois fois sur l'ensemble du périmètre temporel de l'étude choisi (50 ans).

Les **émissions annuelles de l'axe** sont d'environ **5.000 teqCO₂**, avec des **pics d'émissions pouvant aller jusqu'à 10.000 tonnes** pour les années d'achats et de renouvellement du matériel et des équipements de l'infrastructure (rames de métro, rails, parachèvements). En **amortissant les émissions ponctuelles** de renouvellement des équipements sur leur durée de vie, les émissions moyennes totales pour l'axe sont d'environ **5.300 teqCO₂ par an**.

En termes d'ordre d'importance des différents postes, **l'énergie constitue de loin le poste prépondérant** et représente une grande majorité des émissions de l'exploitation de la ligne. Ce poste comprend les consommations d'énergie des stations et du dépôt (chauffage, éclairage, ventilation, refroidissement et équipements) et les économies d'énergie de traction des rames de métro. Ces émissions sont estimées à environ **4.000 teqCO₂ par an**.

Le **deuxième poste en termes d'importance concerne les émissions du poste Intrants**. Les Intrants reprennent les émissions liées à la fabrication des matériaux des équipements renouvelés pendant la durée de vie de l'infrastructure (rames de métro, rails), les émissions liées aux achats de produits, de biens et de services (bureautique, services de conseils, assurances, vêtements, ...) permettant la bonne gestion de la ligne et les émissions relatives à l'entretien et la maintenance de l'infrastructure. Ces dernières, basées sur des estimations budgétaires, sont évaluées à partir d'hypothèses simplifiées afin de ne pas multiplier le risque d'erreurs. En effet, il s'agit d'évaluations concernant des activités pour lesquelles de nombreux paramètres sont actuellement encore inconnus. L'objectif est de pouvoir établir un ordre de grandeur de ces futures émissions. L'ensemble de ces émissions annuelles amorties s'élève à environ **1.000 teqCO₂**.

Les **impacts des autres postes d'émissions** peuvent être considérés comme **négligeables** au regard de l'importance des deux premiers sur l'ensemble de l'infrastructure de la ligne de

métro. Chaque poste ne dépasse pas ou à peine la centaine de tonnes de CO₂ par an. L'ensemble de ces émissions représente moins de 10% des émissions globales de l'axe Exploitation de la ligne.

Parmi ces postes d'émissions, on retrouve les **amortissements** (129 teqCO₂ par an) qui concernent la fabrication des rames de métro qui circuleront sur la ligne M3 et qui auront déjà été mises en service depuis plusieurs années sur d'autres lignes de la STIB. Les émissions sont évaluées à partir de leur durée de vie et de leur durée d'utilisation sur la future ligne de métro.

Les **émissions fugitives** (108 teqCO₂ par an) correspondent aux fuites de gaz frigorigène présent dans les systèmes de refroidissement et de chauffage des stations et du dépôt.

Le **fret entrant** (15 teqCO₂ par an) est également très faible dans l'exploitation de la ligne puisqu'il correspond à l'acheminement des équipements renouvelés ponctuellement. Il comprend également l'acheminement des achats de produits et équipements permettant la gestion quotidienne de l'infrastructure. Une simple hypothèse de pourcentage des émissions des intrants a été choisie pour ce poste, la provenance de l'ensemble des intrants n'étant pas connue aujourd'hui.

La **gestion des déchets** (44 teqCO₂ par an) concerne les déchets générés par les voyageurs dans les différentes stations et les déchets liés aux activités du dépôt.

Enfin, les **déplacements domicile-travail** des employés (23 teqCO₂ par an) présentent également un très faible impact annuel.

Le **bilan carbone de l'alternative bitube** a ensuite été établi. L'alternative, consistant à faire circuler les métros dans deux tunnels distincts de diamètres plus réduits, engendre des modifications en termes de géométrie au niveau des stations et la nécessité de la réalisation d'ouvrages particuliers, tels que des ouvrages de bifurcation entre les deux voies et de raccordement. Cela a pour conséquence de présenter des impacts sur la majorité des postes du bilan.

