

DOSSIER D'ENQUÊTE PRÉALABLE :

- À LA DÉCLARATION D'UTILITÉ PUBLIQUE DU PROJET,
- À LA MISE EN COMPATIBILITÉ DES PLANS LOCAUX D'URBANISME,
- AU CLASSEMENT DES VOIES.

Mai 2026

PIÈCE K.2

Annexe 5 : Bilan des émissions
de Gaz à Effet de Serre

A31 Bis

Au cœur du sillon lorrain

SECTEUR NORD

RICHEMONT – FRONTIÈRE
LUXEMBOURGEOISE

Révision du document

Indice du document	Date du document	Modifications apportées
A	Avril 2025	Consultations interservices
B	Avril 2026	Enquête préalable à la Déclaration d'Utilité Publique

Établi par :

Mathis KOMINIARZ

Samer GHOSN

Sommaire du dossier DUP :

- Préambule
- Notice de présentation non-technique du projet
- Guide de lecture du dossier
- PIÈCE A – Objet de l'enquête, informations juridiques et administratives
- PIÈCE B – Notice explicative du projet soumis à l'enquête publique
- PIÈCE C – Plans
- PIÈCE D – Estimation sommaire des dépenses et des acquisitions à réaliser
- PIÈCE E – Étude d'impact
 - Chapitres 1 et 2 – Préambule et résumé non-technique
 - Chapitre 3 – Description du projet
 - Chapitres 4 et 5 – État initial de l'environnement et évolution en absence de mise en œuvre du projet
 - Chapitres 6 à 9 – Impacts, mesures et vulnérabilité du projet
- PIÈCE F – Évaluation socio-économique
- PIÈCE G – Mise en compatibilité des documents d'urbanisme
- PIÈCE H – Bilan des étapes de dialogues et de concertations publiques
- PIÈCE I – Classement des voies
- PIÈCE J – Avis sur le dossier
- **PIÈCE K – Annexes**

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	4
1.1. L'évaluation carbone	4
1.2. Les principes de l'évaluation	4
1.3. Objectifs de l'évaluation	5
1.4. Outil utilisé pour l'évaluation	5
1.5. Approche méthodologique	5
1.6. Période d'évaluation.....	6
1.7. Périmètre d'évaluation	6
2. DONNEES D'ENTREE.....	6
2.1. Le détail quantitatif estimatif	6
2.2. Les plans du projet.....	6
2.3. Travaux et éléments abordés.....	7
2.4. Les équipements techniques	7
2.5. Les ateliers de construction	7
3. BILAN GES	8
3.1. Bilan GES initial des infrastructures	8
3.2. Synthèse sur la phase construction	8
3.3. Synthèse sur les émissions véhiculaires.....	9
3.4. Synthèse sur le changement d'occupation des sols.....	10
3.5. Synthèse des actions de décarbonation	10
4. CONCLUSION	11
5. ANNEXES	12
5.1. Annexe 1 : Méthodologie d'évaluation	12
5.2. Annexe 2 : Note de calcul du gisement d'économies GES	17
5.3. Annexe 3 : Résultats du modèle multimodal	20
5.4. Annexe 4 : Note de calcul détaillée du BGES	21

Liste des abréviations

Abréviation	Désignation
ACV	Analyse de cycle de vie
ADEME	Agence de la transition écologique (anciennement Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)
AE	Activité Environnementale
AME	Scénario "Avec mesures existantes"
BSE	Bilan Socio-Économique
CAS	Changement d'affectation du sol
CO ₂ e	Dioxyde de carbone équivalent
DCE	Dossier de consultation des entreprises
DQE	Détail quantitatif estimatif
EEA	European Environment Agency
FDES	Fiche de déclaration environnementale et sanitaire
FE	Facteur d'émission
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ICV	Inventaire du cycle de vie
INIES	Base de données de référence des déclarations environnementales et sanitaires des produits, équipements et services du bâtiment vendus en France
ISDI	Installation de stockage de déchets inertes
MR	Matériel roulant
PL	Poids lourds (PTAC > 3,5 tonnes)
SNBC	Stratégie nationale bas carbone
TC	Transports en commun
UTCF	Utilisation des terres, leur changement et la forêt
VL	Véhicule léger
VP	Véhicule particulier

Éléments de langage et définitions

Terminologie	Définition
Acteurs du projet	Ensemble des personnes physiques ou morales responsables de la conception, réalisation et exploitation d'un projet d'infrastructure. Parmi ces acteurs, on identifie : MOA, MOE, équipes de conception, équipes méthodes et études de prix, équipes d'études socio-économiques, entreprises d'exécution, fournisseurs et autres.
Bas carbone	Matériaux ou techniques permettant de diminuer l'empreinte carbone en comparaison des solutions dites conventionnelles.

Terminologie	Définition
Climat	Conditions météorologiques sur un temps long propres à une région déterminée. Mesurées en termes de précipitations moyennes et températures de saison.
CO₂e	ÉquivalentCO ₂ e, permettant de ramener le potentiel de réchauffement global (PRG) des GES à l'unité commune (PRG du dioxyde de carbone)
Contenu carbone	Émissions de GES associées à la consommation d'énergie et les processus chimiques nécessaires à l'extraction, le transport et la fabrication des matériaux de construction et autres fournitures (matériel électronique et informatique).
Cycle de vie	Ensemble des phases du projet en commençant par la conception de l'infrastructure, sa construction, son fonctionnement et sa fin de vie.
Élément fonctionnel	Sous-ensembles ou composants qui constituent une infrastructure et qui assurent son fonctionnement (p.ex. une pile de pont, la signalisation verticale, la couche de surface)
Émissions GES	Raccourci pour désigner les émissions de la famille des gaz à effet de serre, définis par le protocole de Kyoto et qui contribuent au changement climatique.
Émissions directes	Émissions prenant place au lieu même où l'activité se réalise (combustion, réactions chimiques des processus industriels, etc.)
Émissions indirectes	Émissions induites par la consommation des ressources ou le traitement des déchets dont l'infrastructure a besoin pour fonctionner mais qui prennent place à l'extérieur du périmètre de l'activité. La production d'énergie ou le contenu carbone représentent des émissions GES indirectes.
Émissions réduites	Lorsqu'il s'agit d'une diminution des émissions directement attribuées au projet d'infrastructure évaluée, la méthodologie d'évaluation permet de soustraire directement les émissions réduites du bilan GES initial
Émissions évitées	Une diminution des émissions GES des usagers rendue possible grâce au projet. Ces émissions ne peuvent pas être retirées du bilan GES mais peuvent justifier l'intérêt d'un projet d'infrastructure du fait de sa capacité à éviter des nouvelles émissions GES.
Émissions véhiculaires	Émissions GES produites par l'utilisation des véhicules. Elles regroupent les émissions de combustion (directes) ainsi que celles liées à la production des carburants et à la fabrication des véhicules (indirectes).
Facteur d'émission	Ratio de émissions des GES par unité d'activité (consommation de ressource, services rendus, fonctionnement, etc.)
Gaz-à-effet de serre	Composant gazeux qui absorbe le rayonnement infrarouge (potentiel de réchauffement global)
Incertitudes	Représentées par un pourcentage de variabilité des émissions, issues de l'agrégation des incertitudes inhérentes aux facteurs d'émission et des estimations des quantités de ressources consommées et des déchets produits.
Inventaire du cycle de vie	Récapitulatif exhaustif des activités et des flux de matière et d'énergie les plus pertinents qui sont nécessaires sur l'ensemble du cycle de vie (de la construction jusqu'à la fin de vie).
Jouvence	Notion assimilée au taux de remplacement qui découle de la durée de vie des éléments fonctionnels et de la période de l'évaluation GES.

Terminologie	Définition
Neutralité carbone	Équilibre entre les émissions GES nationales et l'absorption du carbone de l'atmosphère. Désigné aussi comme "zéro émissions nettes"
Période d'évaluation	Période considérée pour l'inventaire des sources d'émission GES du projet suivant une approche de cycle de vie.
Phase du projet	Séquence d'étapes nécessaires pour assurer la réalisation d'un projet en partant de l'analyse de sa faisabilité, sa conception et sa construction. Les phases d'un projet d'infrastructure sont : Études préliminaires, Avant-projet (sommaire et définitif), Études de projet, Consultation des entreprises, Études d'exécution, Phase chantier
Poste d'émission	Bien, service ou processus physique nécessaires au cycle de vie des infrastructures et qui sont source d'émissions GES directes ou indirectes.
Situation fil d'eau	Scénario désignant l'évolution la plus vraisemblable de la situation actuelle sans inclure le projet ni son impact.
Scénario projet	Scénario désignant l'évolution de la situation avec la mise en service du projet et qui inclut les changements induits par l'infrastructure.
Scénario "avec mesures existantes"	Un des scénarios de prospective de la SNBC pour l'évolution de la consommation énergétique et les gaz-à-effet de serre. Ce scénario prend en compte tous les mesures en matière de politique énergétique et GES mis en place jusqu'au 31 décembre 2022
Stratégie nationale bas-carbone	Feuille de route sectorielle pour la réduction des émissions GES en France visant la neutralité carbone en 2050
Unité fonctionnel	Caractérise les éléments fonctionnels suivant la fonction d'usage qu'ils accomplissent (p.ex. les m ² de couche de surface caractérisant la capacité d'une route)

1. Introduction

L'augmentation de la concentration des gaz-à-effet de serre (GES) due aux activités humaines est une des principales causes du changement climatique observé durant les deux derniers siècles. Selon le GIEC, l'industrie et le transport sont le deuxième et le troisième secteur d'activité les plus émetteurs de GES, comptabilisant le 19,5% et le 19% des émissions globales de GES respectivement.

Face au défi environnemental, les différents pays ont pris des engagements pour lutter contre le changement climatique. Cette volonté passe par des mesures visant la réduction des émissions GES dans les différents secteurs économiques. Ainsi, l'Accord de Paris signé après la COP 21 (2015), regroupe les engagements des pays pour réduire les émissions GES anthropogéniques afin de maintenir à 1,5 °C l'augmentation de la température globale par rapport aux niveaux d'avant la révolution industrielle.

Concernant la France, elle a fixé des objectifs plus ambitieux pour la réduction des GES. Approuvée en 2015, la loi de transition énergétique pour la croissance verte établit des objectifs de réduction de GES de 40% pour 2030 qui seront poursuivies pour atteindre 75% à l'horizon 2050 (« facteur 4 »). De plus, elle préconise aussi une diminution

de 30% de la consommation des énergies fossiles tout en augmentant la part des énergies renouvelables jusqu'à 32% par rapport aux niveaux de 2012.

De plus, l'adoption de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) permet d'orienter les actions d'atténuation du changement climatique. Concernant le secteur du transport, elle établit une réduction des émissions de 28% (par rapport à 2015) à l'horizon 2030, visant la neutralité carbone pour 2050. Ces objectifs seront atteints entre autres, à travers la décarbonation de l'énergie consommée, l'amélioration des conditions de circulation et la réduction de l'empreinte carbone des infrastructures.

1.1. L'évaluation carbone

Dans un contexte de lutte contre le changement climatique, les exigences environnementales concernant l'empreinte carbone des infrastructures de transport rendent impératives les démarches de maîtrise et suivi des émissions GES. En ce sens, le bilan des émissions de gaz à effet de serre (GES) permet d'évaluer la pression que les projets d'infrastructure exercent sur le climat à travers l'estimation du potentiel de réchauffement global (mesuré en t CO₂e).

En effet, les projets d'infrastructure émettent des GES dans l'atmosphère de façon directe (combustion) ou indirecte à (consommation d'électricité, traitement des déchets). De plus, ces projets mènent vers des réductions ou des augmentations des émissions GES en comparaison à une situation sans projet. Ainsi, la comptabilité carbone intègre les émissions GES directes et indirectes du projet mais aussi l'impact de ce dernier sur les émissions des usagers en comparaison au fil d'eau.

L'évaluation carbone suit plusieurs méthodes et standards internationaux. Parmi les plus importants, la méthode Bilan Carbone® développée par l'ADEME qui permet d'effectuer la comptabilité des émissions GES liées à la consommation des ressources et à la production des déchets engendrées par les activités des organisations. Ensuite, le standard EN 15978 qui définit chacune des phases du cycle de vie des infrastructures ce qui permet d'inventorier les sources de GES tout le long de la vie utile du projet.

1.2. Les principes de l'évaluation

Pour assurer la crédibilité et la reproductibilité de l'évaluation carbone, plusieurs principes guident la réalisation du bilan GES, parmi eux :

- **Exhaustivité** : il inclut toutes les informations dimensionnantes concernant les activités entraînées par le projet sur l'ensemble de son cycle de vie.
- **Pertinence** : l'évaluation carbone est approfondie et des mesures de décarbonation sont proposées pour les activités responsables des émissions GES majorantes.
- **Consistance** : les calculs des émissions sont réalisés en utilisant les mêmes critères et hypothèses ce qui assure la comparabilité des résultats.
- **Transparence** : les données d'entrée (données d'activité du projet, facteurs d'émission) et hypothèses sont introduites et annexées dans le bilan GES et ses sources citées.
- **Prudence** : le calcul des émissions GES est prudent quant aux hypothèses et valeurs prises en compte dans l'évaluation en se basant sur les situations le plus vraisemblables.
- **Précision** : toute évaluation carbone est approximative c'est pourquoi elle inclut les incertitudes associées aux calculs des GES.

