

Bussy-Saint-Georges
ZAC de la Rucherie

Bilan GES

24 septembre 2021

Table des matières

<i>Liste des abréviations</i>	5
<i>Éléments de langage et définitions</i>	6
<i>Introduction</i>	7
1.1. L'évaluation carbone.....	7
1.2. Objectifs de l'évaluation.....	8
1.3. Outil utilisé pour l'évaluation.....	8
<i>Méthodologie d'évaluation</i>	10
2.1. Principe de calcul.....	10
2.2. Les données d'activité.....	10
2.3. Les facteurs d'émissions.....	10
2.4. Les axes structurants de l'évaluation.....	11
2.4.1. Le cycle de vie du projet.....	11
2.4.2. Les corps de métier.....	11
2.4.3. Les postes d'émissions.....	12
2.5. Période d'évaluation.....	13
2.6. Périmètre d'évaluation.....	13
2.7. Frontières de l'évaluation.....	14
<i>Données d'entrée</i>	15
3.1. Le détail quantitatif estimatif.....	15
3.2. Les surfaces bâties.....	16
3.3. Les ateliers de production.....	17
3.4. L'état initial de l'environnement et les emprises du projet.....	17
3.5. Les équipements techniques.....	18
3.6. Bâtiments : matériaux et niveaux énergétiques visés.....	18
<i>Résultats de l'évaluation pour les aménagements extérieurs</i>	20
4.1. Bilan global.....	20
4.1.1. Phase construction (A1-A5).....	21
4.1.2. Phase maintenance (B2-B5).....	22
4.1.3. Phase exploitation.....	23
4.2. Bilan par poste d'émission.....	24
4.2.1. Les engins de chantier.....	24

4.2.2.	Les intrants	24
4.2.3.	Les déchets.....	25
4.2.4.	Le fret	26
4.2.5.	Les déplacements	26
4.2.6.	Les immobilisations	27
4.2.7.	Le changement d'affectation du sol.....	28
4.3.	Résultats de l'évaluation pour les bâtiments	29
	<i>Comparaison des scenarii</i>	<i>31</i>
5.1.	Voiries perméables	31
5.2.	Bande boisée, autoroute A4	32
5.3.	Programmation mixte bois-béton et niveaux d'énergie	33
5.4.	Réseau de chaleur bois	33
	<i>Analyse des mesures de réduction.....</i>	<i>35</i>
6.1.	Aménagements extérieurs.....	35
6.1.1.	Démarche et axes de réduction.....	35
6.1.2.	Matériaux à contenu carbone réduit	36
6.1.3.	Revalorisation des déchets	38
6.2.	Bâtiments.....	40
6.2.1.	Passage en une programmation tertiaire 100% en bois ou mixte bois-béton.....	40
6.2.2.	Passage en une programmation tendant à 100% vers le niveau Energie 2.....	40
	<i>Conclusion</i>	<i>41</i>
	<i>Annexes</i>	<i>43</i>
	Annexe 1 : Engins de chantier	43
	Annexe 2 : Métrés des intrants.....	44
	Annexe 3 : Base de données FE.....	51

Suivi des modifications

Indice	Date	Sommaire des modifications	Rédaction	Vérification	Approbation
A	24/09/2021	Première émission	MR	VT	
B	18/10/2021	Correction des erreurs de rédaction. Intégration des lisères boisées	MR	VT	
C	29/10/2021	Modification des scénario de référence	MR	VT	

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)
CO ₂ e	Dioxyde de carbone équivalent
COP	Coefficient de performance
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
RT	Règlementation thermique
SNCU	Syndicat National du Chauffage Urbain et de la Climatisation Urbaine
VL	Véhicule léger
PL	Poids lourds (PTAC > 3,5 tonnes)

Éléments de langage et définitions

Terminologie	Définition
Bas carbone	Matériaux ou techniques permettant de diminuer l'empreinte carbone en comparaison des solutions dites conventionnelles.
Climat	Conditions météorologiques de long terme propres à une région déterminée. Mesuré en termes de précipitations moyennes et températures de saison.
CO₂e	Équivalent CO ₂ e, permettant de ramener le potentiel de réchauffement climatique des GES à l'unité commune (potentiel 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 produits.
Cycle de vie	Ensemble des phases du projet en commençant par la construction de l'infrastructure, son fonctionnement et sa fin de vie.
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 évalué, la méthodologie d'évaluation permet de soustraire directement les émissions réduites
Émissions évitées	Une diminution des émissions des usagers rendue possible grâce au projet. Ces émissions ne peuvent pas être retirées du bilan 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 ressources, services rendu, fonctionnement, etc.)
Gaz-à-effet de serre	Composant gazeux qui absorbe la radiation infrarouge et retient la chaleur (potentiel de réchauffement climatique)
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 de cycle de vie	Récapitulatif exhaustif des activités et des flux de matière et d'énergie les plus importantes qui sont nécessaires pour la mise en service, le fonctionnement ou la fin de vie de l'infrastructure.
Jouvence	Notion assimilée au taux de remplacement qui découle de la durée de vie des matériaux mis en œuvre et de la période de l'évaluation GES.
Période d'évaluation	Période considérée pour l'inventaire des sources d'émission GES du projet suivant une approche de cycle de vie.
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.

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 (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.

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

- Exhaustivité : il inclut toutes les informations dimensionnantes concernant les activités entraînées par le projet sur l'ensemble de son cycle de vie.
- Relevance : l'évaluation carbone est approfondie et des mesures de réduction 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.

1.2. Objectifs de l'évaluation

Le maître d'ouvrage a souhaité réaliser un bilan des émissions de gaz à effet de serre (GES) du projet en phase conception pour être intégré dans l'étude d'impact. Ce bilan permet de mieux appréhender les émissions attendues durant les phases de construction et de fonctionnement de l'infrastructure et ainsi éclairer les réflexions sur l'équilibre et les conséquences du projet sur l'environnement. Lors des phases ultérieures, il permettra de faire évoluer les éléments de conception pour contribuer à l'atteinte des objectifs de réduction des GES sur lesquels les différentes parties prenantes se seront engagées.

Ainsi, l'objectif principal de l'approche est de contribuer à rationaliser les décisions du projet (programmation en matière de réduction des gaz à effet de serre), d'administrer le projet de manière durable. Elle doit conduire à des actions concrètes en matière de réduction des gaz à effet de serre.

L'objectif est aussi d'infléchir les comportements sur les bons ordres de grandeur en mettant en avant les postes 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.

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.

1.3. Outil utilisé pour l'évaluation

Le Bilan GES est réalisé avec l'outil *InfraCost* pour l'ensemble des aménagements extérieurs. Il a été 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. L'outil est certifié par l'Association Bilan Carbone (ABC).

La partie bâtiment est traitée pas nos équipes dédiées à cette thématique. La méthodologie employée est celle du référentiel Energie et Carbone (E+C-).



Le référentiel Energie-Carbone a été rédigé par l'Etat et est une déclinaison directe de la Loi de la Transition Energétique. Il vient répondre à la nécessité d'intégrer la dimension « carbone » (facteur 4) et plus seulement la dimension « énergie » aux projets de construction neuve. Ce référentiel préfigure la future Réglementation 2020 qui sera donc à la fois énergétique et environnementale. L'expérimentation E+C-, lancée en avril 2016, a pour objectif d'obtenir un retour d'expérience significatif afin de déterminer quels seront les futurs niveaux de performance réglementaires.

La présente étude se base ainsi sur les retours d'expérience de cette expérimentation et sur la base de données associée des bâtiments évalués selon cette méthode entre 2016 et 2020.

Méthodologie d'évaluation

2.1. 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) combinée à leurs facteurs d'émission (kg CO₂e/unité) permettent d'estimer les GES émis. Le principe de calcul est montré dans la **Figure 1**.

Figure 1 - Principe de calcul des émissions GES d'un projet d'infrastructure



2.2. 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. Ces informations sont établies 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.

Concernant le volet bâtiment au stade des études actuelles, seules des orientations d'aménagement existent avec une programmation par lot. Nous utilisons donc ces données de programmation issues de la faisabilité du 16/06/2021 avec une répartition des surfaces de plancher par typologie de bâtiment (bureaux, industrie, parking silo).

2.3. Les facteurs d'émissions

Les facteurs d'émissions attribuent un ratio d'émissions GES par unité d'activité. Le calcul des facteurs d'émissions est réalisé suivant deux approches :

- l'analyse du cycle de vie, consistant à retracer l'ensemble des émissions produites (kg CO₂e/U) lors de l'extraction des matières premières, la fabrication et le transport des produits utilisés pour la réalisation et fonctionnement de l'infrastructure ;
- l'approche macroéconomique, où les émissions sont calculées sur la base des matrices économiques interconnectant les différents secteurs d'activité (kg CO₂e/€_{VA} issus du *Bilan Carbone®* organisation).

Ils sont majoritairement issus de la base ADEME mais peuvent également être complétés par des bases externes lorsque les informations manquent (Base *INIES*, *DIOGENE*, *Ecoinvent* ou directement les *FDES* des fournisseurs). Les FE employés dans cette évaluation sont présentés dans l'**Annexe 3**.

Dans le cas où une activité en particulier n'est pas répertoriée dans les bases de données, un FE est construit en utilisant les FE des constituants principaux (p. ex. pour la fourniture d'une armoire en acier, il est considéré le poids de l'armoire et le FE de l'acier). La construction des FE peut aussi mener vers une analyse de cycle de vie lorsque l'activité associée est majorante.

2.4. Les axes structurants 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.

La modélisation des flux engendrés par une activité 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.

Pour la partie bâtiment, à ce stade très avancé, l'impact carbone n'est pas évalué à partir des facteurs d'émission des fiches FDES de la base de données INIES comme cela est fait classiquement pour une opération de construction en cours de conception. Nous travaillons directement avec les ratios de kg CO₂e/m² SDP tous impacts comptabilisés (matériaux, consommations, chantier) issus des REX E+C-moyennés par typologie de bâtiment.

2.4.1. Le cycle de vie du projet

Les phases du cycle de vie considérés dans l'évaluation GES du projet sont :

- la production des intrants (A1-A3), ou « contenu carbone »
- la mise en œuvre des intrants (A4-A5), ce qui inclut l'énergie consommée lors des travaux ainsi que les déchets engendrés.
- le fonctionnement comprenant :
 - o l'utilisation (B1), correspondant au différentiel des émissions des usagers de l'infrastructure par rapport au fil d'eau, en tenant compte de l'évolution de la demande induite et des conditions de service modifiées par l'infrastructure.
 - o la maintenance (B2-B5), comportant les opérations de maintenance régulière et les travaux de rénovation selon la durée de vie des éléments constituants du projet.
 - o l'exploitation (B6), englobant l'énergie consommée par les équipements permettant le fonctionnement de l'infrastructure.
- la fin de vie (C1-C4), comprenant les travaux de démolition totale ou partielle, le dégagement des emprises et la remise en état des emprises de l'infrastructure .

2.4.2. Les corps de métier

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

En effet, chaque corps de métier assure la mise en œuvre des éléments constituants 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 entretenu ainsi que de l'énergie pour être exploité (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 (p. ex. le marquage au sol dont la durée de vie est de 10 ans, pour une période 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.

2.4.3. Les postes d'émissions

Les postes d'émissions représentent les flux principaux engendrés par le projet évalué. Les postes d'émission retenus dans le cadre de cette 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) ;

En plus de ces postes, le changement d'affectation du sol est aussi considéré dans les évaluations GES. Seulement, dans le cadre de ce projet, aucun changement d'occupation du sol n'a été identifié.