Les **émissions de totales estimées pour l'axe Construction des infrastructures sont de l'ordre de 305.000 teqCO₂** dans le cas de l'alternative bitube, pour l'ensemble des postes pris en compte **pour le scénario de base, soit environ 60.000 teqCO₂ de plus** que pour le projet de base monotube. Cela correspond à une **augmentation globale de 23%**.

Cette **augmentation concerne pratiquement tous les postes au niveau de l'alternative**, à l'exception des équipements (ascenseurs et escalators), dont le nombre diminue, et des amortissements liés à l'utilisation des tunneliers, malgré le fait que deux machines soient nécessaires au lieu d'une. Cela s'explique notamment par les sections de coupe réduites dans le cas de l'alternative bitube (la section des 2 tunnels de l'alternative bitube est légèrement inférieure à la section du tunnel du projet de base monotube) et les hypothèses posées.

Les **augmentations** s'expliquent principalement par de plus grandes quantités des matériaux à mettre en œuvre et à acheminer, et par de plus grands volumes de déblais à excaver et à évacuer. Ces variations engendrent des modifications dans la plupart des postes : énergie, intrants, amortissements, fret entrant et sortant. Les augmentations les plus notables concernant les intrants (+18% de manière générale et +22% pour le béton) et les consommations d'énergie (sources mobiles de combustion) (+78% de manière générale, augmentation principalement due à la forte augmentation des émissions liées à la congélation (+148%)). Ces dernières sont dues à des volumes congelés plus importants au niveau des stations, mais également à la nécessité de réaliser les ouvrages spécifiques à l'alternative bitube (ouvrages de bifurcation et de raccordement) par cette technique.

L'ordre d'importance des postes reste identique à celui observé pour le projet de base monotube : les intrants (250.000 teqCO₂) représentent toujours la majeure partie des émissions, suivis des consommations d'énergie (sources mobiles de combustion) des engins de chantier et de la congélation pour un peu plus de 10% (environ 40.000 teqCO₂). Le solde (environ 15.000 teqCO₂) est réparti entre le fret (entrant et sortant réunis) (environ 5.000 teqCO₂), les déplacements (déplacements domicile-travail) (3.500 teqCO₂), les amortissements (émissions liées à la fabrication du tunnelier) (3.000 teqCO₂) et les consommations d'énergie indirectes (électricité) (2.000 teqCO₂).

En ce qui concerne les **intrants**, la répartition des émissions est semblable à celle observée pour le projet de base monotube : les émissions de béton représentent 57% des émissions liées aux intrants, suivies de celles liées à l'acier, 42%). Les émissions estimées pour le verre et les équipements sont marginales. L'augmentation des émissions liées au béton (d'environ 25.000 teqCO₂) est principalement due aux quantités de béton nécessaire à la réalisation des ouvrages propres à l'alternative bitube et, dans une moindre mesure, à la réalisation du tunnel. Dans le cas de l'alternative, les émissions liées au béton représentent un peu moins de la moitié des émissions globales de l'axe Construction des infrastructures.

En **marge du scénario de base**, une étude de sensibilité a été réalisée, portant uniquement sur le poste Intrants. A l'instar du projet de base monotube, les impacts du remplacement du fret fluvial par du fret ferroviaire ou du fret routier seront en effet relativement limités.

En ce qui concerne le béton, le remplacement des facteurs d'émission initialement utilisés dans le scénario de base par des facteurs d'émission correspondant à du béton composé de ciment CEM I conduit à une augmentation des émissions globales d'environ 40.000 teqCO₂ (de 305.000 à 345.000 teqCO₂, soit une augmentation d'environ 14%), tandis que l'utilisation de facteurs d'émissions correspondant à du béton composé de ciment CEM III (à l'exception des voussoirs, pour lesquels l'utilisation de CEM I est imposée) conduit à une baisse des émissions globales d'environ 25.000 teqCO₂ (de 305.000 à 280.000 teqCO₂, soit une diminution d'environ 8%).