1.3. Objectifs de l'évaluation

Le maître d'ouvrage a souhaité réaliser un bilan des émissions de gaz à effet de serre (GES) de la création et de l'exploitation de l'A31bis. L'objectif est d'évaluer l'empreinte carbone à travers un bilan GES afin de mieux appréhender les émissions engendrées par le projet. En effet, l'évaluation de l'empreinte carbone suivant une approche d'analyse de cycle de vie permet d'éclairer les réflexions sur l'équilibre et les conséquences du projet sur l'environnement.

De plus, cette évaluation contribue à rationaliser les décisions du projet en objectivant les émissions GES attribuables au projet. L'objectif étant de maîtriser son empreinte carbone, elle devra ensuite conduire à des actions concrètes en termes de programmation de réduction des gaz à effet de serre dans les phases suivantes du projet (ACT notamment).

L'objectif est aussi d'infléchir les comportements sur les bons ordres de grandeur en mettant en avant les postes d'émission les plus importants. La réalisation du bilan GES du projet a pour but de fournir aux acteurs et décideurs des éléments de sensibilisation et des pistes d'action afin de réduire la pression sur le climat.

De plus, l'évaluation GES permet de signifier l'impact du projet à l'ensemble des parties prenantes et de les engager dans la démarche de maîtrise et suivi de l'empreinte carbone. Lors des phases ultérieures, cette évaluation permettra de définir des objectifs de réduction des émissions GES sur lesquels les différentes parties prenantes devront s'engager.

Du point de vue réglementaire, le décret n°2017-725 du 3 mai 2017 stipule que les émissions de GES doivent être évaluées pour les projets publiques car le niveau de soutien financier accordé à ces derniers « intègre, systématiquement et parmi d'autres critères, le critère de contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ». Il définit également les principes et modalités de calcul des émissions GES : l'approche du cycle vie de l'évaluation, le périmètre, les sources des données à exploiter, etc. Ainsi, le présent document permet de répondre aux exigences de ce décret.

1.4. Outil utilisé pour l'évaluation

Le Bilan GES est réalisé avec l'outil InfraCost développé par Ingérop sur la base de la méthodologie de l'ADEME : Bilan Carbone® Version 8.5. Cet outil permet de décomposer les différentes sources d'émission d'un projet par catégorie suivant une logique de cycle vie.

L'outil s'appuie sur des facteurs d'émission issus des différentes bases de données qui renseignent le taux d'émission des GES lors de la fabrication des intrants, leur mise en œuvre, le fret, les déplacements, etc.

Afin d'assurer la crédibilité et la reproductibilité de l'évaluation carbone, InfraCost respecte les six principes qui guident la réalisation des bilans GES : exhaustivité, pertinence, consistance, transparence, prudence et précision.



Figure 1 Logo certification de la conformité à la méthode bilan carbone®

1.5. Approche méthodologique

En plus de la méthode de calcul Bilan Carbone®, l'évaluation des émissions GES des infrastructures suit une approche ascendante (bottom-up), inspirée de l'analyse du cycle de vie (ACV). En effet, il s'agit d'un exercice d'exhaustivité visant à modéliser de la façon la plus représentative possible l'ensemble des flux de matière et d'énergie induits par les activités se déroulant dans le périmètre d'évaluation du projet.

La modélisation des flux engendrés par une activité prend la forme d'un inventaire de cycle de vie permettant de lister l'ensemble des consommations et des sous-produits générés. Ces inventaires sont structurés suivant trois axes principaux : le cycle de vie du projet, les éléments fonctionnels et les postes d'émissions évalués.

Les émissions GES sont associées à chacune des phases du cycle de vie du projet définies dans le standard EN 15978. Ce standard comporte les phases de cycle de vie suivantes :

- La production des intrants (A1-A3), appelé « contenu carbone » terminologie englobant les émissions GES de l'extraction et transport à l'usine des matières premières ainsi que la fabrication et distribution des produits manufacturés.
- La mise en œuvre des intrants (A4-A5), ce qui inclut l'énergie des travaux engendrés ainsi que les déchets engendrés.
- L'utilisation (B1) correspond au différentiel des émissions des usagers de l'infrastructure par rapport au scénario de référence, compte tenu de l'évolution de la demande induite et des conditions de service modifiées par le projet (report modal).
- La maintenance (B2-B5), comportant les opérations d'entretien courant et les travaux de rénovation selon la durée de vie des éléments constituant du projet.
- L'exploitation (B6), représentant l'énergie consommée par les équipements permettant le fonctionnement de l'infrastructure.

Les éléments fonctionnels représentent les éléments constituant d'une infrastructure qui assurent son fonctionnement. Par exemple, la signalisation des voiries est constituée de plusieurs éléments fonctionnels tels que le marquage au sol, la signalisation verticale statique et dynamique. Chacun de ces éléments fonctionnels requière des travaux pour être mis en place et entretenu ainsi que de l'énergie pour être exploité (électricité dans le cas de la SLT et les PMV).

Pour faciliter la lecture des résultats, les éléments fonctionnels sont regroupés par corps de métier suivant une logique travaux. Selon leur domaine d'expertise, chaque corps de métier réalise les travaux d'exécution nécessaires aux éléments fonctionnels. Ainsi, chaque corps de métier regroupe des travaux ayant des réalisations communes.

Les postes d'émissions sont à l'origine des GES induits par une infrastructure car ils représentent les flux principaux engendrés par le projet évalué. Les postes d'émission retenus dans le cadre de cette méthodologie sont :

- Les intrants, qui correspondent aux matériaux et au matériel électronique/informatique intégrés aux éléments fonctionnels de l'infrastructure ;
- L'énergie, d'une part celle utilisée lors des travaux de construction et maintenance et d'autre part celle consommée par l'exploitation et l'utilisation de l'infrastructure ;
- Les déchets, engendrés par les travaux préparatoires (démolition, dégagement des emprises et terrassement), les travaux de mise en œuvre (chutes et emballages) et les installations de chantier (cantonnements) ;

- Le fret, pour le transport dans les emprises du projet (interne), l'amené des intrants et des engins (entrant) et l'évacuation des déchets (sortant) ;
- Les déplacements, correspondant aux trajets effectués par les employés lors des travaux et pour le fonctionnement de l'infrastructure ;
- Les immobilisations, correspondant à l'amortissement du matériel utilisé pendant les travaux tels que les engins de chantier ou les installations provisoires (base vie et cantonnements) ;

Le calcul des émissions est accompagné d'une estimation des incertitudes associées. L'incertitude calculée traduit le niveau de variabilité liées aux hypothèses prises dans le modèle de cycle de vie ainsi qu'aux facteurs d'émissions moyens considérés. L'incertitude est exprimée en pourcentage et représente la variabilité attendue autour de la moyenne calculée (p.ex. pour un résultat à 100 tCO₂e et une incertitude de 10%, la valeur attendue devrait se retrouver entre 90 et 110 tCO₂e).

L'**Annexe 1 : Méthodologie d'évaluation** présente en détail la méthodologie d'évaluation utilisées par l'outil InfraCost.

1.6. Période d'évaluation

La période d'évaluation correspond à la temporalité retenue pour la modélisation des flux d'énergie et matière engendrés par le cycle de vie de l'infrastructure. Elle définit la durée de la phase de fonctionnement du projet ainsi que le nombre d'interventions des travaux de maintenance récurrents (réfection des voiries, remplacement des équipements, etc.). Pour cette étude, il a été décidé de prendre en compte une période d'évaluation de 50 ans.

Pendant cette période d'évaluation, les émissions abordées sont celles induites par :

- La construction, l'exploitation et la maintenance des infrastructures.
- La fabrication, l'exploitation, la maintenance et la fin de vie du matériel roulant.

Il est à noter que la fin de vie des infrastructures n'est pas prise en compte car le projet n'a pas pour vocation d'être démantelé dans le scénario prospectif modélisé.

1.7. Périmètre d'évaluation

L'évaluation considère le périmètre des travaux, limité aux emprises du projet, les aménagements urbains adjacents et les structures nécessaires à l'exploitation de la ligne. Ce périmètre prend en compte les travaux liés aux opérations de rénovation urbaine induites.

Le périmètre est élargi pour prendre en compte l'influence du projet sur les usagers. Il est en accord avec le périmètre des études socio-économiques et le modèle de transport afin de prendre en compte les émissions évitées liées à la modification de la part modale des déplacements.

2. Données d'entrée

2.1. Le détail quantitatif estimatif

À partir du détail quantitatif estimatif (Tableau 1) du projet il a été possible de quantifier les travaux nécessaires et les activités à la réalisation du projet.

Chacun des travaux renseignés dans le DQE a fait l'objet d'une décomposition afin de constituer les inventaires de cycle de vie. Ceux-ci permettent d'établir les flux de matériaux et d'énergie et de les associer aux facteurs d'émissions GES des bases de données exploitées, notamment lorsqu'il s'agit des travaux impliquant différentes activités.

De même, les travaux chiffrés au forfait sont aussi décomposés à partir des informations renseignées par les équipes techniques concernées. Un extrait des avant-métrés est présenté dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 Extrait du détail estimatif des travaux du projet

2000	TRAVAUX PREPARATOIRES - TERRASSEMENTS							
2001	Accès de chantier					1	1,00	Fft
2002	Débroussaillage	6320,00					6 320,00	m ²
2003	Abattage et dessouchage d'arbres					100	100,00	U
2004	Terrassement de fouille						1 360,00	m ³
			Semelle PILE P8	18,00	8,00	2,00	288,00	
			Semelle PILE P9	18,00	8,00	2,00	288,00	
			Semelle PILE P10	7,00	7,00	2,00	196,00	
			Semelle PILE P11	7,00	7,00	2,00	196,00	
			Semelle PILE P12	7,00	7,00	2,00	196,00	
			Semelle PILE P13	7,00	7,00	2,00	196,00	
2005	Remblais contigus					81,00	81,00	m ³

2.2. Les plans du projet

En complément aux quantités renseignées dans le DQE, l'évaluation carbone s'appuie sur les plans des ouvrages, et les notices explicatives et techniques du projet. Ces pièces permettent notamment, de décomposer les travaux forfaitaires et de mieux prendre en compte la géométrie des ouvrages construits. Un extrait des plans du projet est présenté dans la **Figure 2**.



Figure 2 Extrait de plan A31bis – Vue en plan de la tête de tunnel Sud

2.3. Travaux et éléments abordés

L'analyse des données issues du DQE a permis de modéliser le cycle de vie des éléments fonctionnels qui constituent l'infrastructure. Ces éléments sont présentés ci-dessous par corps de métier :

- Assainissement et AEP : Bassin de rétention, Ouvrage hydraulique, Ouvrages béton longitudinaux, Tunnel, Assainissement longitudinal, Diffuseurs, OH, OH', AU126, AU124 et AU124A.
- Chaussées et voiries : Section courante, Rétablissements, Échangeur, Noeud sud, Noeud nord, Diffuseurs, AU51, AU52, AU53, AU54, AU55, AU68, AU69, AU70, AU71, AU72, AU161, AU162, OA02, OA03, OA04, OA05, OA06, OA07, OH01, OA08, OA09, OA10, AU140, AU140', OH, Viaducs, AU142, AU142', OH02, AU141, OH03, AU129, AU127, AU125, AU123, AU122, AU121, AU120A, AU119, AU118, AU117, AU116, AU115, OA01 et AU60.
- Équipements : Signalisation horizontale 2x2, Signalisation horizontale 2x3, Signalisation horizontale 2x4, Signalisation verticale, Section courante, ITPC, PAU, PMV, Tunnel, Écran acoustique, Clôtures, Glissières béton DBA, Glissières béton GBA, Glissières métalliques, Péage flux libre et Viaducs.
- Études et contrôles : Études et contrôles.
- Génie civil : Réseau fibres optiques et Viaducs.
- Installations temporaires : Chantier et base vie, Installation de chantier, Exploitation sous chantier - Aménagement sur place, Exploitation sous chantier - Section neuve et Batardeaux.
- Ouvrages d'art : OA07 PI Rue du Ruisseau, Tunnel, Têtes tunnel, Passages faunes et Passages petites faunes, AU51, AU52, AU53, AU54, AU55, AU68, AU69, AU70, AU71, AU72, AU161, AU162, OA02, OA03, OA04, OA05, Viaducs, OA06, OA07, OH01, Tubes d'auscultation, OA08, OA09, OA10, AU140, AU140', OH, AU142,

AU142', OH02, AU141, OH03, AU129, AU127, AU125, AU123, AU122, AU121, AU120A, AU119, AU118, AU117, AU116, AU115, OA01 et AU60.

- Terrassements : Remblais, Déblais, Couche de forme, Tunnel et Viaducs.
- Travaux préparatoires : Dégagement des emprises, Décapage, AU56, AU68, AU71, AU161, Débroussaillage, AU162, Abattage d'arbres, AU140, AU140', OH, OH', AU142, AU142', AU141, AU129, AU127, AU125, AU123, AU121, AU119, AU118, AU117, AU115 et AU60.