Concernant le poste bâtiment, les émissions seront agrégées pour toutes les phases (A1 à C4) et contributeurs de la méthode E+C-. Les émissions agrégées représentent ainsi les émissions totales des bâtiments sur leur durée de vie fixée règlementairement à 50 ans. Les contributeurs intégrés à chaque phase du cycle de vie sont les suivants :

- Produits de construction et équipements : il s'agit de prendre en compte les émissions des matériaux du bâtiment et des équipements (de leur production à leur fin de vie), autrement appelé indicateur «Eges_{PCE}»
- Consommations d'énergie en exploitation : cette valeur est calculée par le logiciel à partir des résultats du calcul RT2012
- Chantier : il s'agit de prendre en compte les émissions liées aux consommations d'énergie et d'eau sur chantier
- Consommations et rejets d'eau en exploitation

Tableau 1 - Postes contributeurs d'émissions GES par phase du cycle de vie du bâtiment

		Étapes du cycle de vie d'un bâtiment			
		Phase de production	Phase de Construction	Phase d'exploitation	Phase de fin de vie
Contributeurs	Produits de construction et équipements				
	Consommation d'énergie				
	Chantier				
	Consommation d'eau				

2.5. Période d'évaluation

La période d'évaluation correspond à la durée retenue pour la réalisation du bilan GES. Pour être en cohérence avec la base réglementaire des bilans GES du bâtiment, la période d'évaluation retenue est de **50 ans**. Concernant les phases du cycle de vie, la fin de vie n'est pas prise en compte car le projet n'a pas pour objet d'être démantelé.

Les travaux de maintenance dépendent de la durée de vie moyenne des éléments construits (voir **Tableau 3**) et de la période d'évaluation prise en compte. Puisque la fin de vie du projet n'est pas atteinte pendant la période d'évaluation GES de 50 ans, les travaux de maintenance sont intégrés de façon proportionnelle à leur durée de vie moyenne ce qui entraîne des jouvences décimales (par exemple 1,67 pour un élément dont la durée de vie est de 30 ans).

2.6. Périmètre d'évaluation

Le périmètre de l'évaluation se limite aux emprises bâties et les aménagements paysagers de la ZAC et n'inclut que les travaux qui relèvent de ce projet. Ainsi, les aménagements routiers liés à l'échangeur de Sycomore ne sont pas intégrés dans cette étude car ils ont fait l'objet d'une évaluation GES dédiée. Les emprises de la ZAC de la Rucherie ainsi que leur emplacement sont montrés dans la **Figure 2**.

Figure 2 - Implantation es emprises de la ZAC de la Rucherie



2.7. Frontières de l'évaluation

Les frontières du système modélisé par les inventaires du cycle de vie des éléments fonctionnels de l'infrastructure concernent :

- Le contenu carbone : l'évaluation GES part des facteurs d'émissions qui sont soit issus ou calculés à partir des bases de données, soit transmis par les fabricants. Ainsi, l'évaluation n'a pas pour vocation de remonter aux processus industriels de fabrication pour reconstituer les émissions GES engendrés par un matériau utilisé dans le cadre du projet.
- Le traitement des déchets : de façon analogue au contenu carbone, le système ne modélise pas les émissions engendrées par le traitement des déchets mais utilise directement les facteurs d'émission associés.
- Le recyclage des matériaux : il n'est pas modélisé dans le système à différence du emploi des matériaux sur site. Cependant, il intègre les facteurs d'émissions réduits des matériaux incorporant des taux de recyclage. L'envoi des déchets vers des filières de recyclage pour leur utilisation dans la fabrication des nouveaux matériaux est comptabilisé en tant qu'émission évitée (permettant de réduire l'impact de son futur acquéreur).
- Les employés : seuls leurs déplacements (trajets domicile-travail) sont intégrés dans le système, d'autres postes d'émission tels que les repas ne sont pas pris en compte.
- Le fret : les émissions induites par l'impact sur la circulation du fret engendré par les travaux de construction et maintenance ne sont pas pris en compte. Seules les émissions GES des carburants et d'amortissement des véhicules sont comptabilisés
- L'évaluation quantifie directement la différence des émissions GES entre le scénarii de référence et projet. En effet, seulement les activités impactées ou créées par le scénario projet sont évaluées. Ainsi, les émissions liées à l'entretien des chaussées et des glissières existantes ne sont pas quantifiées car le projet ne modifie ni la fréquence ni l'étendue de ces travaux.

Données d'entrée

3.1. Le détail quantitatif estimatif

À partir de l'estimatif (**Tableau 2**) du projet il a été possible de quantifier les différentes activités nécessaires à la réalisation des aménagements urbains et paysagers du projet. Cet estimatif a été réalisé à partir des détails disponibles au stade AVP. Il est donc vraisemblable que ces quantités évoluent au fur et à mesure de l'avancement des études de conception qui permettront de les affiner.

Chacun des travaux renseignés dans le DQE a fait l'objet d'une décomposition afin de constituer les inventaires de cycle de vie. Ceci permet d'établir les flux de matériaux et d'énergie et de les associer aux FE des bases de données exploitées, notamment lorsqu'il s'agit des travaux impliquant différentes activités (p.e. le bétonnage d'une dalle de péage : surface de dallage en m², quantité de béton mis en place en m³ puis converti en tonnes pour le calcul du fret).

De la même manière, les travaux chiffrés au forfait sont aussi décomposés à partir des informations renseignées par les équipes techniques correspondantes. L'ensemble d'éléments qui constituent le projet est présenté dans le **Tableau 3** et les détails des mètres dans l'**Annexe 2**.

Tableau 2 : Extrait du détail estimatif des travaux du projet de la ZAC de la Rucherie

RECAPITULATIF	
	Travaux Préparatoires
1	Voie Centrale -Emprise 29,9 m
2	Voie Centrale -Emprise 21 m
3	Voie Centrale -Emprise 18,5 m
4	Voie JOSEPH PAXTON -Emprise 26 m
5	Voie Secondaire -Emprise 22,3 m
6	Voie Sud -Emprise 12 m
7	Placette Centrale
8	Aire de Retournement
9	Lisière Forêt
10	Lisière A4
11	Axe paysager 1-Emprise 35 m
12	Axe paysager 2-Emprise 21 m
13	Axe paysager 3-Emprise 36 m
14	Axe paysager 4-Emprise 26 m
15	Axe paysager 5-Emprise 23 m
16	Axe paysager 6 -Emprise 23 m
17	Travaux traversée de réseaux par l'A4 et Dévoiement de réseau AEP

Tableau 3 : Éléments abordés dans l'évaluation GES, unités fonctionnelles et hypothèses de durée de vie

Métier	E.F.	Désignation	Unité	Qté.	Durée de vie (ans)
Phase conception	Études d'ingénierie	Montant des études	k€	7 000	
Installations temporaires	Chantier et base de vie	Création et repli base de vie	u	1,00	1
Utilisation des terres, leurs changements et la forêt	Changement d'affectation du sol	Changement d'occupation, emprise projet	ha	83	

Terrassement	Terrassement de surface	Terrassement fondation de voiries	m3	115 685	
Chaussées	Couche de surface	Voirie en enrobé bitumineux	m ²	16 895	15
Chaussées	Trottoirs, voies douces	Voirie en béton désactivé	m ²	13 623	30
Chaussées	Trottoirs, voies douces	Bordures, bordurettes et caniveaux	ml	4 065	30
Équipements	Éclairage	Éclairage public	ml	5 070	20
Signalisation	Signalisation horizontale	Marquage au sol	ml	3 665	10
Signalisation	Signalisation verticale	Signalisation statique	u	54	10
Aménagement	Espace vert	TV + plantation arbre	ha	2,27	
Génie civil	Réseaux et tranchées	Réseaux humides	ml	4 562	
Génie civil	Réseaux et tranchées	Réseaux secs	ml	5 305	
Chaussées	Trottoirs, voies douces	Voie entretien, terre engazonnée	m ²	7 880	
Aménagement	Espace vert	Plantation basse + T.V.	ha	7,73	
Chaussées	Trottoirs, voies douces	Voie en pavés	m ²	848	50
Aménagement	Espace vert	Plantation arbre, arbustes + T.V.	ha	0,02	
Équipements	Mobilier urbain	Mobilier urbain	m ²	4 100	30
Génie civil	Assainissement	Poste de refoulement	m3/an	1 480	30
Aménagement	Espace vert	Plantation arbres + T.V.	ha	0,29	
Chaussées	Trottoirs, voies douces	Voie piétonne en terre	m ²	8 100	50
Génie civil	Ouvrage divers	OH de prétraitement	m3	160	
Génie civil	Ouvrage divers	OH de rétention préfabriqué	m3	100	
Génie civil	Assainissement	Fossé enherbés	ml	1 500	
Aménagement	Espace vert	Plantation arbre, basse et T.V.	ha	7,18	
Aménagement	Espace vert	Création bande boisée	ha	10,25	
Travaux préparatoires	Dévoisement de réseaux	Dévoisement de réseau AEP	ml	520	

3.2. Les surfaces bâties

Pour la partie bâtiment il n'existe pas de détail quantitatif estimatif à ce stade des études. Comme développé plus haut, nous travaillerons donc avec des valeurs d'impact carbone moyennées ramenées au m² SDP, issues de la base de données E+C- et de données projets de mêmes typologies que celles concernées par l'étude.

Le tableau de programmation présent dans l'étude de faisabilité du 16/06/2021 indique les données d'emprise au sol du bâti et les SDP pour chacun des lots construits. A ce stade du projet, les quantitatifs de chaque opération ne sont pas fournis, nous utilisons donc des ratios type sur les bureaux (issus du logiciel VIZACAB) et sur les bâtiments industriels sur la base de la SDP considérée. Ainsi, les hypothèses prises en compte pour réaliser l'étude sont les suivantes :

Épannelage des bâtiments

Les données d'entrée dont nous disposons nous ont permis de réaliser une hypothèse d'épannelage des bâtiments. L'épannelage correspond à un ratio entre la surface de plancher du bâti et l'emprise au sol du bâti.

Nombre de bâtiments

Le nombre de bâtiments par lot qui a été utilisé pour l'étude est celui présenté sur le plan de programmation.

Typologie de bâtiment

Les typologies de bâtiment considérées pour l'étude sont celles présentées sur le plan de programmation : bureaux majoritairement, parking silo et bâtiments industriels.

3.3. Les ateliers de production

Des ateliers de travaux sont définis par type de métier. La composition des ateliers est définie à partir des informations issues de nos équipes techniques. Les engins de chantier utilisés et leur caractéristiques techniques sont listés dans l'Annexe 1.

En plus de la puissance des engins le pourcentage d'utilisation des engins permet de calculer la consommation horaire de carburant en appliquant la méthodologie EMEP - CORINAIR (EEA) « *air pollutant emission inventory guidebook 2016 - 1.A.4 - Non-road mobile sources and machinery* ». En plus de ces informations, chaque atelier a une cadence de production associée, ce qui permet d'estimer la durée d'utilisation et la consommation finale de carburant.