Les prescriptions de BMN en termes de composition de béton préconisant l'utilisation de ciment CEM III, la valeur des émissions totales de l'axe Construction des infrastructures la plus représentative du projet est de 280.000 teqCO₂ (soit une baisse d'environ 19% par rapport à l'utilisation de ciment CEM I).

Au niveau de la construction des infrastructures, les émissions évaluées pour l'alternative bitube avec utilisation de béton composé de ciment CEM III, sont donc plus élevées de l'ordre de 50.000 teqCO₂, par rapport au projet de base monotube, ce qui représente une augmentation de 23%.

Concernant **l'axe Exploitation de la ligne**, la configuration bitube permet de réduire les émissions globales de **41 teqCO₂ par an**, soit **une réduction totale de 2.050 teqCO₂ sur les 50 premières années** d'utilisation du métro. Cette diminution des émissions concerne uniquement le **poste Energie** avec une réduction des consommations d'énergie des stations liées à une diminution du nombre d'équipements (ascenseurs et escalators).

Cette **réduction peut être considérée comme négligeable**, étant donné l'impact annuel d'environ 5.000 teqCO₂ pour l'exploitation de la ligne. La configuration bitube n'entraîne par conséquent pas d'impact positif ou négatif sur les émissions carbone liées à cette exploitation, par rapport à la configuration du projet de base en monotube.

Le bilan carbone de l'**alternative Tram** a également été établi. Le niveau de détails de cette alternative étant moins poussé que celui le projet introduit, l'évaluation est simplifiée en fonction des informations récupérées.

Trois scénarios sont évalués : **la situation existante**, correspondant aux consommations d'énergie actuelles de la **ligne 55** avec l'utilisation des tramways T3000 (trams Courts) circulant en 2020 sur le tronçon Liedts-Bordet ; **l'alternative 0**, correspondant aux consommations d'énergie de la ligne après l'intégration des T4000 (trams Longs) et les interventions et opérations techniques nécessaires à l'intégration de ces nouveaux tramways ; et enfin **l'alternative 0+**, correspondant aux consommations d'énergie de la ligne après la mise en site propre de l'ensemble du tracé Liedts-Bordet avec desserte des T4000.

La comparaison de la situation existante avec les deux alternatives s'effectue en deux étapes. Dans un premier temps, une comparaison qualitative de l'énergie de traction liée au fonctionnement de la ligne est effectuée à partir des paramètres du matériel roulant et des caractéristiques de la ligne. Dans un second temps, un bilan carbone simplifié permet d'estimer les émissions carbone engendrées par les travaux de rénovation de la ligne dans les alternatives 0 et 0+.

Concernant le **fonctionnement de la ligne**, plusieurs conclusions peuvent être tirées.

Tout d'abord, l'utilisation d'un T4000 dans les alternatives 0 et 0+ permet un accroissement de 40% de la capacité maximale du tramway par rapport à la situation existante, engendrant potentiellement une diminution de l'impact des émissions carbone par personne.

En raison de son poids et de ses dimensions plus importantes permettant d'accueillir un plus grand nombre de personnes, la **consommation énergétique théorique d'un T4000 est plus élevée que celles d'un T4000**. Cependant, ces **consommations théoriques doivent être nuancées par le contexte** : les paramètres de déplacements des tramways sont considérés comme parfaitement identiques dans les trois scénarios, ce qui n'est pas le cas dans la comparaison de la situation existante avec les alternatives.