2.4. Les équipements techniques

Les consommations électriques des équipements techniques sont estimées à partir de leur puissance électrique et des hypothèses de fonctionnement. À la puissance électrique nécessaire, un temps d'utilisation annuel est attribué à chacun des équipements en fonction de leur usage. Le produit de ces données permet de calculer l'électricité consommée en kWh.

À ce stade de l'étude, le bilan puissance des équipements n'a pas pu être intégrée dans le bilan GES. À part les sous-stations, certaines consommations sont basées sur des hypothèses de puissance électrique et de temps de fonctionnement présentées dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 Puissance des dispositifs électriques et leur consommation

Dispositif	Puissance électrique totale (kW)	Fonctionnement journalier (h/jour)	Consommation annuelle (kWh/an)
PAU	102,0	24	893 253
PMV	1,5	24	13 140
Péage flux libre, comptage	5,0	24	43 881
Péage flux libre, locaux techniques	6,2	24	54 300
Péage flux libre, vidéosurveillance	6,0	24	52 770
Péage flux libre, signalisation	22,5	24	197 100
Péage flux libre, équipements	60,9	24	533 484

2.5. Les ateliers de construction

Des ateliers de travaux sont définis par type de métier. La consommation des ateliers est estimée à partir des retours d'expérience des chantiers passés.

À défaut, des valeurs théoriques sont estimées en appliquant la méthodologie EMEP - CORINAIR (EEA) « air pollutant emission inventory guidebook 2016 - 1.A.4 - Non-road mobile sources and machinery ». Le calcul de la consommation des engins prend en compte la puissance des engins, le pourcentage d'utilisation des engins et la cadence horaire des travaux.

Les engins de chantier utilisés et leur caractéristiques techniques sont listés **l'Annexe 2 : Note de calcul du gisement d'économies GES**.

3. BILAN GES

Le bilan GES du projet est le résultat de trois bilans GES individuels. Ces bilans GES ont permis d'estimer l'empreinte carbone du cycle de vie des infrastructures et du matériel roulant ainsi que les émissions évitées liées au report modal induit par le projet.

Le bilan GES initial des infrastructures présente l'empreinte carbone associée au projet avec les mesures d'écoconception déjà intégrées en phase PRO.

En plus de ce bilan initial, d'autres actions de décarbonation à intégrer dans les cahiers de charge (phase ACT) ont été évaluées. Les économies carbone associées n'étant pas encore fixées, l'estimation des émissions réduites et évitées sont présentées en tant que gisement exploitable, à tenir en compte pour la rédaction des pièces du marché de réalisation.

3.1. Bilan GES initial des infrastructures

Le bilan des infrastructures s'élève à **243 464 t CO₂e** (hors émissions liées à la fin de vie). L'incertitude associée est estimée à 38 099 t CO₂e, soit 13%. Les détails des estimations sont présentés dans la note de calcul jointe à ce rapport.

La répartition des émissions GES parmi les différentes phases du projet est présentée dans la **Figure 3**. La majorité des émissions est liée à la phase construction (83,2%), suivi par la maintenance (14,5%) et l'exploitation (2,3%). Il est à rappeler que les émissions liées aux phases de maintenance et d'exploitation sont calculées sur la période d'évaluation de 50 ans.

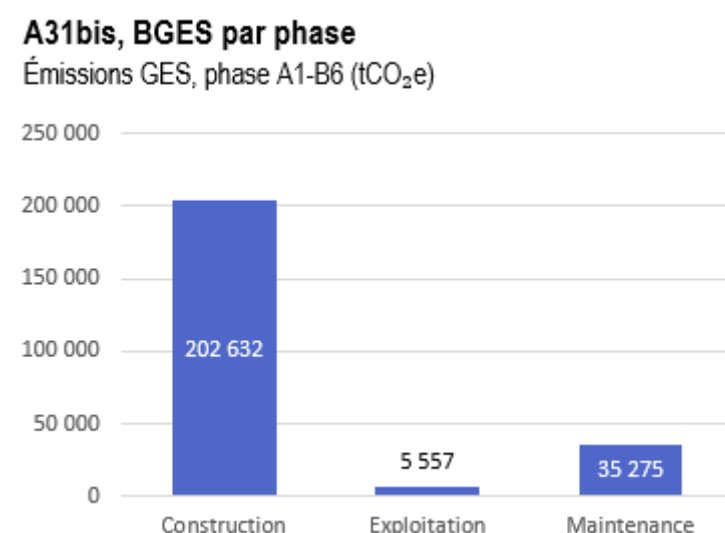


Figure 3 Émissions GES des infrastructures du projet par phase du cycle de vie

Comme mentionné, les émissions liées aux travaux de construction sont majoritaires dans le bilan GES de l'infrastructure. Afin de vérifier les résultats obtenus, une analyse comparative des ratios des émissions GES par montant de travaux (intensité émettrice) a été menée.

Ainsi, en phase construction, l'intensité émettrice des travaux réalisés pour l'A31bis est en moyenne de 380 kgCO₂e/k€. À titre comparatif, l'intensité émettrice dans le domaine de la construction est de 350 kgCO₂e/k€ d'après l'ADEME (Base Carbone).

3.2. Synthèse sur la phase construction

La répartition des émissions par poste émissif est présentée dans la **Figure 4**. Cette répartition permet d'apprécier l'importance de l'empreinte carbone des différents postes par rapport aux autres et d'orienter les leviers d'action à mettre en place pour réduire l'empreinte carbone du projet.

D'après les résultats obtenus, 65% des émissions GES sont liées aux intrants (matériaux, fournitures et matériel informatique/électronique). L'importance de ce poste émissif est due principalement au contenu carbone élevé des matériaux mis en œuvre (béton, acier et enrobés).

Ensuite, les émissions liées au transport de biens (fret) représentent 15% du bilan GES. Parmi ces émissions, 67% sont dues à l'approvisionnement des matériaux à forte densité massique (bétons, métaux, enrobés et agrégats). De même, l'évacuation des déchets issus de la dépose et démolition de l'existant représente environ 27% des émissions du transport. Le 6% correspond au transport interne du mouvement des terres.

Les émissions liées à la consommation d'énergie représentent 9% du total du bilan GES en phase construction. Ces émissions sont liées à la consommation des engins de chantier. D'autre part, les émissions liées au traitement des déchets représentent le quatrième poste émissif de la phase construction avec 8% du total des émissions. Il est à noter que l'évaluation initiale n'incorpore pas d'hypothèses de valorisation, sujet abordé dans la On notera que le changement d'occupation des sols exposé ci-dessus ne reprend pas les surfaces désimperméabilisées, malgré une incidence positive sur la variation du stock carbone. La réalisation du projet conduira en effet à la désimperméabilisation de 27 ha, toutefois, la destination exacte de ces surfaces (culture, prairie, forêt...) étant inconnue à ce jour, il est impossible de valoriser le gain en stock carbone. En considérant que cette surface soit reconvertie en prairie par exemple, hypothèse probable, le gain en stock carbone s'élèverait à environ **9 122 tCO₂e**. Ce gain potentiel est comparable à la perte attendue, bien que la surface imperméabilisée soit plus importante. Cet équilibre s'explique par la faible capacité des terrains agricoles à stocker le CO₂ alors qu'ils représentent plus de 40% des surfaces imperméabilisées par le projet.

Synthèse des actions de décarbonation.

A31bis, BGES phase Construction
 Émissions GES par poste émissif (tCO₂e)

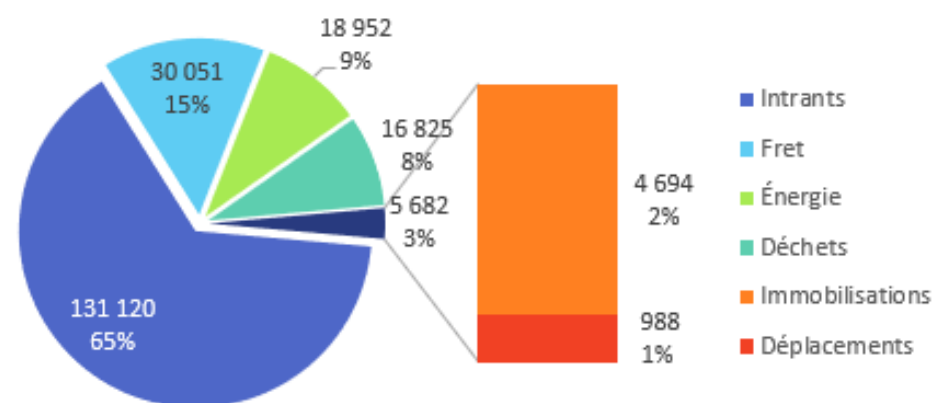


Figure 4 Décomposition des émissions GES en phase construction par poste émissif. Nota : Il est possible le total soit différent de la somme des valeurs décomposées à cause des arrondis

Enfin, les émissions liées aux déplacements et immobilisations sont liées aux installations du chantier et concernent les déplacements domicile-travail de la main d'œuvre ainsi que l'amortissement du matériel nécessaire au déroulement des travaux (engins de chantier, cantonnements et matériel divers).

La répartition des émissions par corps de métier pour la phase de construction est montrée dans la **Figure 6**. Les émissions GES des intrants étant majoritaires, une décomposition de ces émissions par corps de métier est présentée dans la **Figure 5**. À titre informatif, les matériaux retenus représentent 98% du total de ce poste émissif.

Les émissions des travaux de chaussée et de voiries sont majoritairement issues de leur consommation en enrobés bitume et en gravier/granulats.

Enfin, les émissions GES de l'aluminium sont dues à leur utilisation dans les équipements du projet (signalisation et éclairage).

3.3. Synthèse sur les émissions véhiculaires

Le calcul des émissions véhiculaires se base sur l'évaluation du kilométrage total en véh.km sur le réseau routier pour les scénarii de référence et le projet à l'horizon 2050.

En effet, les kilométrages annuels pour les deux scénarii sont directement calculés par le modèle multimodal pour les années 2030 (mise en service) et l'horizon 2050. Ces kilométrages sont ensuite interpolés et répartis suivant la décomposition du parc roulant routier projeté par la SNBC. Ce calcul est effectué pour les véhicules légers (VL) et les véhicules poids lourds (PL). Les résultats du modèle multimodal sont présentés dans l'**Annexe 3 : Résultats du modèle multimodal**.

L'évolution des émissions véhiculaires VL et PL pour les scénarii référence et projet sont présentés dans la **Figure 7** et la **Figure 8**.

L'augmentation des émissions entre le scénario de référence et le scénario de projet est principalement due au kilométrage significativement plus élevé pour le scénario de projet. En outre, pour les VL, le scénario projet entraîne une augmentation de la vitesse moyenne, ce qui se traduit par une augmentation de l'énergie moyenne consommée par kilomètre parcouru.

A31bis, BGES phase Construction

Émissions GES par métier et par poste (tCO₂e)

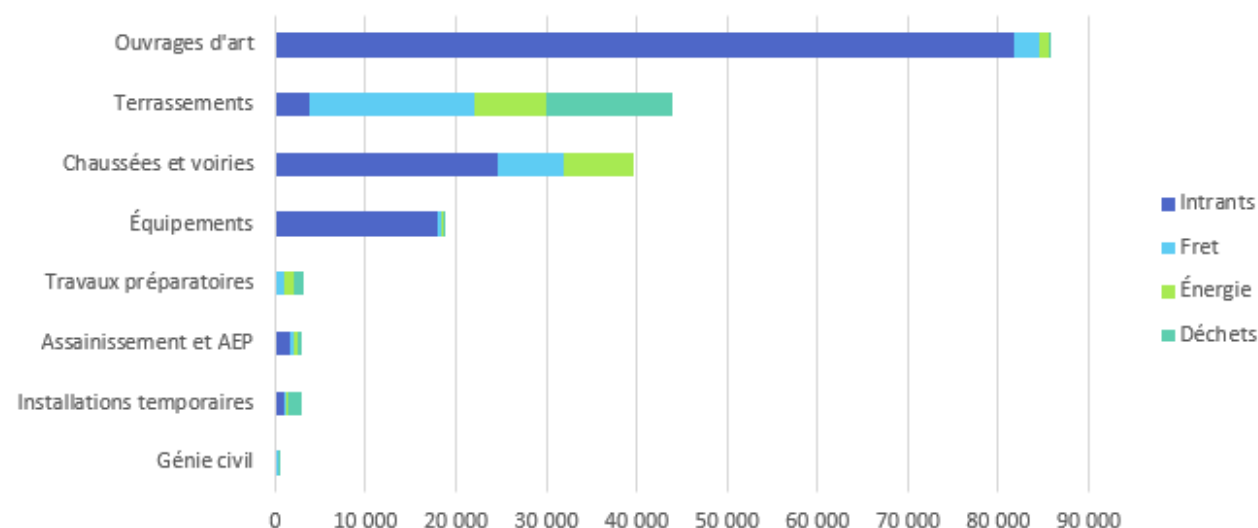


Figure 6 Décomposition des émissions GES en phase construction par corps de métier

A31bis, BGES principaux matériaux

Émissions GES par métier, phase construction (tCO₂e)

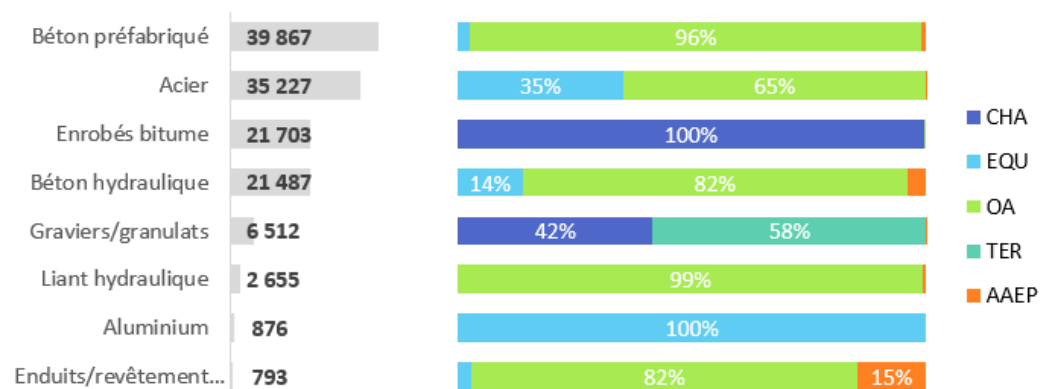


Figure 5 Décomposition des émissions GES par type d'intrants en phase de construction

La décomposition des émissions des intrants par corps de métier permet de comprendre l'origine de l'empreinte carbone associée. Ainsi, les émissions GES des ouvrages d'art sont majoritairement issues de leur consommation en béton préfabriqué, en acier d'armatures et en béton hydraulique. Ils sont également à l'origine d'une majorité de la consommation en liant hydraulique et en enduits/revêtements. Les émissions des terrassements proviennent de l'emploi de graviers/granulats.