3.4. L'état initial de l'environnement et les emprises du projet

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. Le croisement de ces informations géoréférencées a permis d'estimer les surfaces impactées. Les emprises concernées par les changements d'affectation du sol sont montrées dans la Figure 4. Le calcul des surfaces en m² est récapitulé dans le Tableau

Figure 3 - Emprises du projet et leur modification sur l'utilisation des sols



Tableau 4 - Résultats des surfaces impactées par la réalisation du projet

Changement d'affectation du sol	Emprises	Surface (m ²)	Surface (ha)
Cultures vers Sols artificiels enherbés/arbustifs	98	77 556	7,76
Cultures vers Sols artificiels imperméabilisés	54	514 788	51
Cultures vers Prairies zones arbustives	6	30 543	3,05
Cultures vers Prairies zones herbacées	30	118 748	12
Forêts Feuillus vers Sols artificiels enherbés/arbustifs	6	3 368	0,34
Forêts Feuillus vers Prairies zones herbacées	2	4 145	0,41
Forêts Feuillus vers Prairies zones arbustives	1	147	0,01
Forêts Feuillus vers Sols artificiels imperméabilisés	2	8 674	0,87
Cultures vers Zones humides	1	27 146	2,71
Forêts Feuillus vers Zones humides	1	15 613	1,56

3.5. 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, les informations concernant le bilan puissance des équipements ne sont pas encore disponibles. Ainsi, le calcul des puissances et donc des consommations est basé sur les hypothèses de puissance électrique et de temps de fonctionnement présentées dans le **Tableau 5**.

Tableau 5 : Puissance des équipements électriques et leur consommation annuelle

Équipement	Puissance électrique	Fonctionnement journalier (h/jour)	Consommation annuelle (kWh/an)
Lampadaires	54 W/u	10	197,1 (u)
Pompe de refoulement	133 W/m ³	24	196,8

3.6. Bâtiments : matériaux et niveaux énergétiques visés

Nous avons pris des hypothèses sur les caractéristiques physiques et énergétiques des futurs bâtiments construits pour affiner le calcul et être au plus proche de la réalité du projet de la ZAC de la Rucherie.

En ce qui concerne les matériaux de superstructure des futurs bâtiments, les hypothèses considérées pour mener l'étude sont les suivantes :

- Pour les bâtiments de bureaux : 50% de la SDP construite totale sera réalisée en bois ou en mixte bois-béton (soit 115 864 m²) et les 50% restant de la SDP seront réalisés en 100% béton.
- Nous considérons que les bâtiments industriels seront réalisés en structure béton ou métal.

En ce qui concerne les niveaux de performance énergétique des futurs bâtiments, les hypothèses prises sont les suivantes :

- Niveau E2 du référentiel E+C- (soit BBC-Effinergie 2017) : 30% de la SDP totale des bureaux, soit 69 518 m².

- Niveau E0-E1 du référentiel E+C-: équivalent estimé à la future réglementation RE2020 : 70% de la SDP totale des bureaux, soit 162 209m² et 100% des bâtiments industriels.

Réalisation des simulations sur le logiciel Vizcab

Les simulations des bâtiments ont été réalisées sur le logiciel Vizcab, via son module Exploration. La configuration des informations spécifiques du projet de la Zac de la Rucherie a permis d'affiner les différentes simulations. Ainsi, les données d'entrée pour lancer les simulations sont les suivantes :

- Une volumétrie type :
 - o le pas d'étage : 3 mètres;
 - o le nombre d'étages par bâtiment : définit par le ratio SDP/emprise au sol;
 - o la forme du bâti : rectangulaire.
- D'autres paramètres du projet ont été saisis en fonction de chaque configuration de lot :
 - o l'orientation du bâtiment;
 - o la typologie du bâtiment : usage bureaux par exemple;
 - o la localisation (département, altitude, type d'environnement);
 - o les paramètres des choix de conception : bois ou béton (pour éléments horizontaux et verticaux de l'enveloppe et la structure).

Résultats de l'évaluation pour les aménagements extérieurs

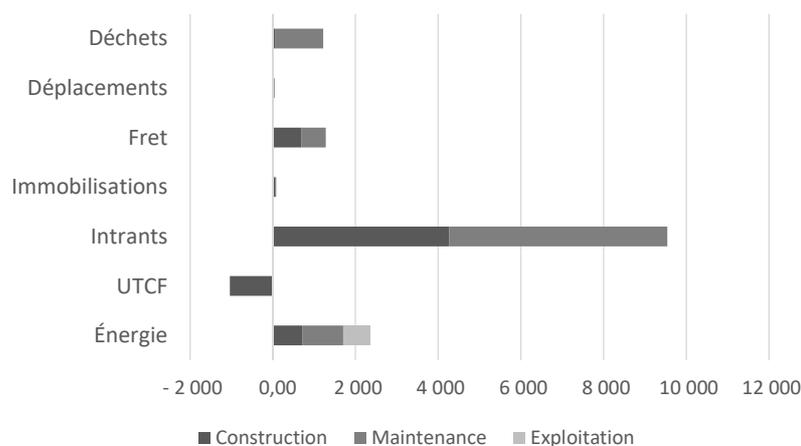
4.1. Bilan global

Le bilan global des émissions directes et indirectes est de **13 479 t CO₂e**. L'incertitude totale est estimée à 2 624 t CO₂e, soit 19%. La décomposition des émissions par poste d'émission est montrée dans la **Figure 4**. Il est à noter que le niveau d'incertitude estimé à ce stade est relativement important du fait des hypothèses de calcul prises en compte concernant les quantités de travaux.

Figure 4 : Émissions GES globales du projet par poste émetteur (hors usagers)

ZAC de la Rucherie, BGES par poste

Émissions GES, phase A1-B6 (t CO₂e)



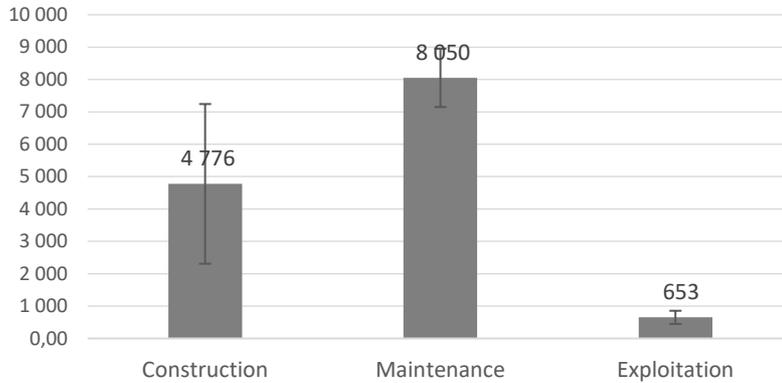
Inv. E1	Construction	Maintenance	Exploitation
Déchets	52	1 163	0,00
Déplacements	16	28	0,00
Fret	700	582	0,00
Immobilisations	53	31	0,00
Intrants	4 273	5 269	0,00
UTCF	- 1 039	0,00	0,00
Énergie	721	977	653

Une première observation des postes rend compte de l'importance de la part des émissions liées aux travaux de construction mais aussi de maintenance. En effet, ces émissions représentent 95% du total des émissions du projet. La répartition des émissions parmi les différentes phases du cycle de vie du projet est montrée dans la **Figure 5**.

Figure 5 : Émissions GES totales par phase du cycle de vie

ZAC de la Rucherie, BGES par phase

Émissions GES, phase A1-B6 (t CO₂e)



4.1.1. Phase construction (A1-A5)

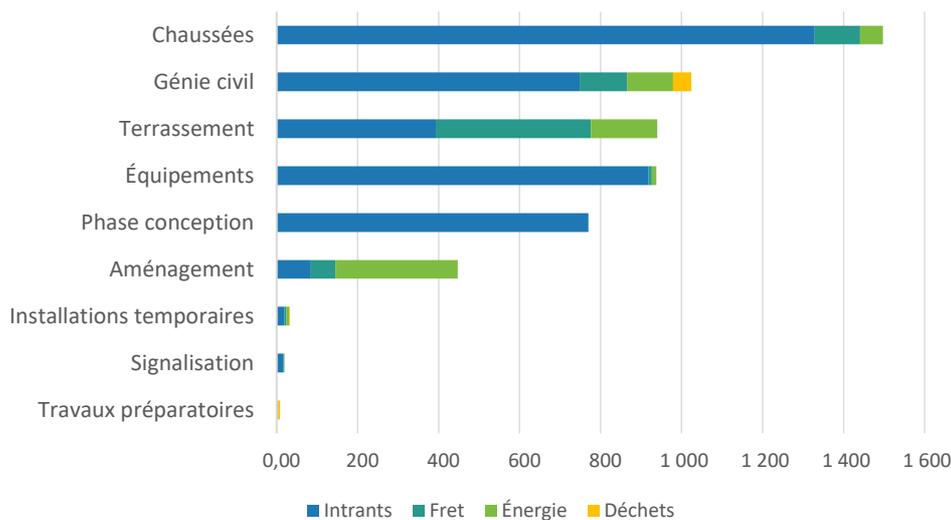
Suivant l'approche du cycle de vie, l'évaluation carbone a été menée pour les phases de construction, utilisation, maintenance et exploitation. Concernant la phase construction (A1-A5) les émissions ont été traitées par corps de métier, puis par poste d'émissions. Le total des émissions obtenues pour cette phase est de **5 815 t CO₂e** avec une incertitude de **2 467 t CO₂e**. La décomposition de ces émissions parmi les 4 postes principaux est présentée dans la **Figure 6**.

Quelques remarques sont à prendre en compte dans cette évaluation. Tout d'abord, les travaux de dégagement des emprises n'ont pas été pris en compte. En effet, à ce stade du projet, les quantités des travaux et leur nature n'ont pas été encore établis.

Figure 6 : Décomposition des émissions GES en phase construction par corps de métier et par poste d'émission

ZAC de la Rucherie, BGES phase Construction

Émissions GES par métier et par poste (t CO₂e)



Métier	Intrants	Fret	Énergie	Déchets
Chaussées	1 328	112	57	
Génie civil	748	117	114	45
Terrassement	393	383	164	
Équipements	919	8,09	11	
Phase conception	770			
Aménagement	80	71	365	
Installations temporaires	19	3,94	8,77	1,38
Signalisation	16	2,79	0,52	
Travaux préparatoires		1,50	1,65	5,53

De même, les émissions liées au changement dans la capacité de stockage carbone des sol (UTCf) sont intégrés dans la phase construction. Ces modifications entraîneraient une augmentation de **1 029 t CO₂e** de la capacité de stockage carbone des sols.

De plus, les études de conception et d'exécution nécessaires à la réalisation du projet sont aussi inclus dans la phase construction du projet. L'intégration de ces émissions dans la phase construction permet de simplifier la présentation et la visualisation des résultats.

Concernant l'installation du chantier, la base vie ainsi que les opérations de repli sont comptabilisées dans les installations temporaires. Il est rappelé que les déchets générés par la base vie y sont intégrés car ils font l'objet d'un stockage provisoire dans les bennes déchet se trouvant à proximité.