En effet, en situation existante, les tramways subissent de nombreuses irrégularités sur la ligne 55, augmentant leur consommation d'énergie en raison d'accélération et de freinages répétés. Dans l'alternative 0, la circulation change très peu, et reste irrégulière, entraînant de ce fait de plus grandes consommations d'énergie encore, dues aux trams T4000 qui consomment plus. En revanche, dans l'alternative 0+, la mise en site propre de la ligne améliore la régularité de la ligne et permet de diminuer les consommations d'énergie, en favorisant une écoconduite, et par conséquent les émissions carbone.

Concernant les **travaux de rénovation de la ligne**, les émissions carbone ont pu être évaluées pour les alternatives 0 et 0+ par rapport à la situation existante. Dans ces deux évaluations, les émissions correspondent uniquement aux postes Energie et Intrants. Les émissions liées à l'énergie sont les émissions engendrées par le fonctionnement des engins de chantier, tandis que les émissions liées aux intrants correspondent à la fabrication du béton et de l'acier utilisé dans les différents travaux de rénovation (rails, revêtements de sol, arrêts).

Dans l'alternative 0, les émissions carbone sont estimées à environ **600 teqCO₂** et correspondent aux travaux de renouvellement de certaines voies (rails), et aux déplacements et prolongements de certains arrêts afin d'être adaptés à l'intégration des T4000, dont les dimensions sont plus élevées que celle des T3000.

Dans l'alternative 0+, les émissions carbone engendrées sont d'environ **8.000 teqCO₂** et correspondent à la mise en site propre d'une majorité du tronçon Liedts-Bordet existant, en

considérant le renouvellement complet des rails, ainsi que, par hypothèse, le renouvellement des voiries de façade à façade, sur l'ensemble du tracé de la ligne.

Les résultats obtenus pour la construction des infrastructures et pour l'exploitation de la ligne ont ensuite été contextualisés.

Cette contextualisation se base sur des **émissions annualisées en considérant une durée d'amortissement de 50 ans pour les émissions de la construction.**

Comme mentionné précédemment, pour le **projet de base monotube**, les émissions de gaz à effet de serre liées à la construction des infrastructures ont été évaluées à 225.000 teqCO₂ (dans le cas où le béton est composé de ciment CEM III), tandis que les émissions totales engendrées par l'exploitation de la ligne sur les 50 premières années ont été estimées à 265.000 teqCO₂.

En considérant une durée d'amortissement de 50 ans pour les émissions de la construction, les émissions annualisées pour la construction sont de 4.540 teqCO₂, tandis que les émissions moyennes pour l'exploitation sont de 5.350 teqCO₂.

En ne considérant que l'exploitation de la ligne, les émissions annualisées représentent environ 0,5% des **émissions annuelles de gaz à effet de serre relatives au secteur du transport en Région de Bruxelles-Capitale**. En 2018, ces dernières s'élevaient à 991 kteqCO₂, pour une moyenne de 1.018 kteqCO₂ pour les années 1990 à 2018⁷⁹. En considérant cette fois tant la construction des infrastructures que l'exploitation de la ligne, ce pourcentage est d'environ 1%.

Il est ensuite possible d'**estimer le nombre de véhicules.kilomètres annuel relatif aux voitures particulières qu'il faudrait éviter afin que les émissions annualisées soient compensées.**

Ce nombre de véhicules.kilomètres annuel à éviter correspondant peut être déduit en utilisant le facteur d'émission relatif aux voitures particulières, à savoir 0,193 kg eqCO₂/km (ou 0,193 kg eqCO₂/véhicule.km). En considérant les émissions relatives à la construction des infrastructures et à l'exploitation de la ligne, il s'élève à environ 51.000.000 véhicules.km par an.