A31bis, BGES émissions véhiculaires

Émissions GES véhicules légers (VL) par an et par scénario (ktCO₂e)

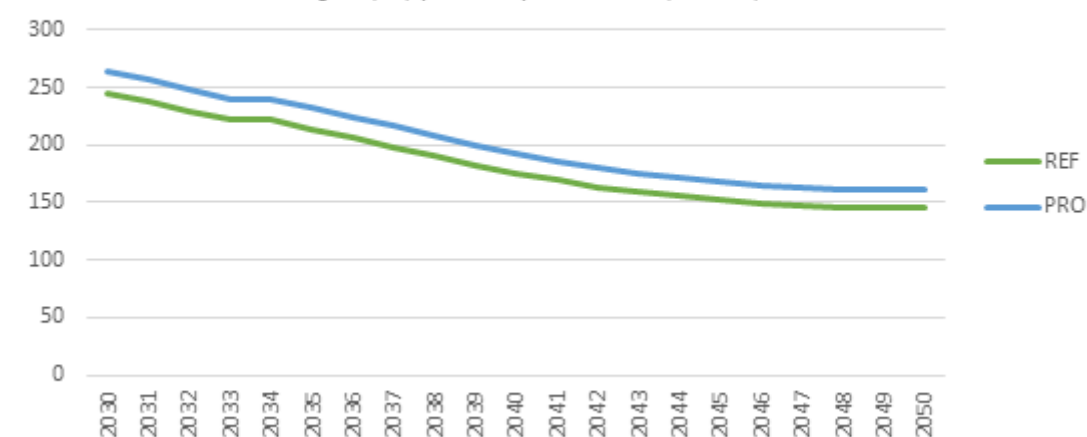


Figure 7 Émissions GES annuelles des VL par scénario

A31bis, BGES émissions véhiculaires

Émissions GES véhicules poids lourds (PL) par an et par scénario (ktCO₂e)

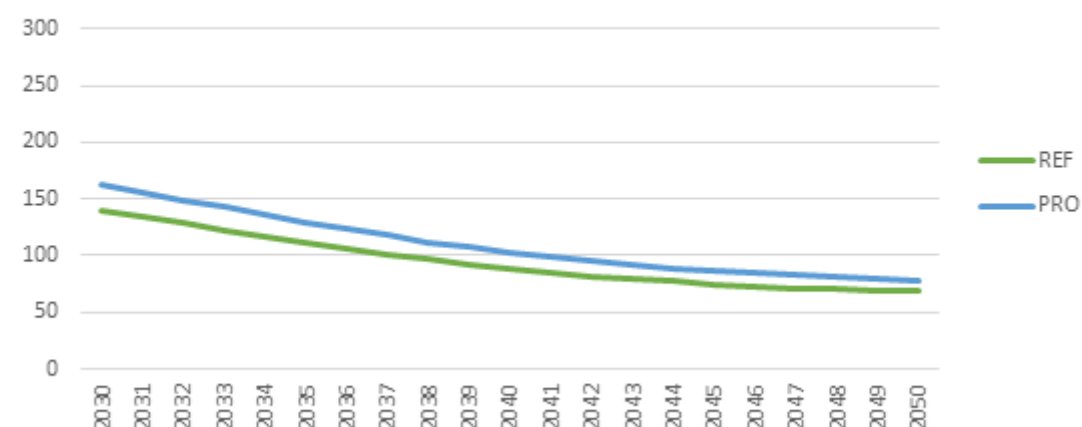


Figure 8 Émissions GES annuelles des PL par scénario

3.4. Synthèse sur le changement d'occupation des sols

L'utilisation des terres, leurs changements et la forêt (UTCF) sont comptabilisés dans le calcul du bilan carbone du projet.

Une modification dans l'affectation du sol engendre l'émission de GES ainsi qu'un changement dans les capacités de captation de carbone. Pour tenir compte de cet impact, l'ADEME propose la méthodologie d'évaluation ALDO sur la base des dynamiques de stockage carbone en fonction du type de sol étudié.

L'inventaire des écologues et les emprises du projet (en distinguant les zones perméabilisées et imperméabilisées) ont été utilisés pour évaluer l'impact sur l'occupation du sol par le projet. La compensation des zones humides impactées et les surfaces déforestées est aussi prise en considération dans le calcul.

L'imperméabilisation du sol occupé par le projet conduit à une diminution du stock carbone du sol de **10 082 tCO₂e** alors que les mesures de compensation permettent d'augmenter le stock carbone de **496 tCO₂e**. Le bilan total du changement d'occupation des sols est de **9 587 tCO₂e**. La décomposition des surfaces imperméabilisées par le projet selon leur état initial ainsi que les mesures de compensation sont présentées dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 Variation du stock carbone due au changement d'affectation du sol

Changement d'occupation des sols	Surface (m ²)	Variation du stock carbone (tCO ₂ e)
Culture vers surface imperméabilisée	190 650	-1 458
Prairie vers surface imperméabilisée	232 875	-7 868
Forêt vers surface imperméabilisée	16 200	-757

Culture vers prairie	36	+1
Prairie vers forêt	16 200	+495

On notera que le changement d'occupation des sols exposé ci-dessus ne reprend pas les surfaces désimperméabilisées, malgré une incidence positive sur la variation du stock carbone. La réalisation du projet conduira en effet à la désimperméabilisation de 27 ha, toutefois, la destination exacte de ces surfaces (culture, prairie, forêt...) étant inconnue à ce jour, il est impossible de valoriser le gain en stock carbone. En considérant que cette surface soit reconvertie en prairie par exemple, hypothèse probable, le gain en stock carbone s'élèverait à environ **9 122 tCO₂e**. Ce gain potentiel est comparable à la perte attendue, bien que la surface imperméabilisée soit plus importante. Cet équilibre s'explique par la faible capacité des terrains agricoles à stocker le CO₂ alors qu'ils représentent plus de 40% des surfaces imperméabilisées par le projet.

3.5. Synthèse des actions de décarbonation

Les résultats du bilan GES permettent d'identifier les principaux travaux et postes les plus émissifs. Cela est nécessaire pour la suite de l'analyse qui consiste à proposer des leviers d'action afin de réduire l'empreinte carbone du projet.

Ces leviers concernent trois axes d'action :

- L'utilisation de matériaux bas-carbone ;
- La valorisation des déchets en filière ;
- La valorisation des déchets sur site.

Le premier levier consiste à augmenter le recours aux matériaux bas-carbone en privilégiant ces fournitures à la place de matériaux conventionnels. Parmi les matériaux ciblés par cette action sont à retenir : les bétons et liants hydrauliques bas-carbone, les métaux recyclés, les plastiques recyclés ainsi que les enrobés incorporant d'AER et tièdes.

Sur la base des retours d'expérience et des solutions existantes dans le marché, un gisement d'économies de 28 456 tCO₂e a été estimé en phase construction. Le récapitulatif des résultats du gisement d'économies est présenté dans le **Tableau 4**. Le tableau montre la part d'économies atteignables grâce à l'utilisation de matériaux incorporant des taux de recyclages importants (métaux, plastique et enrobés bitume).

Le deuxième levier (valorisation des déchets en filière) consiste à évacuer les déchets non valorisables dans le projet vers des installations spécialisées pour leur valorisation. À ce stade, les déchets identifiés sont : les déchets verts, les gravats de démolition (enrobés) et les métaux déposés. D'après les estimations, cette valorisation permettrait de réduire l'empreinte carbone du projet de **4 855 tCO₂e** en phase construction et d'éviter **3 732 tCO₂e**. Les émissions évitées concernent l'empreinte carbone liée à l'extraction des matières premières, évitées grâce à l'utilisation des matières premières recyclées.

De même, la valorisation des déchets sur site serait envisageable pour les gravats de démolition de béton produits lors des travaux préparatoires. Leur concassage pour réutilisation en couche de forme permettrait de réduire l'empreinte carbone du projet d'environ **150 tCO₂e** en phase construction.

Ainsi, le gisement total d'économies GES atteignable serait de **33 461 tCO₂e** en phase construction. Il est à rappeler que l'exploitation de ce gisement d'économies dépend de la faisabilité technique et des solutions disponibles dans le marché. Les détails du calcul sont présentés dans l'**Annexe 2 : Note de calcul du gisement d'économies GES**.

Tableau 4 Récapitulatif du gisement d'économies carbone et d'émissions évitées (en tCO₂e)

Mesures	Émissions ciblées	Après décarbonation	Économies carbone	Émissions Évitées
Matériaux Bas-Carbone	75 416	46 960	28 456	0,00
Valorisation hors site	4 857	2	4 855	3 732
Valorisation sur site	253	103	150	0,00

4. Conclusion

Le bilan global initial des émissions de GES (hors émissions véhiculaires) est évalué à **243 464 tCO₂e**, avec une incertitude de 38 099 tCO₂e, soit 13 % des émissions estimées. En phase construction, l'empreinte carbone du projet est de **202 632 tCO₂e**.

En plus de l'empreinte carbone des infrastructures, le changement d'affectation conduit à une perte de stock carbone de **9 587 tCO₂e** en. En prenant en compte ces émissions, le bilan global du projet atteindrait les **253 051 tCO₂e**.

Concernant la phase construction, une première analyse a permis d'identifier les gisements d'économie carbone rappelés ci-dessous :

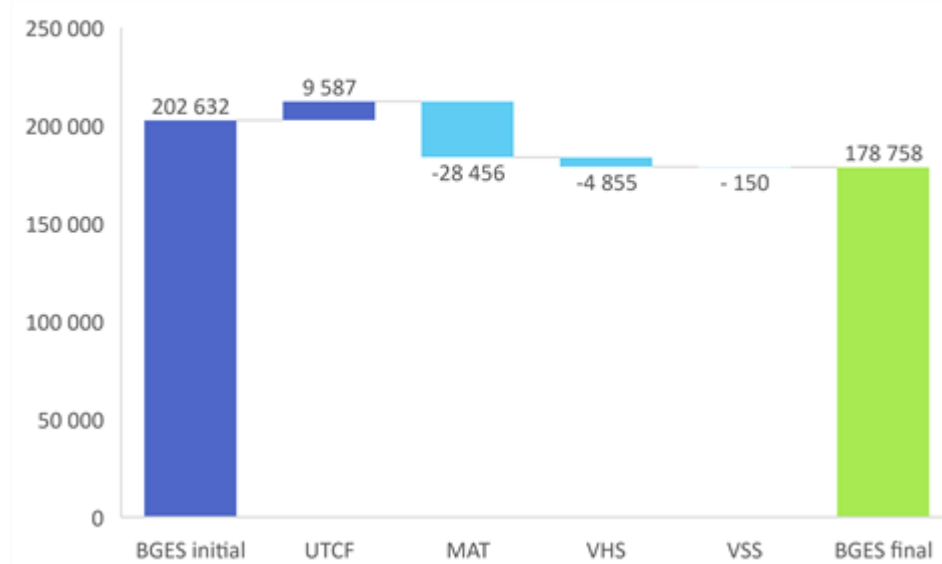
- Matériaux bas-carbone : 28 456 tCO₂e ;
- Revalorisation en filière : 4 855 tCO₂e ;
- Revalorisation sur site : 150 tCO₂e.

Soit au total **33 461 tCO₂e** en phase de construction, une réduction d'environ 17% qui serait atteignable grâce à des mesures d'utilisation de matériaux bas-carbone et la valorisation des déchets. En retranchant ces gisements aux émissions estimées, le coût carbone du projet pourrait être ramené à **178 758 tCO₂e** en phase construction.

Les émissions du bilan initial et le gisement d'économies apporté par les mesures de réduction sont présentés dans la **Figure 9**. En plus des variations, cette figure permet de comparer le bilan initial au bilan réduit si le gisement d'économies est entièrement exploité.