4.1.2. Phase maintenance (B2-B5)

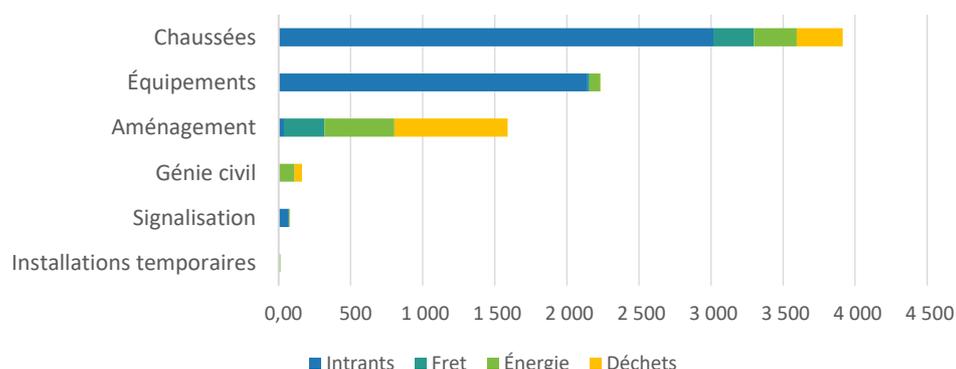
L'évaluation des émissions liées aux travaux de maintenance respecte la même méthodologie que celle utilisée pour la phase construction. En effet, certains travaux se font de façon répétitive en fonction des jouvences définies pour ce projet.

Cependant, en plus des travaux de mise en œuvre, la réfection des structures et des équipements requiert des travaux de démolition et de dépose de l'existant. Ces travaux ont été définis et des ateliers de travaux leur sont associés. Le traitement des déchets est aussi intégré dans les calculs. À ce point de l'évaluation, aucune hypothèse de recyclage n'a pas été intégrée. Elles feront l'objet d'une analyse ultérieure dans le **Chapitre 6** de ce rapport.

Figure 7 - Décomposition des émissions GES en phase maintenance par corps de métier et par poste d'émission

ZAC de la Rucherie, BGES phase Maintenance

Émissions GES par métier et par poste (t CO₂e)



Métier	Intrants	Fret	Énergie	Déchets
Chaussées	3 017	281	296	321
Équipements	2 144	12	75	2,65
Aménagement	37	282	484	787
Génie civil	0,85	3,02	106	53
Signalisation	70	3,51	4,21	0,04
Installations temporaires	0,50		11	

S'agissant des émissions GES correspondant à cette phase, l'estimation du total des émissions s'élève à **8 050 t CO₂e**, avec une incertitude de 11%. La décomposition des émissions par corps de métier est présentée dans la **Figure 7**.

4.1.3. Phase exploitation

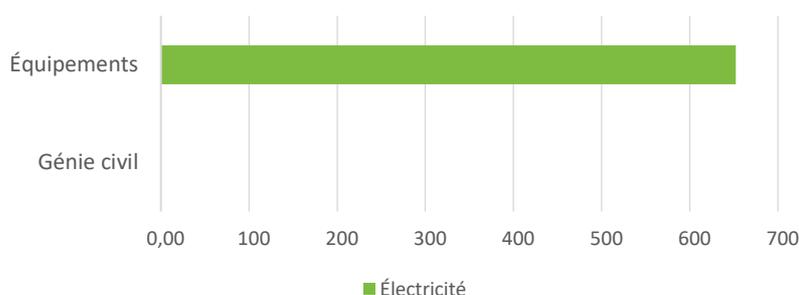
Les émissions correspondant à la phase d'exploitation du projet ne concernent que celles issues des consommations énergétiques des équipements installés. Pour rappel, les équipements d'exploitation sont composés par l'éclairage public et les postes de refoulement. Les résultats de puissance électrique et de consommation annuelle est montrée dans le **Tableau 5**

D'après les résultats obtenus, la consommation énergétique annuelle de l'ensemble d'équipements est d'environ 203 MWh. À la fin de la période d'évaluation de 50 ans, la consommation finale devrait atteindre 10 140 MWh et les émissions engendrées **653 t CO₂e** avec une incertitude de 10%. La **Figure 8** montre la répartition des émissions pour les équipements (éclairage) et le poste de refoulement (génie civil, assainissement).

Figure 8 : Répartition des émissions GES correspondant à la consommation des équipements techniques

ZAC de la Rucherie, BGES phase Exploitation

Émissions GES par métier et par poste (t CO₂e)



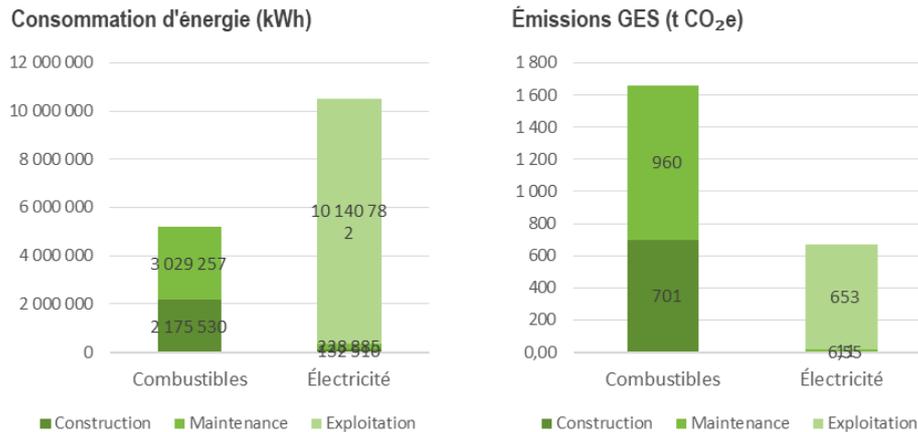
4.2. Bilan par poste d'émission

4.2.1. Les engins de chantier

La consommation de carburant et d'électricité ainsi que les émissions GES de l'utilisation des engins et des installations de chantier sont montrées dans la **Figure 9**.

Figure 9 : Consommation de carburant et d'électricité des engins et des installations de chantier.

ZAC de la Rucherie, consommation et BGES Énergie



4.2.2. Les intrants

Le bilan des intrants du projet concerne les matériaux de construction ainsi que les équipements. À partir des bases de données constituées pour l'évaluation du projet, la masse par unité fonctionnelle et les FE de production de chaque matériau/équipement permet de quantifier les flux de masse (tonnes) et le contenu carbone (t CO₂e) par type de matériaux.

Les répartitions des masses et du contenu carbone par type de matériau et par phase du projet sont présentées dans la **Figure 10** et **Figure 11**. Leur comparaison permet d'apprécier l'impact carbone de chaque matériau employé dans la phase de construction.

Figure 10 : Répartition des flux de masse et du contenu carbone par type de matériau en phase construction

ZAC de la Rucherie, BGES Intrants (Construction)

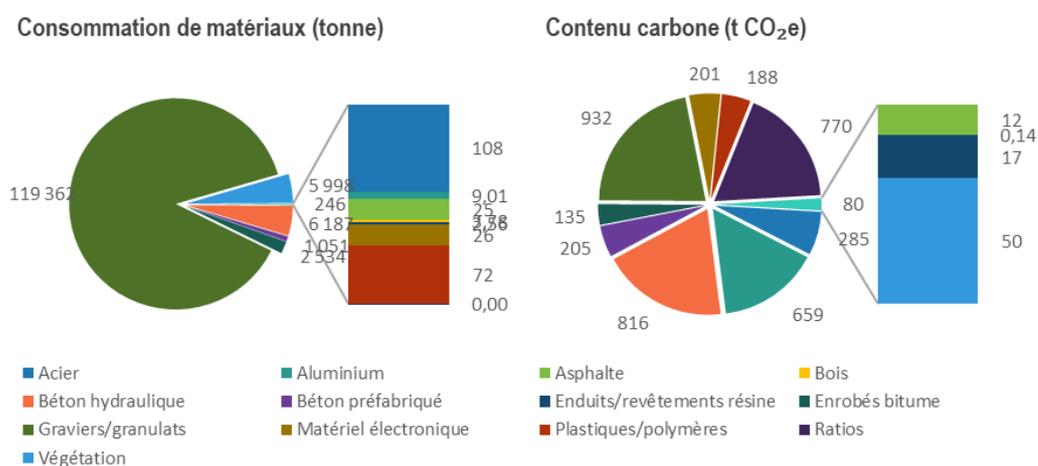
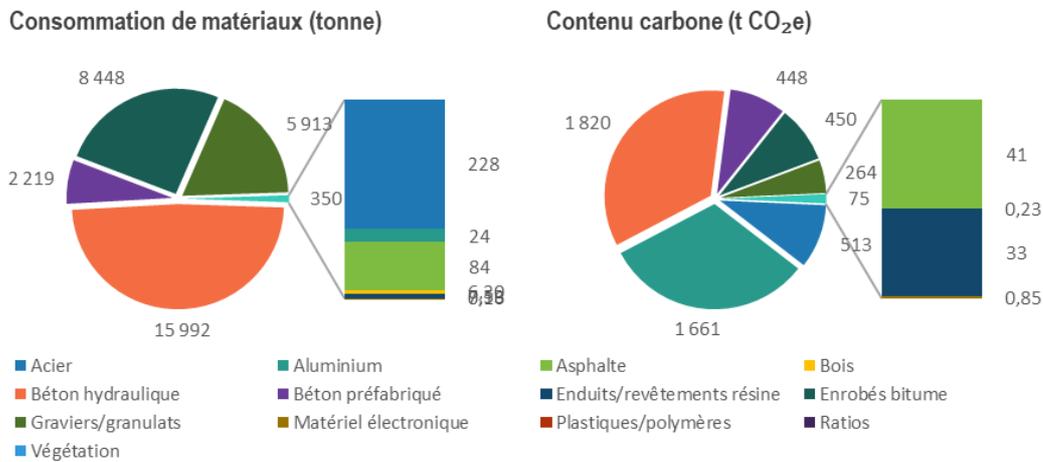


Figure 11 - Répartition des flux de masse et du contenu carbone par type de matériau en phase maintenance

ZAC de la Rucherie, BGES Intrants (Maintenance)



4.2.3. Les déchets

Le bilan des déchets issus des travaux préparatoires ainsi que des travaux de construction et de maintenance est structuré selon les désignations de l'ADEME. Deux précisions sont à noter : les déchets végétaux correspondent à la catégorie de *Déchets putrescibles* tandis que les déchets inertes correspondent aux déchets *Divers inertes en mélange*.

Les FE des traitements de déchets considérés sont l'incinération (déchets végétaux), la mise en décharge (les déblais, les gravats de démolition) et le mix moyen des filières de traitement en France métropolitaine pour les autres déchets. Tous les FE sont proposés par l'ADEME. Suivant la même logique du bilan des intrants, les déchets sont présentés dans la **Figure 12** et **Figure 13** en termes de masse et des émissions liées au traitement de ces derniers.