Ce chiffre peut ensuite être **comparé au nombre de véhicules.kilomètres relatif aux voitures particulières renseigné dans le plan Good Move de 2016** et qui s'élève à 3.084.413.000 pour l'ensemble de la Région de Bruxelles-Capitale. En considérant par hypothèse ce nombre constant pendant la durée du périmètre temporel fixé, la construction et l'exploitation du métro représentent alors 1,7% des déplacements effectués en voiture particulière sur une année, exprimés en véhicules.km. Ce pourcentage est de 0,9% en ne considérant que l'exploitation. Il s'agit d'une évaluation réalisée en un instant donné. Dans les faits, étant donné la durée d'amortissement considérée, cette proportion est amenée à évoluer dans le temps en fonction des nouvelles pratiques de mobilité, des avancées technologiques, ...

Dans le cas de l'alternative bitube, les émissions annualisées sont de 5.600 teqCO₂ et de 5.400 teqCO₂, respectivement pour la construction et l'exploitation. Le nombre de véhicules.kilomètres à éviter s'élève alors à environ 57.000.000 véhicules.km par an. Rapporté au nombre de véhicules.kilomètres relatif aux voitures particulières renseigné dans le plan Good Move de 2016, cela représente 1,8% des déplacements effectués sur une année, exprimés en véhicules.km, en faisant toujours l'hypothèse d'une évolution constante sur la durée du périmètre temporel fixé. Les émissions annualisées sont dès lors 10% plus élevées dans le cas de l'alternative bitube par rapport au projet de base monotube.

⁷⁹ Source : inventaire d'émissions de gaz à effet de serre de la Région de Bruxelles-Capitale (Soumission 2020)

Un **facteur d'émission propre au projet**, exprimé en $\text{geqCO}_2/\text{passager.km}$, a ensuite été évalué, d'une part en considérant la construction et l'exploitation ensemble et, d'autre part, en considérant uniquement l'exploitation, tant pour le projet de base que pour l'alternative bitube. Etant donné l'absence de données d'exploitation réelles, l'estimation du nombre de passagers.km doit être considérée avec précaution. Aussi, les facteurs d'émission du projet ont-ils été évalués selon deux approches différentes, visant soit à ne prendre en compte que les déplacements effectués sur la portion Liedts-Bordet de la ligne M3, soit à prendre en compte également les déplacements effectués de ou vers une station du tronçon Liedts-Bordet sur les portions de la ligne M3 en dehors de celui-ci.

Dans le cas où seule l'exploitation est considérée, les facteurs d'émission obtenus présentent un ordre de grandeur similaire à ceux rencontrés dans la littérature, à savoir de l'ordre de quelques unités à quelques dizaines de $\text{geqCO}_2/\text{passager.km}$. Ce type de facteurs d'émission présente d'importantes disparités d'un réseau à l'autre en raison de multiples facteurs : mix énergétique, efficacité énergétique, technologie utilisée, âge des infrastructures et du matériel roulant, taux d'occupation, fréquences, ... Les ordres de grandeur obtenus sont également similaires à ceux pour le tram, tandis qu'ils sont nettement inférieurs à ceux des bus (dont les valeurs dépassent la centaine de $\text{geqCO}_2/\text{passager.km}$). Une fois encore, cette évaluation a été réalisée en un instant donné et est amenée à évoluer dans le temps, de même que les facteurs d'émission auxquels les résultats sont comparés.

10. Références

10.1. Cadre de référence

- Plan National énergie-climat (PNEC) 2021-2030
- Région de Bruxelles-Capitale (2019). *Plan énergie climat 2030*