A31bis, Récapitulatif du bilan GES

Émissions GES totales de la phase construction (tCO₂e)



En ce qui concerne les émissions véhiculaires, le scénario du projet génère **678,5 ktCO₂e** d'émissions véhiculaires de plus que le scénario de référence entre les années 2030 et 2050.

Figure 9 Émissions GES des infrastructures (avant et après décarbonation) de la phase construction et du changement d'occupation des sols

5. ANNEXES

5.1. Annexe 1 : Méthodologie d'évaluation

L'approche globale de l'évaluation GES des infrastructures est basée sur la méthode Bilan Carbone®. Initialement conçue pour les organisations, elle permet de quantifier les émissions de gaz à effet de serre engendrées par la consommation des ressources nécessaires au déroulement de leurs activités dans un périmètre établi. Ainsi, un projet routier n'existe que parce que des usagers y circulent. Ces mêmes usagers ne peuvent utiliser leur véhicule que si de l'énergie est disponible (carburant, électricité).

Afin d'identifier la provenance des émissions GES, la comptabilité carbone effectuée suivant la méthode Bilan Carbone® permet de faire la différence entre :

- Les émissions de gaz à effet de serre qui prennent place au sein du périmètre de l'entité, issues des sources détenues ou contrôlées par l'organisation en question (Scope 1),
- Les émissions qui prennent place à l'extérieur de ce périmètre, mais qui sont tout de même nécessaires au déroulement des activités (Scope 2 et 3). Ces émissions concernent notamment la production et distribution d'énergie ainsi que celles liées aux phases du cycle de vie autres que la fabrication (transport, utilisation, fin de vie)

Les émissions qui figurent dans un Bilan GES ne sont donc pas uniquement celles dont l'entité est directement responsable, mais également celles dont elle dépend pour exister. Le degré de responsabilité s'appréciera en fonction des émissions considérées, du contexte d'ensemble et également de ses propres critères. Ainsi, l'analyse ne s'arrête pas à la détermination du degré de responsabilité de l'entité évaluée.

Gaz-à-effet de serre pris en compte

Pour l'heure, toutes les méthodes standardisées ou officielles d'inventaire des émissions de gaz à effet de serre partagent quelques caractéristiques :

Seuls sont comptabilisés les gaz émis, et non ceux qui apparaissent dans l'atmosphère à la suite de réactions chimiques ou photochimiques grâce à des émissions de précurseurs (cas de l'ozone troposphérique),

Seuls sont comptabilisés les gaz émis dans la troposphère, et non ceux émis dans la stratosphère (cas d'une partie des émissions des avions en vol).

Les gaz à effet de serre qui correspondent à cette définition sont essentiellement ceux qui sont repris dans le cadre du protocole de Kyoto - initiative internationale phare en matière de réduction des gaz à effet de serre :

- Le gaz carbonique (CO₂) d'origine fossile, dont la demi-vie dans l'atmosphère est de l'ordre du siècle,
- Le méthane (CH₄), dont la demi-vie dans l'atmosphère est de l'ordre de la décennie,
- Le protoxyde d'azote (N₂O), dont la demi-vie dans l'atmosphère est de l'ordre du siècle,
- Les hydrofluorocarbures (C_nH_mF_p), dont la demi-vie dans l'atmosphère s'échelonne de quelques semaines à quelques siècles,
- Les perfluorocarbures (C_nF_{2n+2}), dont demi-vie dans l'atmosphère est de l'ordre de quelques siècles à plusieurs dizaines de millénaires,
- L'hexafluorure de soufre (SF₆), dont demi-vie dans l'atmosphère est de quelques milliers d'années.

Principes de l'évaluation

Afin d'assurer la crédibilité et la reproductibilité de l'évaluation carbone, plusieurs principes guident la réalisation du bilan :

- Exhaustivité : il inclut toutes les informations dimensionnantes concernant les activités entraînées par le projet sur l'ensemble de son cycle de vie.
- Pertinence : l'évaluation carbone est approfondie et des mesures de décarbonation sont proposées pour les activités responsables des émissions GES majorantes.
- Consistance : les calculs des émissions sont réalisés en utilisant les mêmes critères et hypothèses ce qui assure la comparabilité des résultats.
- Transparence : les données d'entrée (données d'activité du projet, facteurs d'émission) et hypothèses sont introduites et annexées dans le bilan GES et ses sources citées.
- Prudence : le calcul des émissions GES est prudent quant aux hypothèses et valeurs prises en compte dans l'évaluation en se basant sur les situations le plus vraisemblables.

Principe de calcul

Le principe de calcul utilisé est basé sur une méthode d'estimation indirecte des GES engendrés par les activités évaluées (pas de mesure directe). En effet, les activités (quantifiées suivant l'unité choisie) combinées à leurs facteurs d'émission (kg CO₂e/unité) permettent d'estimer les GES émis. Le principe de calcul est montré dans la figure ci-dessous.



Périmètre de l'évaluation

Pour périmètre temporelle plusieurs approches peuvent être utilisées. Le choix dépendra des données disponibles et de sa pertinence par rapport au projet :

- La période de concession ;
- Le périmètre temporel de l'évaluation socio-économique : 30 ans
- Le périmètre de l'étude air et santé ;

Quant au périmètre spatial de l'évaluation, il est décomposé en deux. Le premier concerne le périmètre des travaux qui, dans le cadre de cette évaluation se limite aux emprises du projet ainsi que des ouvrages annexes. Les installations temporaires telles que les cantonnements, la base de vie et les dépôts doivent être aussi considérés dans ce périmètre.

Le second est défini par l'aire d'influence du projet sur les usagers. Il est à noter que le total des émissions véhiculaires n'est pas comptabilisé dans ce périmètre mais plutôt la différence entre les scénarii référence et projet. L'objectif est de prendre en compte l'impact du projet sur la circulation afin d'évaluer les effets sur la consommation énergétique. Cette distinction permet une approche cohérente vis-à-vis de l'esprit de la méthodologie Bilan Carbone®. Ainsi, ce périmètre s'apparente à celui d'une évaluation socio-économique et reprend souvent les emprises relevées par l'étude de trafic.

Les données d'activité

Les données d'activité comprennent l'ensemble des consommations de ressources telles que les matériaux, l'énergie, mais aussi la production de déchets. L'ensemble de ces flux est établi à partir des estimations, projections et relevés des activités menées dans le périmètre spatio-temporel défini pour l'évaluation environnementale de l'infrastructure.

Ces données sont issues des informations contenues dans les plans du projet, les détails quantitatifs estimatifs, la consommation énergétique des équipements ainsi que d'autres informations et hypothèses renseignées par les équipes de conception. Ainsi, chacun des travaux renseignés dans le DQE fait l'objet d'une décomposition permettant d'établir les inventaires de cycle de vie du projet (voir exemple dans le tableau ci-dessous).

Travaux préparatoires				
Dégagement d'emprises				
Démolition				
Inventaire E1	Inventaire E2	Inventaire E3	Qté.	UF.
Fret	Routier entrant	Ensemble articulé porte voitures, PTR4 40T	19 800	tonne.km
Énergie	Combustibles	Gasoil non routier	3 126	litre
Fret	Routier sortant	Ensemble articulé benne TP, PTR4 40T	31 779	tonne.km
Déchets	Déchets bâtiment	Déchets inertes en mélange	794	tonne

Afin de structurer l'évaluation, les ICV sont établis par élément fonctionnel. En effet, les éléments fonctionnels représentent les sous-ensembles qui constituent une infrastructure et qui assurent son fonctionnement. Par exemple, dans le cas d'un projet urbain, la signalisation des voiries est constituée de plusieurs éléments fonctionnels tels que le marquage au sol, la signalisation verticale statique et dynamique. Chacun de ces éléments fonctionnels requièrent des travaux pour être mis en place et entretenus ainsi que de l'énergie pour être exploités (p.ex. dans le cas de la signalisation dynamique ou la SLT).

La base de données

Les facteurs d'émissions (FE) s'expriment en kgCO₂e par unité (e pour équivalent) et permettent de retranscrire l'impact carbone d'un matériau, d'une activité ou d'une consommation énergétique. Ils sont majoritairement issus de la base ADEME mais peuvent également être complétés par des bases externes lorsque les informations manquent (Base INIES, DIOGEN, Ecoinvent ou directement les FDES des fournisseurs).

Le choix des FE utilisés a été hiérarchisé de la façon suivante selon les disponibilités :

- Base ADEME
- Base INIES
- FDES de fournisseurs et autres bases génériques (DIOGEN, CERIB, BETie, etc.)

- Ecoinvent
- Construction du FE en considérant le FE du matériaux principal (exemple : Pour une armoire électrique en acier, il sera considéré le poids de l'armoire auquel sera associé le FE de l'acier).

De même, certains facteurs d'émission sont construits à partir de l'outil Bilan Produit faisant partie de la Base Impacts® de l'ADEME. Cet outil sert à estimer les émissions engendrées par la production de certains équipements dont les processus de fabrication est plus important que celui du matériau principal. Tel est le cas des glissières métalliques et des panneaux de signalisation routière par exemple. Ces équipements comportent des traitements de surface non négligeables (respectivement galvanisation et thermolaquage).

Pour s'adapter aux avant-métrés des différents travaux, les FE sont convertis à l'unité du métier, appelée unité fonctionnelle. Par exemple : si un métier indique une quantité de béton en m³ alors que le FE est exprimé en kg CO₂e/tonne, le FE est alors converti en kg CO₂/m³ à partir de la masse volumique ~2,35 tonne/m³.

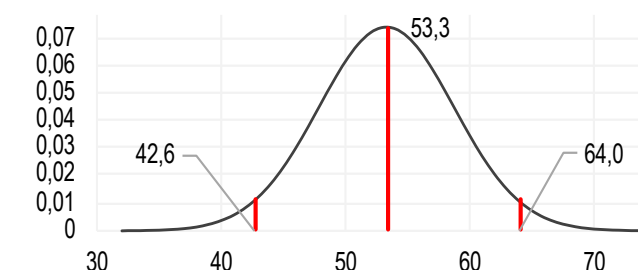
Incertitudes des données

Toutes les données sont assorties d'une incertitude représentant la variabilité des valeurs estimées. Elles sont déterminées en fonction :

- D'hypothèses sur des données qui ne peuvent à cette phase être définies (origine des matériaux, lieux d'évacuation, études en cours d'élaboration...);
- Des évolutions probables du projet (déblais, remblais, structure de la voie...);
- De la difficulté à estimer une variable (consommation énergétique du chantier, distance parcourue par le personnel...);
- Des facteurs d'émissions associés à partir des indicateurs statistiques renseignés dans les bases de données.

Les incertitudes sont représentées par un pourcentage qui indique la variabilité associée à la valeur moyenne employée. Ce pourcentage est calculé à partir de l'intervalle de confiance à 95% résultant de la distribution des valeurs recueillies. Ainsi, l'exemple présenté dans la figure ci-après, montre la distribution des FE des enrobés bitume (en kg CO₂e/tonne) calculés par l'ADEME sur la base des données recueillies auprès des fabricants.

FE enrobés bitume (ADEME)



À partir de cette distribution, l'intervalle de confiance à 95% (délimité en rouge) permet de calculer l'incertitude associée. Ainsi, le FE des enrobés bitume est de 53,3 kg CO₂e/tonne, avec une incertitude de 20%. Cela indique que

la valeur attendue se trouve entre 42,6 et 64 kg CO₂e/tonne, avec une haute probabilité qu'elle soit autour de 53,3 kg CO₂e/tonne.

Afin de donner un ordre de grandeur de la variabilité des émissions estimées, la superposition des incertitudes liées aux FE et aux données d'activité est faite en appliquant la méthode de calcul du Bilan Carbone®. Cette méthode permet d'estimer l'incertitude totale pour chaque émission calculée ainsi que d'agréger les données afin d'obtenir l'incertitude totale pour l'ensemble de l'évaluation.

Axes de l'évaluation

En plus de la méthode de calcul Bilan Carbone®, l'évaluation des GES suit une approche ascendante (bottom-up), inspirée de l'analyse du cycle de vie (ACV). En effet, il s'agit d'un exercice d'exhaustivité visant à modéliser de la façon la plus représentative possible l'ensemble de flux de matière et d'énergie induits par les activités qui prennent place dans le périmètre d'évaluation de l'infrastructure.

Les données d'activité permettent de modéliser les flux engendrés par chacun des éléments fonctionnels de l'infrastructure. Cette modélisation prend la forme d'un inventaire de cycle de vie qui récapitule l'ensemble des consommations et des sous-produits générés. Ces inventaires sont structurés suivant trois axes principaux : le cycle de vie de l'infrastructure, les éléments fonctionnels mis en service par les différents métiers et leur décomposition suivant les postes d'émission évalués.