Figure 12 : Répartition des flux de masse et des émissions de traitement par déchet pour la phase construction

ZAC de la Rucherie, BGES Déchets (Construction)

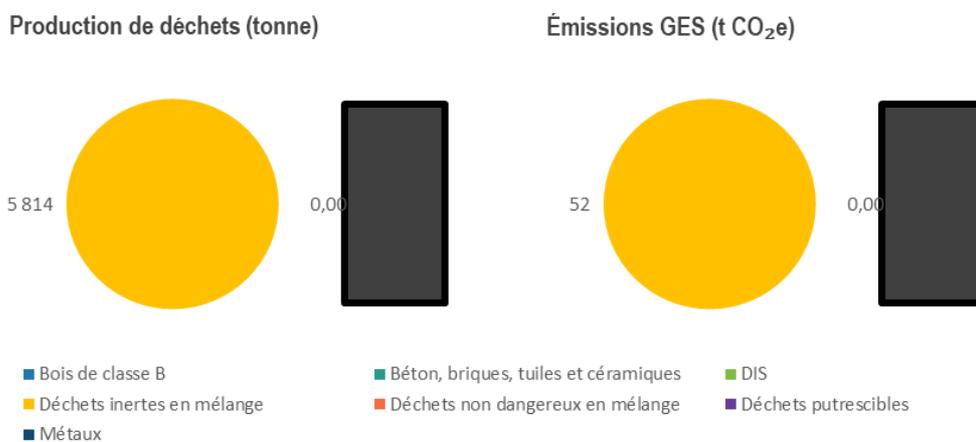
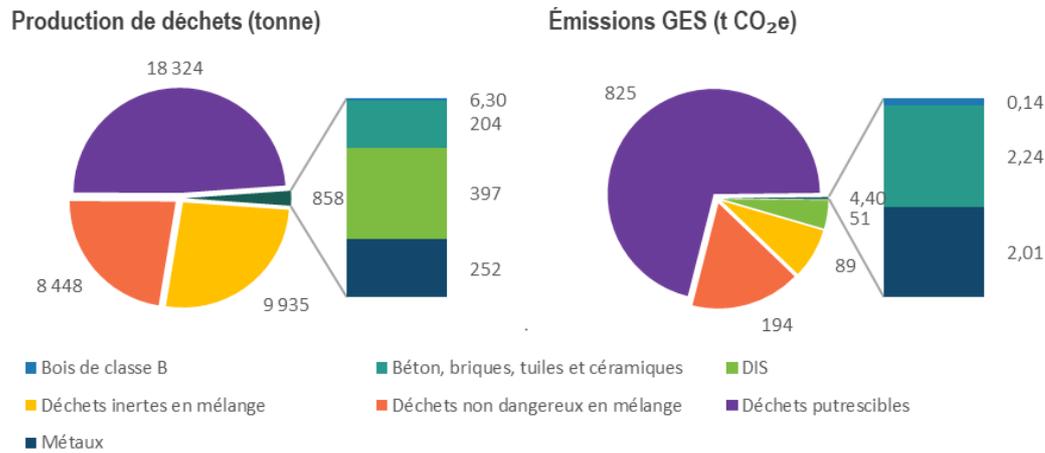


Figure 13 - Répartition des flux de masse et des émissions de traitement par déchet pour la phase maintenance

ZAC de la Rucherie, BGES Déchets (Maintenance)



4.2.4. Le fret

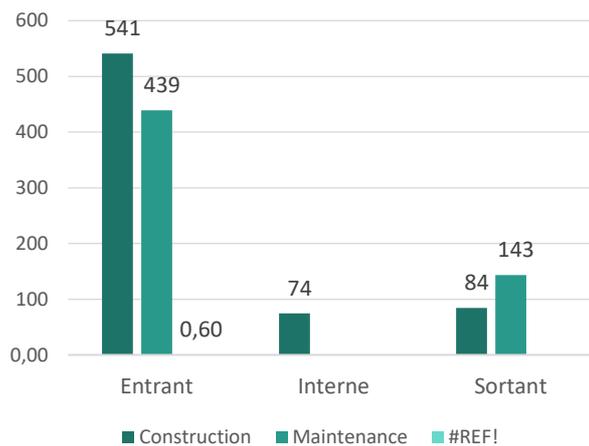
Le calcul des émissions du fret routier a été fait selon trois typologies de transport :

- le fret entrant : transport au chantier des intrants et des immobilisations ;
- le fret sortant : évacuation des déchets ;
- le fret interne : stockage provisoire à proximité des déchets et de la terre végétale ;

Figure 14 : Décomposition du fret routier en fret intrant, sortant et interne en phase construction

ZAC de la Rucherie, BGES Fret

Émissions GES par phase (t CO₂e)



4.2.5. Les déplacements

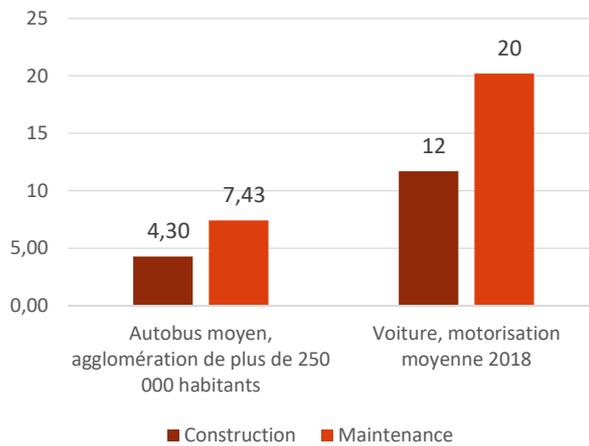
À partir des ateliers de production définis il a été calculé le nombre total d'heures de main d'œuvre nécessaire et ainsi les nombre de déplacements du personnel en phase construction et maintenance.

La répartition des émissions GES des déplacements du personnel par phase est montrée dans la **Figure 15**

Figure 15 : Répartition des émissions liées aux déplacements du personnel par phase du projet

ZAC de la Rucherie, BGES Déplacements

Émissions GES par phase (t CO₂e)



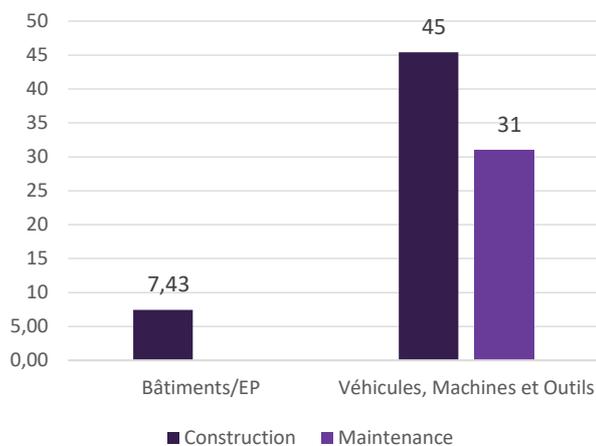
4.2.6. Les immobilisations

L'amortissement des émissions GES liées à la fabrication des engins de chantier est réalisé selon la méthodologie décrite dans la **Section 2.4.3**. La décomposition des émissions est établie suivant la durée des immobilisations en phase construction et maintenance. La **Figure 16** présente la répartition des émissions GES liées à l'usage des engins de chantier et des cantonnements.

Figure 16 : Répartition des émissions de GES des immobilisations en phase construction

ZAC de la Rucherie, BGES Immobilisations

Émissions GES par phase (t CO₂e)



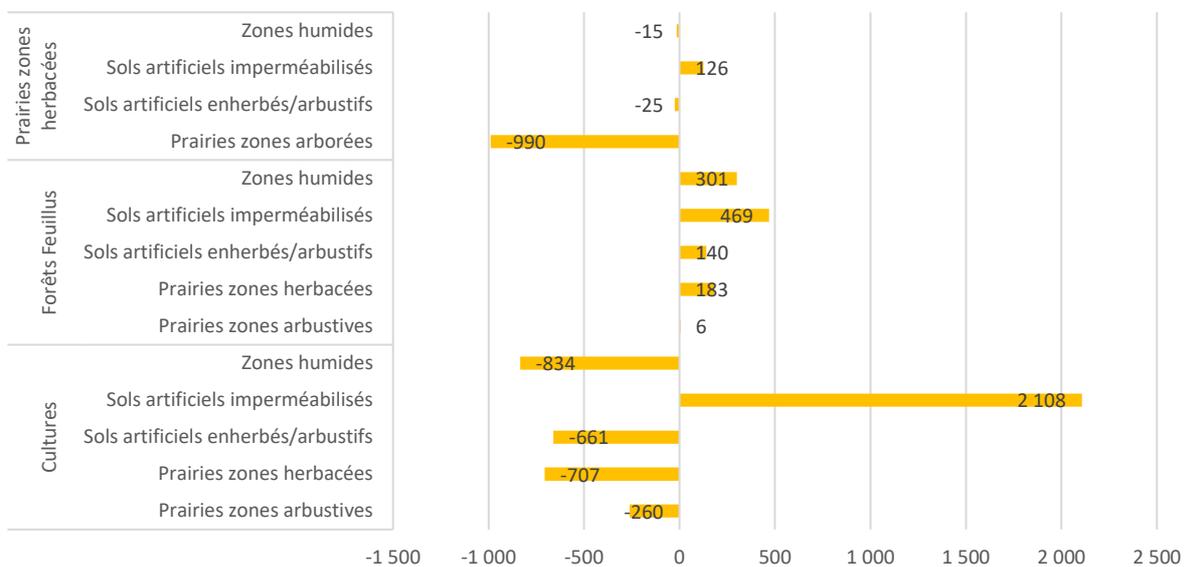
4.2.7. Le changement d'affectation du sol

À partir des surfaces présentées dans le **Tableau 4** de changement d'affectation du sol, les émissions liées à la réduction de la capacité de captation de carbone du sol, la décarbonatation ou la séquestration carbone sont montrées dans la **Figure 17**. Pour rappel, les émissions négatives correspondent à la séquestration carbone des sols modifiés.

Figure 17 - Émissions GES par type de changement d'affectation du sol

ZAC de la Rucherie, BGES UTCF

Émissions GES par type de changement d'affectation de sol (t CO₂e)



4.3. Résultats de l'évaluation pour les bâtiments

Les résultats de l'évaluation GES des bâtiments mettent en exergue l'impact carbone global sur toutes les phases du cycle de vie du bâtiment, de sa construction à sa fin de vie.

Pour chaque simulation, nous obtenons l'impact carbone en t CO₂e/m² du bâtiment type que nous avons simulé. Par la suite, l'impact carbone de chaque bâtiment est calculé grâce à sa surface correspondante.

Un facteur de marge d'erreur de 50% est pris sur les résultats obtenus pour le parking silo ainsi que sur les bâtiments de type industriel (E2, G, I). En effet, la base de données et les retours d'expérience à notre disposition qui concernent ces typologies de bâtiment sont beaucoup plus réduites que pour les bâtiments de bureaux.

En ce qui concerne l'impact carbone du parking, les lots considérés dans les résultats (afin d'être au plus près de la réalité de ce type de construction) sont les suivants : Lot 2 (Fondations et Infrastructures), Lot 3 (Superstructure et Maçonnerie), Lot 10 (Réseaux énergie), Lot 11 (Réseaux communication), Lot 12 (Appareils élévateurs).

L'impact carbone total du bâti de la ZAC de la Rucherie qui comprend la construction de bâtiments de bureaux, de bâtiments industriels ainsi qu'un parking silo sur 2 niveaux représente **508 293 t CO₂e**.

Le bâtiment qui apparaît le plus émetteur en carbone sur tout son cycle de vie est le bâtiment dont les caractéristiques correspondent à une structure faite en béton et dont le niveau de performance énergétique correspond au niveau E0-E1 (équivalent à la future réglementation RE2020), celui-ci émet en moyenne 1,241 t CO₂e/m². Le bâtiment le moins émetteur est celui dont la structure est en bois ou mixte bois-béton, et le niveau de performance énergétique correspond au niveau E2 (Effinergie 2017), il émet en moyenne 1,126 t CO₂e/m² soit 0,115 t CO₂e/m² d'économies sur le poids carbone.

Le **Tableau 6** présente les résultats de bilan GES lot par lot en fonction des typologies et des hypothèses prises.