10.2. Publications

- ABC (Association Bilan Carbone), Bilan Carbone (2017). *Bilan Carbone V8. Objectifs et principes de comptabilisation*
- ADEME, Bilan Carbone, CSTB (2010). *Bilan Carbone appliqué au bâtiment – Guide méthodologique*
- ADEME, FNTF (2015). *Réaliser une analyse environnementale dans les Travaux Publics*
- AwAC (2014). *Guide pour réaliser un bilan des émissions de Gaz à Effet de Serre en Wallonie et pour utiliser le calculateur de l'AwAC*
- Bruxelles Environnement (2019). *Fiche documentée n°4 : Les accords internationaux et engagements belges et bruxellois pour lutter contre le changement climatique*
- Bruxelles Mobilité (2013). *Cahiers de l'Observatoire de la mobilité de la Région de Bruxelles-Capitale – Les pratiques de déplacements à Bruxelles*
- Chester M. et Horvath A. (2008). *Environmental Life-cycle Assessment of Passenger Transportation: A Detailed Methodology for Energy, Greenhouse Gas and Criteria Pollutant Inventories of Automobiles, Buses, Light Rail, Heavy Rail and Air v.2*
- CIFFUL (2013). Réemploi, réutilisation des matériaux de construction – Guide pratique
- CSTC (2018). *Spécifier les bétons suivant les normes NBN EN 206 et NBN B 15-001*
- Department for Business, Energy and Industrial strategy (2020). 2020 Government greenhouse gas conversion factors for company reporting - Methodology Paper for Conversion factors Final Report (Royaume-Uni)
- GIEC (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*
- GSV. *L'acier belge en 2018 – Rapport annuel*
- Inventaire d'émissions de gaz à effet de serre de la Région de Bruxelles-Capitale (Soumission 2020)
- Max Bögl (sd). *La technologie de congélation des sols*
- Société du Grand Paris (2012). *Dossier d'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique – Tronçon Pont-de-Sèvres <> Noisy-Champs (ligne rouge – 15 sud) – Etude d'impact - Méthodologie d'élaboration de CarbOptimum, outil de calcul pour l'estimation des émissions et consommations de CO₂ induites par la réalisation du Réseau de transport public du Grand Paris*

- SPF Mobilité (2007). *Carte des voies navigables* (disponible en ligne via le lien suivant : https://mobilit.belgium.be/sites/default/files/downloads/Belgium_GE.pdf)
- SPF Mobilité (2019). *Diagnostic fédéral sur les déplacements domicile-travail 2017*
- STIB (2015). *4. Principe pour l'aménagement d'un arrêt accessible et confortable dans le réseau de surface*
- STIB (2018). *Statistiques 2017*
- Stratec (2018). *Grand Paris Express – Bilan des émissions de gaz à effet de serre du Grand Paris Express (mise à jour 2018) – Impacts attendus sur les émissions de GES*

10.3. Articles

- A. Guggemos et A. Horvath (2005). *Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings* (dans Journal of Infrastructure systems, vol. 11)
- N. Roussel, C. Lanos et Z. Toutou (2003). *Remontée d'un anneau de voussoir : modélisation et analyse paramétrique* (dans Revue Française de Géotechnique, n°104)
- SPF Mobilité et Transports (2017). *Kilomètres parcourus par les véhicules belges en 2016*
- R. Tornaghi (1982). *La congélation des sols* (dans Revue Française de Géotechnique, n°21)

10.4. Sites Internet consultés

- Base Carbone (ADEME) : <https://www.bilans-ges.ademe.fr> (consulté le 1^{er} avril 2021)
- Conseil européen : <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/climate-change/> (consulté le 1^{er} avril 2021)
- Eurostat : <https://ec.europa.eu> (consulté le 1^{er} avril 2021)
- SPF Mobilité : <https://mobilit.belgium.be> (consulté le 1^{er} avril 2021)
- STIB : <http://www.stib-mivb.be> (consulté le 1^{er} avril 2021)
- Techni.ch : <http://www.techni.ch> (consulté le 1^{er} avril 2021)
- TOTEM : <https://www.totem-building.be> (consulté le 1^{er} avril 2021)



aries[®]
CONSULTANTS

Rue des Combattants 96 | B-1301 Bierges
Rue Royale 55 - 3^{ème} étage | B-1000 Bruxelles
T +32 (0) 10 430 110 | T +32 (0) 2 655 86 50
info@ariesconsultants.be | www.ariesconsultants.be