Le cycle de vie des infrastructures

Dans le cas des infrastructures de transport, l'ensemble du cycle de vie est décomposé en 5 phases : construction, utilisation, maintenance, exploitation et fin de vie. Chacune d'entre elles regroupe les différentes phases du cycle de vie allant du A1 au C4 :

- Construction (A1-A5) : cela comprend le contenu carbone des intrants (A1-A3), l'acheminement au chantier (A4) et la mise en œuvre (A5). Les émissions liées aux travaux de démolition et dégagements des emprises existantes sont comprises dans la phase A5 car elles font partie des travaux nécessaires à la mise en œuvre des éléments du projet.
- Utilisation (B1) : cela inclut les émissions des usagers par type de véhicule (VL, PL) et par tranche de vitesse. L'évaluation de ces émissions peut être effectuée en appliquant les facteurs d'émission de combustion de COPERT IV ou les FE de la base ADEME.
- Maintenance (B2-B5) : cette évaluation suit la même logique travaux de la phase construction. Cette phase inclut les travaux de remplacement, de réparation et de réfection des emprises du projet selon la durée de vie (ou jouvence) définie pour chacun des éléments fonctionnels du projet. Par exemple, la période moyenne de renouvellement de la couche de roulement d'une chaussée est de 10 ans. En plus de travaux de mise en œuvre, les travaux de démolition de l'existant sont inclus dans cette phase.
- Exploitation (B6) : les émissions liées aux consommations énergétiques des équipements d'exploitation (éclairage, signalisation, péages) ainsi qu'aux déplacements du personnel de service sont incluses dans cette phase.
- Fin de vie (C1-C4) : en pratique, les projets d'infrastructure n'ont pas pour objet à être démantelés, la fin de vie est souvent exclue du périmètre. Néanmoins, ces travaux sont abordés comme les travaux préalables en phase construction : démantèlement, démolition, dépose et la remise en état des anciennes emprises de l'infrastructure.

Les corps de métier

Afin de faciliter l'évaluation de l'empreinte carbone, la préconisation des mesures de décarbonation et le suivi des émissions GES du projet étudié, l'évaluation carbone est aussi structurée autour de la nature des travaux réalisés par corp de métier.

En effet, chaque corps de métier assure la mise en œuvre des éléments constituant l'infrastructure. Par exemple, la signalisation routière est constituée de plusieurs éléments tels que le marquage au sol, les panneaux de signalisation statique et dynamique. Chacun de ces éléments requiert des travaux pour être mis en place et entretenus ainsi que de l'énergie pour être exploités (électricité dans le cas de la SLT et les PMV par exemple).

De plus, chaque élément a une durée de vie déterminée après laquelle il doit être rénové ou refait. Ainsi, à chaque élément fonctionnel lui est associée une jouvence, c'est-à-dire, un chiffre correspondant au nombre de fois que cet élément est remplacé dans la période étudiée. Par exemple, pour le marquage au sol dont la durée de vie est de 10 ans et pour une période d'évaluation de 30 ans, la jouvence attribuée est de 3.

Chaque élément est caractérisé par une unité fonctionnelle définie suivant la fonction d'usage accomplie par l'élément en question. Par exemple, dans le cas d'une glissière, l'unité fonctionnelle retenue est le ml.

Postes d'émissions GES et méthodologie de calcul

Les émissions totales produites par un projet d'infrastructure sont décomposées en différents postes. Les postes d'émissions représentent les flux principaux engendrés par le projet évalué. Brièvement, les postes d'émission principaux retenus dans la méthodologie d'évaluation sont :

- Les intrants, matériaux, dispositifs et appareils intégrés aux éléments fonctionnels de l'infrastructure ;
- L'énergie, d'une part celle utilisée lors des travaux de construction et maintenance et d'autre celle consommée par l'exploitation et l'utilisation de l'infrastructure ;
- Les déchets, engendrés par les travaux préparatoires (démolition, dégagement des emprises et terrassement), les travaux de mise en œuvre (chutes et emballages) et les installations de chantier (base de vie) ;
- Le fret, pour le transport dans les emprises du projet (interne), l'amené des intrants et des engins (entrant) et l'évacuation des déchets (sortant) ;
- Les déplacements, correspondant aux trajets effectués par les employés lors des travaux et pour le fonctionnement de l'infrastructure ;
- Les immobilisations, correspondant à l'amortissement du matériel utilisé pendant les travaux tels que les engins de chantier ou les installations provisoires (base de vie) ;

Émissions des travaux

Pour le calcul des émissions des travaux, les données d'entrée (plan, quantitatifs, estimatifs) doivent permettre de répertorier l'ensemble des éléments fonctionnels à réaliser dans le cadre de la construction de l'infrastructure. Par exemple, dans le cas d'une route, les éléments fonctionnels principaux sont : les couches de fondations, les couches de roulement, les réseaux d'assainissement, la signalisation horizontal et vertical, etc.

Lorsque les éléments fonctionnels ont été identifiés, les inventaires de cycle de vie pour chacun sont établis. Ces inventaires prennent en compte les flux induits par les travaux de construction et de maintenance suivant les six postes d'émission présentés. La méthodologie générale d'évaluation de ces postes est présentée dans les sous-sections suivantes.

Intrants

Les émissions GES des intrants correspondent à leur contenu carbone, c'est-à-dire, la quantité de GES émise lors de l'extraction des matières premières, leur transport à l'usine et le processus de fabrication (phases A1-A3 du cycle de vie).

Ces émissions ne sont pas calculées dans le cadre de l'évaluation carbone des infrastructures. Elles sont obtenues soit à partir des FE communiqués par les fabricants, soit à partir des FE compilés dans les bases de données carbone (ADEME, INIES, Ecoinvent®).

Les quantités d'intrants sont directement obtenues des métrés et des détails estimatifs des travaux. D'autres fournitures associées sont aussi intégrées dans l'évaluation lorsqu'elles sont pertinentes sur le plan carbone. Par exemple, pour la réalisation des chaussées en enrobé bitumineux, la couche d'imprégnation doit être aussi prise en compte.

Énergie

Quantifier les émissions issues de l'exécution des travaux requiert la définition des engins qui constituent les ateliers de construction. Ainsi, leur consommation de carburant doit être estimée avant le calcul des émissions GES. Dans le cas où la consommation de carburant n'est pas connue par les équipes de travaux, la méthodologie EMEP - CORINAIR de l'European Environment Agency (EEA) peut être appliquée. Le document méthodologique concerné est : « air pollutant emission inventory guidebook 2016 - 1.A.4 - Non-road mobile sources and machinery ». Un exemple de ratios de consommation par puissance est présenté dans le tableau ci-dessous.

Puissance maximale (kW)	0 - 19	20 - 36	37 - 55	56 - 74	75 - 129	130 - 559	-	> 560
Consommation diesel (g/kWh)	270	262	260	260	255	250		250

L'approche Tier 3 de la méthode permet de déterminer la consommation horaire de carburant en fonction de la puissance des engins de chantier. Par exemple, pour des travaux de terrassement, un bulldozer de 131 kW est utilisé pendant 10 jours, 8 heures par jour. Le facteur de consommation (FC) est de 250 g/kWh. En partant d'une hypothèse d'utilisation de 75 %, la puissance moyenne en utilisation de l'engin est de 131*0,75 soit 98,25 kW. Il fonctionne pendant 80 heures soit une consommation de 1,97 tonnes de carburant (98,25*80*250*10⁻⁶). Avec une masse volumique de 860 kg/m³, 22 800 litres de diesel ont été consommés. Ensuite, l'ADEME indique un FE de 3,17 kgCO₂e par litre de gazole consommé. Ainsi, le total émis par le bulldozer est de 72,3 tCO₂e.

Fret

Afin de distinguer l'impact du fret des intrants et des déchets évacués, le fret est divisé entre le fret entrant, sortant et interne. L'approche retenue pour l'estimation du fret est celle du volume transportée en tonne.km. Cette approche est mieux adaptée pour le fret lourd car au contraire de l'approche déplacement (en véh.km), elle ne nécessite pas d'hypothèse de foisonnement.

- Les distances d'approvisionnement doivent être détaillées pour chacun des engins, matériels, matériaux et déchets concernés. Les distances sont essentiellement choisies en fonction de :
- La disponibilité de la ressource, plus elle est disponible plus elle est considérée comme proche ;

- La distance vers les sites d'approvisionnement (matériaux) et d'évacuation (déchets).
- Lorsqu'il s'agit d'une évaluation GES en phase de conception en amont, des hypothèses récurrentes des distances de transport sont à établir, parmi elles on retrouve :
- La distance d'évacuation des déchets par défaut,
- La distance au stockage temporaire (concernant les mouvements de terre).

Le tableau ci-après présente les principales distances moyennes considérées par famille de matériaux et de déchets.

Inv. E1	Inv. E2	Distance (km)
Intrants	Acier	100; 300; 500
	Aluminium	300
	Asphalte	100
	Autres métaux	500
	Bois	200
	Béton hydraulique	50
	Béton préfabriqué	100
	Céramique/terre cuite	300
	Enduits/revêtements résine	1000
	Enrobés bitume	100
	Graviers/granulats	50; 200
	Liant hydraulique	100
	Matériel électronique	500; 1000
	Plastiques/polymères	300
	Ratios	1200
	Verre	500
Immobilisations	Végétation	50
	Bâtiments/EP	200
Déchets	Véhicules, Machines et Outils	200
	Déchets bâtiment	5; 40
	Déchets dangereux	100
	Déchets plastiques	40
	Ordures ménagères	40; 200

Dans le cas du transport routier, les engins retenus pour le calcul des émissions GES varient en fonction des objets transportés. La liste des engins utilisés pour l'évaluation GES et ses facteurs d'émission est détaillée dans le tableau ci-dessous :

Engins de transport	Total GES (kg CO ₂ e/t.km)
Articulé, 34 à 40 T diesel routier, 7 % de biodiesel	0,0823
Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	0,0711

Rigide, 20 à 26 T diesel routier, 7 % de biodiesel 0,1346

Quant aux autres modes de transport, en particulier du fret ferroviaire et fluvial, des études logistiques spécifiques sont nécessaires. En effet, ces modes de transport requièrent une analyse préalable concernant l'existence des infrastructures ainsi que des pôles d'échange nécessaires aux derniers kilomètres parcourus.

Déchets

La production de déchets lors de phases de construction et de maintenance est gérée suivant deux schémas. Le premier concerne les déchets générés par les travaux de démolition et de dégagement des emprises (débroussaillage, déboisement, etc.). Ces déchets sont considérés comme étant directement évacués et ainsi comptabilisés dans les métiers qui les produisent. Par exemple, la démolition d'une couche de roulement est comptabilisée dans le métier « chaussées ».

Le deuxième concerne les déchets engendrés par les intrants : les emballages, les chutes et les pertes qui sont imputés aux installations temporaires (benne déchets en base vie). Les quantités de déchets sont estimées à partir d'un pourcentage de la masse de l'unité fonctionnelle concernée.

En prenant comme exemple une tonne de béton préfabriquée, les déchets générés sont : 56 kg de béton hydraulique (liés à la mise en œuvre) et 50 kg d'emballages (bois, carton et film plastique). Ces pourcentages pris en compte sont issus des FDES de l'INIES et des données métiers. Un extrait de ces pourcentages est présenté dans le tableau ci-dessous.

Matériaux	Métaux	Déchets non dangereux	Déchets inertes	Bois B	Plastique moyen
Acier	0,025	0	0	0,004	0,003
Aluminium	0,025	0	0	0,004	0,003
Asphalte	0	0,015	0	0,0375	0,0125
Béton hydraulique	0	0	0,003	0	0
Béton préfabriqué	0	0	0,056	0,0375	0,0125
Bois	0	0	0	0,0375	0,0125
Enduits/revêtements résine	0	0	0	0,0375	0,0125
Enrobés bitume	0	0,015	0	0	0
Liants hydrauliques	0	0	0	0,0375	0,0125
Matériel électronique	0	0	0	0,0375	0,0125
Plastiques/polymères	0	0	0	0,0375	0,0125
Végétation	0	0	0	0	0,01

Dans l'évaluation GES, les emballages et chutes ainsi que les déchets ménagers et les eaux usées sont attribués à l'élément fonctionnel chantier et la base vie.

Déplacements

Pour le déplacement du personnel il n'a été considéré que des trajets routiers dans le cas des projets d'infrastructure. Les distances domicile-travail tout comme la répartition modale des trajets peuvent être prises des enquêtes ménages déplacements de la zone du projet. S'il s'agit d'une zone périurbaine rurale, peu desservi par des lignes de transports en commun réguliers, la part modale peut être assimilée intégralement à des déplacements en voiture particulière.

Le nombre de déplacements domicile/travail est estimé par phase de vie du projet. Ce nombre est donné par la durée des travaux et les cadences de production (phase construction et maintenance), ainsi que par le personnel d'exploitation prévisionnel. Les FE retenus sont ceux de l'ADEME. Par exemple, les trajets en voiture particulière en périphérie urbaine émettent 0,3254 kgCO₂e/véh.km.

En phase d'exploitation, le nombre de employés nécessaires à l'opération des installations est obtenu à partir du retour d'expérience de la société en charge. À partir de ce nombre et des horaires de présence prévisionnels, le nombre de déplacements (en passagers.km) est déterminée sur la période d'évaluation concernée.

Immobilisations

Les immobilisations correspondent à l'ensemble des moyens matériels et aux installations temporaires qui sont nécessaires à la réalisation du projet. Dans les immobilisations du projet sont considérés les engins de chantier et d'entretien ainsi que la base vie et les cantonnements du chantier. Afin de tenir compte de l'empreinte carbone générée par leur fabrication, le total des émissions est amorti sur la durée d'utilisation dans le cadre du projet.