Tableau 6 - Résultats de l'évaluation GES des bâtiments

Données de programmation					Caractéristiques par bâtiment						Impact carbone				Impact total du lot T eq. CO2
Lot	Typologie	Surface (en m² SDP)	Emprise au sol du bâti (en m²)	Nb bâtiment total du lot	Nb de bâtiments en détaillé	Surface assimilée de chaque bâtiment (en m² SDP)	Hypothèse d'épannelage	Type de structure considérée	Niveau énergétique visé	Surface par étage	Impact carbone T eq. CO2/m²	Facteur de marge d'erreur pris en compte	Impact carbone d'un bâtiment T eq. CO2	Impact carbone total des bâtiments T eq. CO2	
A1	Bureaux	19 138	9 006	2	1	9569	R+1	Béton	E2	4785	1,149		10 995	10 995	21 990
					1	9569	R+1	Béton	E2	4785	1,149		10 995	10 995	
A2	Bureaux	13 014	9 006	2	1	4338	RDC	Bois	E0-E1	4338	1,126		4 885	4 885	15 009
					1	8676	R+1	Bois	E0-E1	4338	1,167		10 125	10 125	
A3	Bureaux	9 345	5 497	2	2	4673	R+1	Bois	E0-E1	2336	1,167		5 453	10 906	10 906
B1	Bureaux	13 014	9 006	2	1	4338	RDC	Bois	E0-E1	4338	1,126		4 885	4 885	15 009
					1	8676	R+1	Bois	E0-E1	4338	1,167		10 125	10 125	
B2	Bureaux	13 311	10 440	2	2	6656	R+1	Bois	E0-E1	3328	1,162		7 734	15 467	15 467
B3	Bureaux	13 014	9 006	2	1	4338	RDC	Béton	E0-E1	4338	1,241		5 383	5 383	15 508
					1	8676	R+1	Béton	E0-E1	4338	1,167		10 125	10 125	
C1	Bureaux	13 962	8 213	3	3	4654	R+1	Bois	E2	2327	1,140		5 306	15 917	15 917
C2	Bureaux	13 804	8 120	3	3	4601	R+1	Béton	E0-E1	2301	1,201		5 526	16 579	16 579
C3	Bureaux	17 274	13 548	3	3	5758	R+1	Bois	E0-E1	2879	1,167		6 720	20 159	20 159
D1	Parking silo 2 niveaux	7 724		1	1	7724	R+1	Béton	E0	3862	0,413	50%	4 785	4 785	4 785
D2	Bureaux	5 529	4 646	1	1	5529	R+1	Bois	E0-E1	2765	1,167		6 452	6 452	6 452
D3	Bureaux	13 014	9 006	2	1	4338	RDC	Béton	E2	4338	1,149		4 984	4 984	14 953
					1	8676	R+1	Béton	E2	4338	1,149		9 969	9 969	
E1	Bureaux	13 977	10 962	1	1	13977	R+1	Béton	E0-E1	6989	1,241		17 345	17 345	17 345
E2	Logistique	34 179	33 509	1	1	34179	RDC	Métal		34179	1,018	50%	52 191	52 191	52 191
F	Bureaux	22 687	13 345	3	3	7562	R+1	Béton	E0-E1	3781	1,201		9 082	27 247	27 247
G	Logistique	62 902	49 335	1	1	62902	RDC	Métal		62902	1,018	50%	96 051	96 051	96 051
H1	Bureaux	22 456	14 677	4	4	5614	R+1	Béton	E2	2807	1,149		6 450	25 802	25 802
H2	Bureaux	28 188	22 108	6	6	4698	R+1	Bois	E0-E1	2349	1,167		5 483	32 895	32 895
I	Logistique	55 027	32 369	2	2	27514	R+1	Métal		13757	1,018	50%	42 013	84 026	84 026
Impact total du bâti ZAC														508 293	

Comparaison des scenarii

La conception des aménagements extérieurs et des bâtiments de la ZAC de la Rucherie inclut un certain nombre d'optimisations concernant le volet émissions GES. En effet, les enjeux environnementaux soulevés par la gestion des eaux de ruissellement, l'utilisation des sols, les consommations énergétiques et le contenu carbone des matériaux employés ont été abordés dès les premières phases de conception du projet.

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les choix de conception retenus et qui permettent de réduire l'empreinte carbone du projet par rapport à des solutions d'aménagement et de construction non optimisées. Cette évaluation passe par la comparaison entre les émissions GES des solutions retenues par le projet et celles qui auraient été engendrées par des solutions dites "conventionnelles".

En plus du scénario projet dont les résultats de l'évaluation GES ont été présentés dans le chapitre précédent, un scénario de référence est aussi établi pour la comparaison de l'empreinte carbone. Ce scénario de référence est défini sur la base des retours d'expérience des projets d'aménagement urbain dans des contextes similaires. Les choix de conception faisant l'objet de cette comparaison sont présentés dans les sous-chapitres suivants.

5.1. Voiries perméables

Le projet de la ZAC inclut l'aménagement des voies piétonnes et d'entretien en pierre et terre végétalisée le long de la Noue Sud et de la Lisière Forêt (sections 6 et 9 du plan des aménagements extérieurs). Leur structure en couches de granularité variable augmente la capacité drainante de ces voiries et facilite la gestion des eaux de ruissèlement.

Cette solution est comparée à une structure de chaussée piétonne avec un revêtement en enrobé bitume classique. Pour rappel, les surfaces prises en compte sont **7 880** et **8 100 m²** respectivement (voir **Tableau 3**). Suivant le même périmètre de l'évaluation GES du projet, les émissions pour ces deux techniques sont calculées sur l'ensemble du cycle vie.

D'après les estimations réalisées, les revêtements en enrobé bitume étudiés engendraient **689** et **506 t CO₂e** sur l'ensemble du cycle de vie des voiries d'entretien et piétonnes respectivement. Pendant la période d'évaluation de 50 ans, les travaux de maintenance de ces voiries représentent la plupart des émissions GES (437 et 403 t CO₂e respectivement).

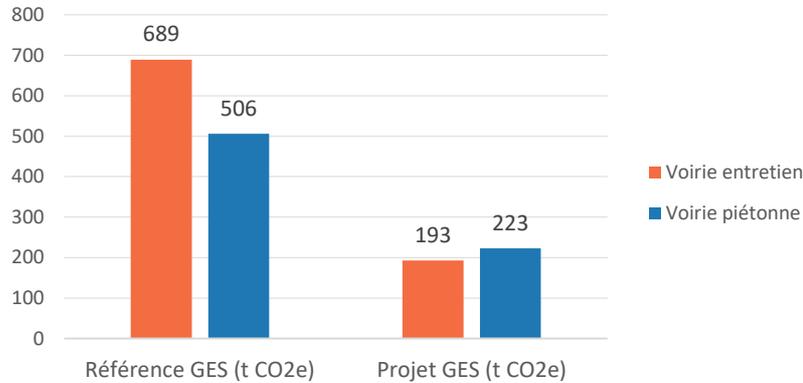
Le poids plus important des émissions GES en phase maintenance est dû aux travaux de démolition de la couche de surface pour son renouvellement. En plus du contenu carbone élevé des enrobés bitume, l'évacuation et traitement des gravats de démolition alourdi le bilan GES de ce revêtement. Pour cette comparaison, aucune hypothèse de recyclage ni de réemploi n'a été appliquée aux calculs présentés.

En comparaison, les revêtements en terre et pierre végétalisés retenus pour le projet représentent **193** et **223 t CO₂e** pour les voiries d'entretien et piétonnes. Cela représente une réduction de 72% et de 56% des émissions GES respectivement. Ces réductions de l'empreinte carbone ne prennent pas en compte le potentiel impact sur le dimensionnement des conduites d'eaux pluviales ni de bassins de rétention dont l'évaluation requiert une étude spécifique.

Figure 18 - Comparaison des émissions GES pour des revêtements bitume et terre-pierre végétalisée

ZAC de la Rucherie, BGES zones perméables

Comparaison des scénarii projet et référence (t CO₂e)



5.2. Bande boisée, autoroute A4

Afin de créer une continuité de liens paysagers et de compenser des surfaces occupées, le projet envisage l'aménagement de lisières et de bandes boisées assurant aussi l'interface entre les emprises de la ZAC et les milieux environnants (autoroute A4 et forêt).

En plus des surfaces aménagées autour du périmètre de la ZAC de la Rucherie et qui sont déjà intégrés dans l'évaluation GES du projet, des bandes boisées d'environ 3,5 km de longueur et 15 m de largeur de part et d'autre de l'autoroute sont aussi envisagées.

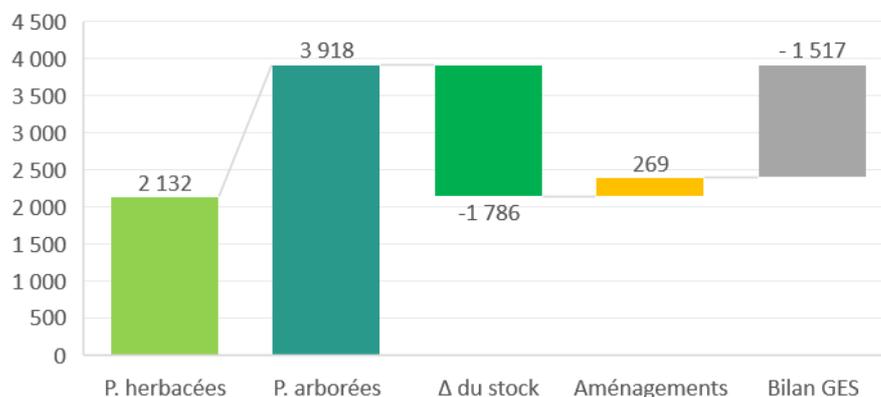
Concernant l'empreinte carbone de cette mesure, elle permettra séquestrer du carbone grâce à l'augmentation de la capacité de stockage des sols. En effet, les emprises d'origine étant des prairies herbacées, leur capacité de stockage devrait passer de 210 à 386 t CO₂e/ha. Cela représenterait un potentiel de séquestration de **1 786 t CO₂e** (voir Figure 19)

Cependant, cette réduction potentielle de l'empreinte carbone est limitée par les travaux de plantation des arbres dont les émissions GES sont estimées à **269 t CO₂e**. Ainsi, le bilan final de cette mesure représenterait une séquestration de **1 517 t CO₂e**.

Figure 19 - Émissions engendrées par l'aménagement de la bande boisée et la variation du stock carbone des sols

ZAC de la Rucherie, BGES Lisières A4

Variation du stock carbone et émissions GES (t CO₂e)



5.3. Programmation mixte bois-béton et niveaux d'énergie

La future réalisation du projet de la ZAC s'est engagée dans une démarche d'utilisation de matériaux biosourcés pour la construction des lots bâtis. L'objectif de cette démarche est de réduire l'empreinte environnementale liée au contenu carbone des matériaux très énergivores comme le béton. Ainsi, le scénario projet envisage une programmation à 50% bois et 50% béton ou mixte bois-béton (voir Bâtiments : matériaux et niveaux énergétiques visés). Bâtiments : matériaux et niveaux énergétiques visés

Outre les matériaux bas-carbone, d'autres objectifs en matière de maîtrise de consommation de l'énergie sont aussi envisagés. En ce sens, le scénario projet intègre des objectifs de consommation énergétique suivant les niveaux de performance définis par la méthode E+C-. Concernant les bureaux, 30% de la SDP devrait atteindre le niveau E2.