Les facteurs d'émission utilisés sont calculés sur la base de données de l'ADEME. Ainsi, on retient le FE des machines (3 670 kgCO₂e/t) pour les engins de chantier et d'entretien, et le FE des bureaux en métal (158 kgCO₂e/m²) pour les cantonnements et la base vie.

Pour pouvoir adapter ces FE à l'utilisation réelle des engins, ils ont été convertis en kgCO₂/(tonne.jour) en considérant une durée de vie de 20 ans pour les engins et une utilisation annuelle de 251 jours (équivalent jours ouvrés). Le FE initial est donc divisé par 5020 (20*251) ce qui correspond à 0,73 kgCO₂e/(tonne.jour). De la même façon, on obtient le FE des cantonnements qui correspond à 0,032 kgCO₂e/(t.m²).

Émissions hors travaux

Études de conception et contrôle technique

La quantification des émissions liées aux études de conception et aux contrôles techniques est faite sur une approche macroéconomique. L'ADEME définit des ratios monétaires pour différents secteurs d'activités en tenant compte des émissions consignées dans les Bilan Carbone® des entreprises. Ainsi, en phase conception un ratio monétaire est appliqué aux montant des études : 110 kgCO₂e/k€ (ratio monétaire pour une activité de conseil). Quant aux contrôles techniques, le ratio appliqué est de 170 kgCO₂e/k€ (ratio monétaire pour une activité de service d'architecture et d'ingénierie).

Changement d'affectation du sol

Une modification dans l'affectation du sol engendre l'émission de GES ainsi qu'un changement dans les capacités de captation de carbone. Pour tenir compte de cet impact, l'ADEME propose une méthode d'évaluation sur la base des dynamiques de stockage carbone en fonction du type de sol étudié. Par exemple les FE proposés par l'ADEME pour un changement d'affectation d'un sol Cultivé vers un sol imperméabilisé est de 190 t CO₂e/ha. Un extrait des facteurs d'émissions du changement d'affectation des sols est présenté dans le tableau ci-dessous :

	Cultures	Prairies	Forêts	sols non imperm.	sols imperm.
Cultures en terres arables		-1,80	-1,61	0	190
Prairies permanentes	3,48		-0,37	0	290
Forêts	2,75	0,37		0	290

Consommation d'énergie des équipements

Mis à part la consommation de carburant des engins de chantier, d'autres postes de consommation directe d'énergie sont identifiés dans le cycle de vie du projet. En particulier, la consommation des équipements techniques d'exploitation de l'infrastructure ne doit être pas négligée. Les consommations d'énergie de ces derniers sont estimées à partir du bilan puissance réalisé pour le dimensionnement des installations.

À la puissance nécessaire, un temps d'utilisation annuel est attribué à chacun des équipements en fonction de leur usage (en supplément des coefficients de simultanéité et d'utilisation). Le produit de ces données permet de calculer l'électricité consommée en kWh. D'autres consommations, telles que le chauffage ou l'ECS sont aussi à intégrer. Ainsi, toute consommation d'énergie (gaz, bois, essence) doit être identifiée. Les FE utilisés sont ceux de l'ADEME qui répertorie l'intégralité des sources d'énergie en France et propose différentes unités de mesure (tep, GJ, kWh, kWh PCI, kWh PCS, etc.)

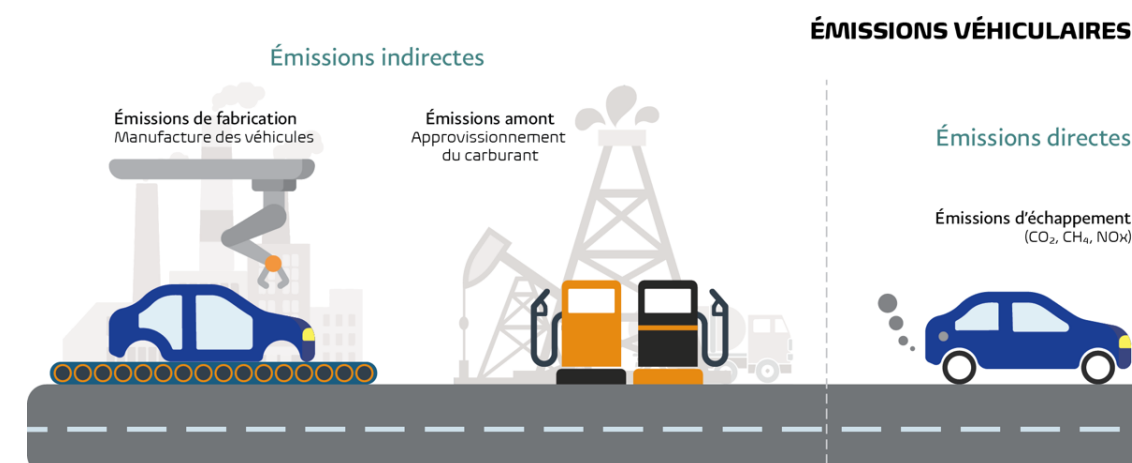
Les émissions véhiculaires

La méthodologie d'évaluation de l'empreinte carbone des projets d'infrastructure prend en compte les émissions produites par le projet suivant toutes ses phases de vie. À la différence des autres phases, la phase d'utilisation est particulière vis-à-vis du périmètre d'évaluation car l'impact induit par l'infrastructure ne se limite pas aux emprises du projet mais se répercute aussi sur d'autres axes routiers adjacents.

Le but de la méthode étant aussi d'évaluer les émissions GES induites par le projet d'infrastructure, l'impact en phase d'utilisation est estimé à partir de la variation des déplacements projetés des usagers par rapport à une situation de référence (qui résulte des modifications apportées par le projet sur le réseau de transport). Les impacts des projets d'infrastructure sur les réseaux de transport pris en compte pour l'évaluation GES sont : la diminution des distances parcourues, la modification des vitesses de circulation et la réduction des phénomènes de congestion.

Ainsi, la méthode d'évaluation de l'empreinte carbone en phase d'utilisation consiste d'abord à estimer les émissions GES des véhicules au sein du périmètre impacté par le projet suivant les scénarii référence (fil de l'eau) et projet. Ces scénarii sont construits à partir des résultats obtenus lors de la modélisation du réseau de transport et qui permettent de quantifier les impacts dans la circulation cités dans le paragraphe précédent.

Dans la comptabilité carbone, les émissions GES des véhicules sont de deux types : émissions directes et indirectes. Les émissions directes correspondent aux GES produits par la combustion des carburants consommés par les moteurs des véhicules et qui prennent place dans le périmètre d'évaluation. Les émissions indirectes correspondent aux GES émis en dehors du périmètre d'évaluation issus de la fabrication des véhicules et de la production et distribution des carburants consommés. Le schéma montré dans la figure ci-dessous représente les différentes émissions GES.



Deux approches sont utilisées afin d'estimer les émissions GES des véhicules. La première est basée sur la méthode COPERT V. Elle permet le calcul des émissions directes à partir des facteurs de consommation (FC) de carburant (en g/véh.km) d'un parc véhiculaire moyen constitué de VL et PL. Il est à noter que les FC sont calculés par vitesse de circulation. Sur la base des consommations véhiculaires calculées pour l'ensemble des brins au sein du périmètre défini, seuls les FE des GES calculés par la méthode COPERT V sont retenus (kg CO₂e/véh.km).

La seconde approche consiste à utiliser la méthode développée par l'ADEME qui sert à calculer les émissions liées aux déplacements routiers. Puisque l'approche par la méthode COPERT V permet un calcul plus précis des émissions directes, seuls les FE de l'ADEME concernant les émissions indirectes sont utilisés pour compléter l'estimation de l'ensemble des émissions véhiculaires.

Cette méthode utilise des FE moyens qui prennent en compte les émissions liées à la production de l'énergie consommée et la fabrication des véhicules. Les émissions liées à la fabrication des véhicules prennent en compte l'empreinte carbone moyenne de la production d'un véhicule qui est affectée à leur durée de vie moyenne. Par exemple, pour une voiture thermique moyenne, son empreinte de fabrication est estimée à 6,3 tCO₂e, étalée sur une durée de vie de 200 000 km. Ainsi, chaque km parcouru se voit affecté une empreinte carbone de 31,5 gCO₂.

5.2. Annexe 2 : Note de calcul du gisement d'économies GES

Analyse des émissions majoritaires

À l'issue du bilan GES effectué pour les différentes phases du cycle de vie de l'infrastructure, les éléments les plus émetteurs du projet ont été identifiés. En prenant en compte les émissions de ces postes ainsi que leur potentiel de réduction de GES, six corps de métiers ont été retenus pour effectuer une analyse détaillée. Cette analyse vise à apporter les sous-détails des émissions calculées afin de proposer des mesures de décarbonation.

Les mesures de décarbonation sont accompagnées d'une estimation du potentiel de réduction calculée pour chacun de ces corps de métier. À ce stade de l'étude ces calculs incorporent des fortes incertitudes et les émissions réduites calculées correspondent au gisement d'économies carbone. Il est à noter que la notion de gisement correspond à des économies futures si les prescriptions sont respectées en phase chantier.

Cependant, l'exploitation de tout ou partie de ce gisement nécessite la validation d'un certain nombre d'hypothèses qui peuvent évoluer suivant l'avancement des études dans la phase de conception. Ainsi, les résultats

présentés ne sont pas définitifs et constituent une première estimation qui sera affinée, approfondie et complétée avec le reste de mesures comprises dans le dossier environnemental.

Démarche et axes de réduction

Les mesures de décarbonation des émissions GES suivent deux axes principaux. Le premier consiste à privilégier les matériaux à contenu carbone bas. En effet, du fait de leur énergie grise, les intrants sont souvent le poste GES majoritaire des projets d'infrastructures. Ainsi, les matériaux constituent le principal levier de réduction des émissions GES. Le recours à des matériaux recyclés et alternatifs permet de réduire de façon substantielle l'impact du projet. En plus, privilégier l'approvisionnement local des fournitures diminue la quantité de fret nécessaire et donc l'empreinte carbone globale.

Le second axe consiste à revaloriser et réutiliser les déchets produits par le projet. En effet, une partie importante des déchets des travaux de construction et maintenance des infrastructures peuvent être revalorisés sur site. Tel est le cas des gravats de démolition réutilisables dans les fondations mais aussi des matériaux recyclables triés et envoyés vers les filières correspondantes. En plus de la quantité des déchets à traiter, le fret d'évacuation est aussi réduit améliorant, ainsi le bilan GES de l'opération.

Ensuite, la démarche de maîtrise de l'empreinte carbone devra inclure un suivi des GES le long des étapes du projet assurant ainsi le respect des objectifs carbone qui font partie des engagements du MOA auprès des différentes parties prenantes. Enfin, le suivi assurera la compréhension et l'engagement des acteurs de la chaîne valeur dans la démarche de réduction des GES du projet.

Matériaux à contenu carbone réduit

Dans cette section sont abordées les mesures de décarbonation correspondant à l'utilisation des matériaux bas carbone dans les différents corps de métier. En plus de privilégier les matériaux bas-carbone, la démarche d'approvisionnement devra privilégier les fournitures auprès des entreprises locales afin de réduire les émissions du fret de livraison.

Concernant les corps de métier analysés, ils correspondent à des travaux dans lesquels le choix des matériaux alternatifs et recyclés est plausible vis-à-vis des contraintes techniques et des options bas-carbone existantes dans le marché. D'autre part, les matériaux retenus pour l'analyse correspondent à ceux pour lesquels des alternatives connues existent et sont commercialisées. Le **Tableau 5** récapitule l'ensemble des corps de métier et les matériaux faisant l'objet de mesures de décarbonation. Le tableau présente aussi la masse consommée et l'empreinte carbone en phase construction.

Tableau 5 : Récapitulatif des corps de métier, de la quantité et du contenu carbone des matériaux analysés

inv_n2	métier	masse (tonne)	GES (tCO ₂ e)
Acier	Équipements	5 028	12 225
	Génie civil	36	44
	Ouvrages d'art	13 045	22 426
Aluminium	Équipements	80	777

Béton hydraulique	Équipements	39 546	2 964
	Génie civil	622	66
	Assainissement et AEP	10 316	870
	Ouvrages d'art	158 013	17 588
Béton préfabriqué	Équipements	8 858	1 053
	Assainissement et AEP	2 444	396
Enrobés bitume	Chaussées et voiries	524 093	21 600
	Équipements	0,02	0,00
	Ouvrages d'art	2 429	102
Graviers/granulats	Chaussées et voiries	1 057 253	2 707
	Équipements	128	0,05
	Assainissement et AEP	121 260	0,29
	Terrassements	4 623 598	3 787
	Travaux préparatoires	316 248	0,00
Liant hydraulique	Équipements	2,75	0,58
	Génie civil	35	9,65
	Assainissement et AEP	31	18
Plastiques/polymères	Équipements	9,54	25
	Assainissement et AEP	79	278
	Ouvrages d'art	5,07	2,19

Le premier des matériaux abordé par l'analyse est le béton. En effet, sur l'ensemble du cycle de vie, les métiers retenus consomment un total de 219 799 tonnes, ce qui représente environ 22 936 tCO₂e. Dans ce cas, la mesure préconisée consiste à privilégier le béton à base de laitier de haut fourneau, ce qui réduit l'utilisation de clinker dont l'énergie grise est nettement plus élevée.