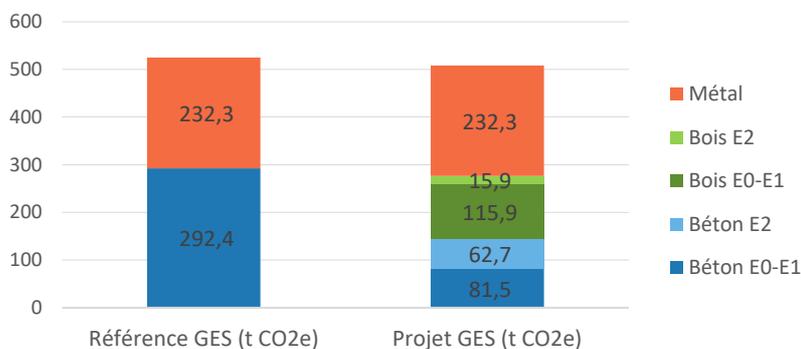
Afin d'estimer la réduction de l'empreinte carbone représentée par la programmation mixte et les niveaux énergétiques, le scénario de référence prend en compte une programmation 100 % béton pour les bâtiments de bureaux. De même, le niveau énergétique E0-E1 est retenu comme choix de base conformément à la réglementation thermique. Les bâtiments industriels ainsi que les parkings silos restent inchangés dans ce scénario.

D'après les estimations réalisées, sur l'ensemble du cycle de vie de bâtiments, le scénario de référence émettrait **524,7 kt CO₂e** dont 292,4 t CO₂e pour les bureaux. En comparaison, le scénario projet représenterait une empreinte carbone de **508,3 kt CO₂e**. Ainsi, la programmation mixte bois-béton et les objectifs de maîtrise énergétique permettraient au projet de la ZAC de réduire son empreinte carbone de **16,4 kt CO₂e**. La **Figure 20** montre la comparaison des émissions GES pour les deux scénarii.

Figure 20 - Émissions GES par matériau et niveau énergétique des bâtiments pour le scénarii référence et projet

ZAC de la Rucherie, BGES bâtiment

Comparaison des scénarii projet et référence (kt CO₂e)



5.4. Réseau de chaleur bois

En plus du choix de matériaux bas-carbone et de la maîtrise de la consommation énergétique, le projet envisage aussi le recours à des sources d'énergie à empreinte réduite. Ainsi, une des possibilités évaluées impliquerait la mise en service d'un réseau de chaleur bois qui permettrait de satisfaire les besoins de chauffage des bâtiments de la ZAC de la Rucherie.

Les gains en matière d'émissions GES dans cette évaluation ne prennent pas en compte les questions comparatives d'efficacité thermique entre une solution de chauffage collectif et individuel. De même, les facteurs d'émissions considérés ne considèrent que les GES émis pendant le processus de production de chaleur. Ainsi, les émissions GES liées au fret ou les immobilisations ne sont pas prises en compte.

Ces considérations devront être abordés dans une étude plus détaillée portant sur le bilan énergétique des bâtiments ainsi que sur l'analyse de cycle de vie des installations de production de chaleur.

Néanmoins, sur la base des valeurs constatées sur les réseaux de chaleur et les dispositifs de chauffage, il est possible d'établir des facteurs d'émission moyens afin de comparer l'impact carbone de chacune de ces solutions. La **Figure 21** montre les facteurs d'émission retenus par filière de production de chaleur en kWh consommé et produit (désignée kWh *chaleur*).

Les FE retenus sont issus de trois sources principales. Pour les énergies fossiles, le SNCU dans son "Enquête nationale sur les réseaux de chaleur" renseigne les émissions GES par kWh d'énergie consommée. Pour l'électricité, la *Base Carbone®* de l'ADEME précise les FE par usage en tenant compte de la saisonnalité de la demande. Dans chacun de cas, les rendements thermiques (COP=3 pour la PAC air) a été pris en compte pour ramener le FE au kWh de chaleur produite.

Concernant la filière bois, le SNCU considère un bilan neutre lors de son utilisation dans les centrales de production de chaleur. Or, l'utilisation du bois demande un traitement préalable de la matière voire, le rajout de carburants pour atteindre le point d'ignition. Afin de mieux appréhender ces GES additionnels, un FE moyen a été calculé à partir du contenu carbone constaté parmi les centrales dont la part de production de la filière biomasse-bois est supérieur à 95%. Sur la base des chiffres publiés par le *Commissariat général au développement durable*, le FE pour la filière bois est en moyenne de 30g CO₂e par kWh livré. Ce chiffre est comparable au FE issu de la base de données *Ecoinvent®* pour la Suisse (*heat production, hardwood chips from forest, at furnace 1000kW*: 22 g CO₂e/kWh).

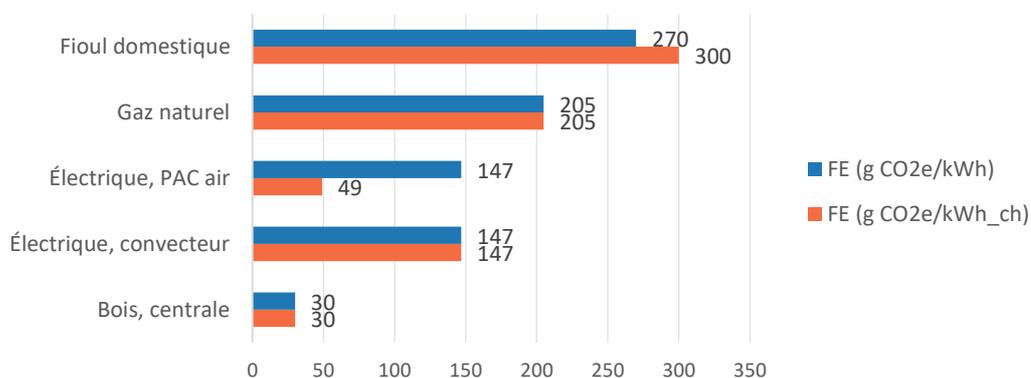
A partir des FE constatés par filière de production, la connexion à un réseau de chaleur bois est celle qui permettrait de réduire le plus les émissions GES liées au besoin de chauffage à condition que ces besoins restent comparables indépendamment de la source d'énergie. En effet, la RT impose des objectifs de maîtrise énergétique exprimés en énergie primaire dont les coefficients de conversion (2,58 pour l'électricité, 0,6 pour le bois) ont une influence sur la consommation des bâtiments.

Cette influence est constatée dans l'analyse des consommations en énergie finale pour les besoins de chauffage de la base de données E+C-. Ainsi, pour une situation moyenne un bâtiment équipé d'un système de PAC consommerait environ 12,5 kWh/m².an en électricité tandis que pour une connexion à un réseau de chaleur cette consommation serait de 25 kWh/m².an. Malgré une consommation pouvant s'avérer plus élevée, le réseau de chaleur bois représenterait une économie d'environ **21 kt CO₂e** pour 50 ans d'exploitation (36 kt CO₂e filière PAC, 15 kt CO₂e filière bois).

Figure 21 - Facteurs d'émission retenus par filière de production de chaleur en énergie consommé et produite

ZAC de la Rucherie, BGES chauffage

Facteurs d'émission par filière de chauffage (g CO₂e/kWh)



Analyse des mesures de réduction

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 réduction.

Les mesures de réduction 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 prend en compte le total des économies possibles à faire.

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.

6.1. Aménagements extérieurs

6.1.1. Démarche et axes de réduction

La maîtrise de l'empreinte carbone est une démarche d'amélioration continue qui doit être menée tout le long des étapes du projet. Ainsi, il est important que la démarche de réduction de l'empreinte carbone soit mise en place dès les premières phases de conception. L'intégration du critère carbone en amont des choix dimensionnants permet d'identifier et d'exploiter les alternatives à impact réduit.

Les mesures de réduction des émissions GES suivent deux axes principaux. Le premier consiste à privilégier les matériaux à bas contenu carbone. 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 permettent 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.

6.1.2. Matériaux à contenu carbone réduit

Dans cette section sont abordées les mesures de réduction 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 du fait des réglementations techniques moins contraignantes.

D'autre part, les matériaux retenus pour l'analyse correspondent à ceux pour lesquels des alternatives connues existent et sont commercialisées. En ce sens, les fournitures telles que les équipements électroniques ou les enduits et revêtements ne sont pas pris en compte. Le **Tableau 7** récapitule l'ensemble des corps de métier et de matériaux faisant l'objet de mesures de réduction.

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 25 449 tonnes, ce qui représente environ 3 289 t CO_{2e}. Dans ce cas, la mesure préconisée consiste à privilégier le béton bas carbone en employant un ciment 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 conventionnelles par celui du ciment à base de laitier (voir

Tableau 8). Un dosage moyen de 280 kg/m³ de béton est utilisé. Le gisement de réduction attendu pour cette mesure devrait atteindre les **1 662 t CO_{2e}**.

Concernant les travaux de chaussée, les enrobés bitume est le matériau le plus utilisé avec environ 10 982 tonnes sur l'ensemble du cycle de vie. Pour réduire son empreinte carbone, l'utilisation de béton bitumineux incorporant des taux de recyclage est préconisée. Sur la base des retours d'expérience, le taux de recyclage des enrobés commercialisés peut atteindre 30%. Suivant cette hypothèse, cette mesure permettrait d'économiser jusqu'à **122 t CO_{2e}**.

Ensuite, les équipements et la signalisation du projet sont les postes les plus consommateurs de métaux, environ 336 tonnes d'acier et 33 tonnes et aluminium. Dans ce cas, la mesure de réduction consiste à privilégier les équipements (panneaux, poteaux, etc.) en métal recyclé. 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 8, la réduction de GES pourrait atteindre le **729 t CO_{2e}**.

Tableau 7 : Récapitulatif des corps de métier, de la quantité et du contenu carbone des matériaux analysés

Métier	Inv. E2	Inv. E3	Masse (tonne)	GES (t CO _{2e})
Équipements	Aluminium	Luminaires pour éclairage fonctionnel	30	2 285
Chaussées	Béton hydraulique	Béton désactivé	8 718	1 548
Chaussées	Béton hydraulique	Béton C20/25	12 703	1 027
Chaussées	Enrobés bitume	Enrobés bitumineux	10 982	585
Terrassement	Graviers/granulats	Granulat sortie carrière	98 332	393
Équipements	Acier	Mât de lampadaire d'éclairage	284	628
Chaussées	Béton préfabriqué	Bordure T2	1 455	306
Chaussées	Graviers/granulats	Sable	10 191	456
Chaussées	Béton préfabriqué	Bordurette en béton (h=20 cm)	909	191