L'évaluation de cette mesure est faite en remplaçant le facteur d'émission ciment CEM II utilisé dans les bétons conventionnels par celui du ciment incorporant du laitier (CEM III/A). Un dosage moyen de 300 kg/m³ de béton résulte en une consommation d'environ 27 475 tonnes de ciment. Le gisement de réduction attendu pour cette mesure devrait atteindre les **7 556 tCO₂e**, suivant les résultats présentés dans le **Tableau 6**.

Tableau 6 : Détails de calcul des mesures de décarbonation concernant les matériaux bas-carbone

Inv. E3	U.F.	Quantité	F.E. (kg CO ₂ e)	GES (tCO ₂ e)	Nature
Ciment CEM II	tonne	27 475	736	20 221	Réduites
Ciment CEM III/A	tonne	27 475	461	12 666	Mesures

L'utilisation de béton bitumineux incorporant des taux de recyclage est préconisée pour les chaussées. Sur la base des retours d'expérience, l'hypothèse de taux de recyclage moyen des enrobés peut atteindre le 30% d'incorporation d'AER dans les formulations sans poser des difficultés techniques. Suivant cette hypothèse, cette mesure permettrait d'économiser jusqu'à **2 209 tCO₂e** d'après les estimations présentées dans le **Tableau 7**.

Ensuite, l'ensemble de consommations de métaux est d'environ 18 108 tonnes d'acier et 80 tonnes d'aluminium. Dans ce cas, la mesure de réduction consiste à privilégier les équipements (panneaux, poteaux, etc.) en métal incorporant une part de matières premières recyclés.

En effet, le choix des métaux recyclés représente un fort levier de réduction des GES sans pour autant nécessiter une réévaluation technique préalable. L'évaluation des réductions est faite à partir de la différence entre les FE pour les métaux neufs et les FE pour ceux issus du recyclage. D'après les estimations présentées dans le **Tableau 7**, la réduction de GES pourrait atteindre le **18 631 tCO₂e**.

En plus des métaux, le projet nécessite des matières plastiques. Les postes les plus importants d'utilisation sont l'assainissement et les géotextiles qui comptent un total d'environ 93 tonnes. La démarche de réduction devra privilégier les fabricants incorporant des plastiques recyclés. En s'appuyant sur un taux de recyclage moyen de 30%, cette mesure permettrait de réduire de **61 tCO₂e** le bilan GES initial du projet.

Tableau 7 : Détails de calcul des mesures de décarbonation concernant les matériaux à taux de recyclage élevé

Inv. E3	U.F.	Quantité	F.E. (kg CO ₂ e)	GES (tCO ₂ e)	Nature
Aluminium [neuf]	tonne	80	7 803	626	Réduites
Aluminium [recyclé]	tonne	80	562	45	Mesures
Acier ou fer blanc [neuf]	tonne	4 038	2 211	8 929	Réduites
Acier ou fer blanc [recyclé]	tonne	4 038	938	3 788	Mesures
Aciers HA [ArcelorMittal]	tonne	9 060	1 230	11 144	Réduites
Aciers HA, armatures passives	tonne	9 060	607	5 499	Mesures
Acier structurel : profilés et tôles	tonne	623	1 130	704	Réduites
Acier laminé à chaud, 100% recyclé	tonne	623	967	603	Mesures
Aciers de tôles fortes [ArcelorMittal]	tonne	4 386	2 600	11 404	Réduites
Acier laminé à chaud, 100% recyclé	tonne	4 386	967	4 241	Mesures
Grave bitume 3, fioul à chaud	tonne	389 479	42	16 264	Réduites
Grave bitume 3, fioul à chaud [30% AER]	tonne	389 479	37	14 604	Mesures
BBSG, fioul à chaud	tonne	0,00	44	0,00	Réduites
BBSG, fioul à chaud [30% AER]	tonne	0,00	40	0,00	Mesures
BBM, fioul à chaud	tonne	137 043	43	5 900	Réduites
BBM, fioul à chaud [30% AER]	tonne	137 043	39	5 352	Mesures
Plastique, moyenne [neuf]	tonne	93	2 383	222	Réduites
Plastique, moyenne [recyclé]	tonne	28	202	5,65	Mesures
Plastique, moyenne [neuf]	tonne	65	2 383	156	Mesures

Revalorisation en filière

Cette section est dédiée à l'analyse des mesures de décarbonation concernant la réutilisation sur site des déchets et la revalorisation de ceux qui sont évacués. En plus, une variante technique concernant le traitement des sols est

aussi évaluée. En plus de déchets, les mesures évaluées modifient les distances et les volumes transportés. Le **Tableau 8** montre la liste de corps de métier abordés, les quantités de déchets et de fret produit ainsi que les émissions GES associées pour la phase construction.

Les corps de métier retenus correspondent à ceux dont les déchets produits peuvent être revalorisés lors des travaux de construction et de maintenance. Ainsi, la génération des déchets et leur réutilisation correspondent à la même période de travaux. Afin de montrer la totalité du gisement de réduction, les matériaux revalorisables sont comptabilisés dans leur totalité. Cependant, il est possible qu'une partie des déchets considérés ne puissent pas être revalorisés.

Tableau 8 : Récapitulatif des déchets, du fret d'évacuation et émissions GES par corps de métier

inv_n3	inv_u	métier	quantité	GES (tCO ₂ e)
Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	tonne.km	Équipements	746 601	53
		Génie civil	21 600	2
		Ouvrages d'art	788 932	56
		Travaux préparatoires	12 210 532	868
		Assainissement et AEP	3 461 821	246
		Terrassements	96 212 501	6 841
Déchets putrescibles [incinération]	tonne	Travaux préparatoires	420	19
		Métaux ferreux [hors recyclage]		
		Travaux préparatoires	1 688	14
Béton, briques, tuiles et céramiques [élimination]		Équipements	4	0,03
		Ouvrages d'art	1 044	10
		Travaux préparatoires	20 257	188
Déchets non dangereux en mélange (DIB) [stockage]		Équipements	56	0,84
		Terrassements	321 583	4 824
		Équipements	14 873	104
		Génie civil	432	3
Déchets inertes en mélange [hors recyclage]		Ouvrages d'art	14 735	103
		Travaux préparatoires	102 925	722
		Assainissement et AEP	69 236	485
		Terrassements	1 281 083	8 980
		Équipements	225	0,00
		Ouvrages d'art	46 328	0,00
		Assainissement et AEP	13 082	0,00
Sols et terres inertes stockés sur site				
Articulé, 44 à 60 T diesel routier, 7 % de biodiesel	tonne.km	Équipements	64 932	4
		Génie civil	18 380	1

	Ouvrages d'art	483 457	33
	Travaux préparatoires	40 812	3
	Assainissement et AEP	194 466	13
	Terrassements	3 850	0,26

Les travaux de dégagement d'emprises (déboisement, débroussaillage) produisent 420 tonnes, soit **19 tCO₂e**. Les déchets verts ainsi engendrés peuvent faire l'objet d'une valorisation en mulch utilisable dans les espaces verts créés par le projet.

Pour les déchets verts, les émissions GES évitées sont calculées en retranchant les émissions associées à l'incinération. En revanche, les émissions liées à la consommation de carburant nécessaire au broyage des déchets verts est considéré. Ainsi, les économies totales attendues seraient de **17 tCO₂e** (voir **Tableau 9**).

Ensuite, les déchets produits par les travaux de réfection des chaussées et la dépose des équipements et signalisation existants sont aussi intégrés. Concernant les gravats d'enrobés bitumineux, l'évacuation vers des centrales à enrobé pour être incorporés dans la formulation d'enrobés recyclés est à privilégier. De la même façon, l'évacuation vers des filières de recyclage des déchets métalliques (équipements et signalisation) permettrait de réduire le bilan GES initial du projet.

Bien qu'à ce stade de l'étude les distances d'évacuation exactes restent inconnues, il est possible de réduire les émissions GES du traitement des déchets grâce à leur valorisation en tant que matière première pour la production de nouveaux matériaux. Ainsi, grâce au recyclage de ces déchets, il est possible de réduire les émissions GES de **4 825 tCO₂e** et d'en éviter 3 732 tCO₂e (voir **Tableau 9**).

Tableau 9 : Détails de calcul des mesures concernant la revalorisation des déchets

Inv. E3	U.F.	Quantité	F.E. (kg CO ₂ e)	GES (t CO ₂ e)	Nature
Métaux ferreux [hors recyclage]	tonne	1 688	8,00	14	Réduites
Métaux ferreux	tonne	1 688	- 2211,00	- 3732,36	Évitées
Déchets non dangereux en mélange (DIB) [stockage]	tonne	321 639	15	4 825	Réduites
Déchets putrescibles [incinération]	tonne	420	45	19	Réduites
Gazole non routier	litre	668	3,16	2,11	Mesures

Revalorisation sur site

Concernant les travaux de démolition des emprises et ouvrages existants produisent 21 305 tonnes de gravats qui pourraient aussi être valorisés et réduire les besoins en matériaux d'apport. Pour ce faire, la mesure préconisée consiste à effectuer un concassage des gravats de béton pour son incorporation dans les couches de fondation.

L'application de cette mesure permettrait de réduire :

- Les émissions liées aux opérations de mise en dépôt et de fonctionnement des ISDI.
- Les émissions issues de la production des granulats.

- Le fret d'évacuation des déchets et d'apport des matériaux. Cependant, une part de ce fret est conservée car attribuée au transport interne pour le stockage provisoire sur place.

Ce concassage peut être soit réalisé sur site ou bien dans un centre spécialisé en appliquant le principe du double fret. Compte tenu des volumes estimés et de l'emplacement des travaux, la solution du double fret serait la mieux adaptée. Ainsi, le calcul du gisement d'économies de cette mesure prend en compte les hypothèses suivantes :

- Distance de double fret de 40 km (dont l'aller est déjà comptabilisé dans le fret d'évacuation) ;
- Consommation en carburant pour concassage de 83 litre/h avec un rendement de 300 tonne/h ;
- Consommation en carburant pour manutention de 0,6 litre/m³.

Les travaux de revalorisation des gravats de démolition devraient émettre environ 103 tCO₂e mais permettrait d'éviter 253 tCO₂e, soit une économie de **150 tCO₂e**. Les détails de calcul sont montrés dans le **Tableau 10**.

Tableau 10 : Détails de calcul des mesures concernant la revalorisation des gravats de démolition sur site

Inv. E3	U.F.	Quantité	F.E. (kg CO ₂ e)	GES (t CO ₂ e)	Nature
Béton, briques, tuiles et céramiques [élimination]	tonne	21 305	9,30	198	Réduites
Gazole non routier	litre	5 894	3,16	19	Mesures
Gazole non routier	litre	7 519	3,16	24	Mesures
Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	tonne.km	852 191	0,07	61	Mesures
Granulats, roche massive [sortie carrière]	tonne	21 305	2,56	55	Réduites

5.3. Annexe 3 : Résultats du modèle multimodal

Le kilométrage en véh.km par an entre la mise en service (2030) et l'horizon 2050 est présenté dans le **Tableau 11** et le **Tableau 12** pour le scénario référence et le scénario projet respectivement.

Tableau 11 : Kilométrage des VL et PL par an pour le scénario référence

Année	Véh.km VL	Véh.km PL
2030	1 584 057 823	114 886 877
2031	1 596 077 045	115 178 875
2032	1 608 096 267	115 470 872
2033	1 620 115 489	115 762 870
2034	1 632 134 712	116 054 867
2035	1 644 153 934	116 346 865
2036	1 656 173 156	116 638 862
2037	1 668 192 378	116 930 860

2038	1 680 211 600	117 222 857
2039	1 692 230 822	117 514 855
2040	1 704 250 045	117 806 852
2041	1 716 269 267	118 098 850
2042	1 728 288 489	118 390 847
2043	1 740 307 711	118 682 844
2044	1 752 326 933	118 974 842
2045	1 764 346 155	119 266 839
2046	1 776 365 377	119 558 837
2047	1 788 384 600	119 850 834
2048	1 800 403 822	120 142 832
2049	1 812 423 044	120 434 829
2050	1 824 442 266	120 726 827

5.4. Annexe 4 : Note de calcul détaillée du BGES

La note de calcul détaillée du bilan de gaz à effet de serre sur laquelle s'appuie l'étude est à retrouver ci-après.

Tableau 12 : Kilométrage des VL et PL par an pour le scénario projet

Année	Véh.km VL	Véh.km PL
2030	1 699 815 484	133 960 303
2031	1 715 417 413	134 212 716
2032	1 731 019 343	134 465 130
2033	1 746 621 272	134 717 543
2034	1 762 223 202	134 969 956
2035	1 777 825 131	135 222 370
2036	1 793 427 060	135 474 783
2037	1 809 028 990	135 727 196
2038	1 824 630 919	135 979 610
2039	1 840 232 849	136 232 023
2040	1 855 834 778	136 484 436
2041	1 871 436 708	136 736 850
2042	1 887 038 637	136 989 263
2043	1 902 640 566	137 241 677
2044	1 918 242 496	137 494 090
2045	1 933 844 425	137 746 503
2046	1 949 446 355	137 998 917
2047	1 965 048 284	138 251 330
2048	1 980 650 213	138 503 743
2049	1 996 252 143	138 756 157
2050	2 011 854 072	139 008 570