Génie civil	Graviers/granulats	Sable	5 408	242
Chaussées	Graviers/granulats	Grave, non traitée	2 968	43
Génie civil	Plastiques/polymères	Réseaux d'adduction d'eau en PVC [D entre 110 et 200 mm]	7,88	69
Génie civil	Acier	Réseau d'adduction gaz acier [Diam. Ext. entre 25 et 50 mm]	12	70
Chaussées	Béton préfabriqué	Caniveau béton en U	319	67
Génie civil	Béton préfabriqué	Cadre béton préfabriqué (OH)	198	43
Équipements	Acier	Éléments en acier galvanisé	17	48
Chaussées	Béton préfabriqué	Pavés en béton préfabriqué	312	37
Chaussées	Graviers/granulats	Granulat sortie carrière	8 150	33
Chaussées	Asphalte	Couche d'imprégnation (émulsion bitume)	110	53
Équipements	Béton hydraulique	Béton C20/25	601	49
Génie civil	Plastiques/polymères	Gaine TPC en polyéthylène [Diamètre ext. = 63 mm]	10	43
Signalisation	Aluminium	Panneaux de signalisation [m ²]	2,37	35
Génie civil	Plastiques/polymères	Canalisation d'assainissement pluvial en PVC [D=315 mm]	43	48
Équipements	Acier	Acier ou fer blanc [neuf]	19	41
Installations temporaires	Plastiques/polymères	Réseaux d'adduction d'eau en PVC [D entre 110 et 200 mm]	1,05	9,18
Génie civil	Plastiques/polymères	Canalisation eaux usées/vannes en PVC [D=140 mm]	7,47	16
Équipements	Béton préfabriqué	Equipements en béton préfabriqué	76	11
Génie civil	Béton hydraulique	Béton C20/25	133	11
Signalisation	Acier	Poteau panneau de police acier galvanisé	3,24	9,14
Génie civil	Plastiques/polymères	Plastique, PEHD [neuf]	1,30	2,49
Aménagement	Graviers/granulats	Tourbe horticole Brune	16	5,80
Installations temporaires	Graviers/granulats	Grave non traitée	153	2,22
Signalisation	Béton hydraulique	Béton C20/25	25	2,01
Génie civil	Graviers/granulats	Tourbe horticole Brune	0,53	0,20
Génie civil	Plastiques/polymères	Grillage avertisseur (polyéthylène, largeur=20 cm)	0,27	0,88

Tableau 8 : Détails de calcul des mesures de réduction préconisées concernant les matériaux

Inv. E3	Quantité	U.F.	F.E. (kg CO2e)	GES (t CO2e)	Nature
Aluminium [neuf]	33	tonne	9 827	320	Réduites
Aluminium [recyclé]	33	tonne	562	18	Directes
Ciment CEM II	3 032	tonne	736	2 232	Réduites
Liant minéral à base de laitier H-UKR	3 032	tonne	188	570	Directes
Enrobés bitumineux	4 393	m3	125	550	Réduites
Enrobés bitumineux avec 30% REC	4 393	m3	98	428	Directes
Acier ou fer blanc [neuf]	336	tonne	2 211	742	Réduites
Acier ou fer blanc [recyclé]	336	tonne	938	315	Directes
Plastique, PVC [neuf]	60	tonne	1 870	112	Réduites
Plastique, PVC [recyclé]	60	tonne	403	24	Directes
Plastique, PET [neuf]	11	tonne	3 270	35	Réduites
Plastique, PET [recyclé]	11	tonne	202	2,17	Directes
Plastique, PEHD [neuf]	1,30	tonne	1 920	2,49	Réduites
Plastique, PEHD [recyclé]	1,30	tonne	202	0,26	Directes

En plus des métaux, le projet nécessite de matières plastiques. Le poste le plus important d'utilisation de plastique est celui des gaines et fourreaux en PVC et PET qui compte un total de 72 tonnes, ce qui représente **122 t CO₂e**. La démarche de réduction devra privilégier les fabricants incorporant des plastiques recyclés. Cela permettrait de réduire de 36 t CO₂e le bilan GES du projet.

6.1.3. Revalorisation des déchets

Cette section est dédiée à l'analyse des mesures de réduction concernant la réutilisation sur site des déchets et la revalorisation de ceux qui sont évacués. De même 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 9** montre la liste de corps de métier abordés, les quantités de déchets et de fret produit ainsi que les émissions GES associées.

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 sa réutilisation correspondent à la même période de travaux. Afin de montrer la totalité du gisement de réduction, les matériaux revalorisables sont comptabilisés dans sa totalité. Cependant, il est possible qu'une partie des déchets considérés ne puissent pas être revalorisés.

Les déchets produits par les travaux de réfection des chaussées et la dépose des équipements et signalisation sont aussi intégrés. Concernant les gravats d'enrobé bitumineux, l'évacuation vers des centrales à enrobé pour être incorporés dans la formulation d'enrobés recyclé est à privilégier. 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. De la même façon, l'évacuation vers des filières de recyclage des déchets métalliques (équipements et signalisation) diminue le bilan GES du projet. Ainsi, grâce au recyclage de ces déchets, il est possible de réduire les émissions GES de **196 t CO₂e** (voir **Tableau 10**).

Concernant les travaux déblayage, ils produisent un total de 5 661 tonnes des déblais. Ces déblais pourraient être réutilisés en tant que remblais pour les couches de forme des nouvelles voiries et ainsi réduire le besoin de matériaux d'apport. La mesure préconisée pour revaloriser ces déchets consiste à les incorporer dans les couches de fondation après traitement de stabilisation.

L'application de cette mesure permettrait de réduire :

- Les émissions liées aux opérations de mise en dépôt et de fonctionnement des CET.
- Les émissions issues de la production des granulats des couches de fondation des chaussés
- 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.

Afin de calculer les émissions produites par le traitement de stabilisation, l'évaluation GES utilise le facteur d'émission de la base carbone de l'ADEME. Ce calcul prend en compte un traitement à une teneur de 2% en chaux. Ainsi, les émissions nécessaires à la stabilisation du sol représentent 77 t CO₂e. Au total, cette mesure permettrait de réduire de **10 t CO₂e** les émissions initiales du projet.

Tableau 9 - Récapitulatif des déchets, du fret engendré et des émissions GES

Phase	Flux	Inv. E2	U.F.	Qté.	GES (t CO ₂ e)
Construction	Déblayage	Déchets bâtiment	tonne	5 632	51
Construction	Déblayage	Routier	tonne.km	255 267	0,34
Construction	Déchets évacués	Déchets bâtiment	tonne	29	0,26
Construction	Déchets évacués	Routier	tonne.km	1 463	0,00
Maintenance	Déchets bois	Déchets bâtiment	tonne	6,30	0,14

Maintenance	Déchets bois	Routier	tonne.km	252	0,00
Maintenance	Déchets béton	Déchets bâtiment	tonne	48	0,52
Maintenance	Déchets béton	Routier	tonne.km	1 906	0,00
Maintenance	Déchets d'entretien	Ordures ménagères	tonne	17 483	787
Maintenance	Déchets d'entretien	Routier	tonne.km	699 338	1,07
Maintenance	Déchets métalliques	Déchets bâtiment	tonne	22	0,18
Maintenance	Déchets métalliques	Routier	tonne.km	897	0,00
Maintenance	Déchets pavés	Déchets bâtiment	tonne	156	1,72
Maintenance	Déchets pavés	Routier	tonne.km	15 603	0,01
Maintenance	Déchets végétaux	Ordures ménagères	tonne	53	2,37
Maintenance	Déchets végétaux	Routier	tonne.km	2 103	0,00
Maintenance	Démolition béton	Déchets bâtiment	tonne	4 713	42
Maintenance	Démolition béton	Routier	tonne.km	471 293	0,29
Maintenance	Démolition chaussé	Déchets bâtiment	tonne	8 448	194
Maintenance	Démolition chaussé	Routier	tonne.km	422 375	0,52
Maintenance	Démolition voirie	Déchets bâtiment	tonne	5 222	47
Maintenance	Démolition voirie	Routier	tonne.km	261 098	0,32
Maintenance	Dépose de la signalisation	Déchets bâtiment	tonne	4,68	0,04
Maintenance	Dépose de la signalisation	Routier	tonne.km	234	0,00
Maintenance	Dépose luminaires	Déchets bâtiment	tonne	22	0,17
Maintenance	Dépose luminaires	Routier	tonne.km	1 077	0,00
Maintenance	Dépose mâts	Déchets bâtiment	tonne	203	1,62
Maintenance	Dépose mâts	Routier	tonne.km	10 152	0,01
Maintenance	Tonte pelouse	Ordures ménagères	tonne	788	35
Maintenance	Tonte pelouse	Routier	tonne.km	78 800	0,05
Maintenance	Vidange fosse	Déchets dangereux	tonne	397	51
Maintenance	Vidange fosse	Routier	tonne.km	39 652	0,02

Tableau 10 - Détails de calcul des mesures concernant la revalorisation des déchets

Inv. E2	Inv. E3	Quantité	U.F.	F.E. (kg CO2e)	GES (t CO2e)	Nature
Déchets bâtiment	Métaux [hors recyclage]	252	tonne	8,00	2,01	Réduites
Déchets bâtiment	Déchets non dangereux en mélange (DIB) [hors recyclage]	8 448	tonne	23	194	Réduites
Déchets bâtiment	Déchets inertes en mélange (Gravats) [hors recyclage]	5 661	tonne	9,00	51	Réduites
Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	283 054	tonne.km	0,06	17	Réduites
Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	56 611	tonne.km	0,06	3,46	Directes
Graviers/granulats	Granulat sortie carrière	3 330	m3	6,80	23	Réduites
Liant hydraulique	Sol traité liant routier	5 661	tonne	14	77	Directes

6.2. Bâtiments

Des optimisations sur les caractéristiques des futurs bâtiments peuvent être apportées de manière à diminuer l'impact carbone du projet. Deux variantes ont ainsi été étudiées pour pousser les curseurs d'une construction bas carbone et peu énergivore.

6.2.1. Passage en une programmation tertiaire 100% en bois ou mixte bois-béton

D'après les estimations effectuées à ce stade, un gain potentiel de **3 703 t CO₂e** sur l'impact carbone total du bâti est possible en passant l'ensemble de la programmation tertiaire en superstructure réalisée en bois ou en bois-béton. Les résultats de cette mesure sont présentés dans le **Tableau 11**.

A ce stade de l'étude, le gain semble faible à l'échelle des émissions totales liées au bâti. Néanmoins, les objectifs actuels des labels très bas carbone, et les évolutions réglementaires en cours avec la sortie en juillet 2022 de la RE2020 adaptée aux bâtiments de bureaux, vont modifier les méthodes de calcul de l'ACV bâtiminaire en passant à une ACV dynamique qui devrait valoriser davantage le recours au bois et aux matériaux biosourcés.

Tableau 11 - Émissions GES concernant la construction en bois et mixte bois-béton

Type de structure considérée sur les bâtiments	50% en structure bois 50% en béton	100% en bois
Impact total du bâti ZAC (Teq CO ₂)	508293	504 590
Economies carbone (en Teq CO₂) sur l'impact carbone total du bâti de la ZAC	3703	

De plus, cette étude ne prend pas en compte les efforts en termes de bilan carbone qui peuvent être réalisés sur d'autres familles de matériaux très émissives en typologie bureaux (réflexion autour de l'économie de matière en évitant les doublons faux-plafonds, faux-planchers, choix de revêtements de sols bas carbone comme de la moquette recyclée, recours à des matériaux issus du réemploi pouvant être considérés à impact nul...). De nombreuses pistes existent.

6.2.2. Passage en une programmation tendant à 100% vers le niveau Energie 2.

En prenant pour hypothèse que tous les bâtiments tertiaires de la ZAC seront de niveau E2, niveau de haute performance énergétique atteignable avec des efforts de conception en typologie bureaux, des économies de **5 649 t CO₂e** sont réalisables sur l'impact carbone total du bâti. Les résultats des émissions GES par niveau de performance énergétique sont présentés dans le **Tableau 12**.

Le niveau E2 sera difficilement atteignable en typologie industrie, nous avons donc gardé les niveaux visés de base RE2020 pour ces bâtiments.

Tableau 12 - Émissions GES suivant les niveaux de performance énergétique

Niveau de performance énergétique considérée sur les bâtiments	30% de niveau E2-70% de niveau E0-E1	100% de niveau E2
Impact total du bâti ZAC (Teq CO ₂)	508293	502 644
Economies carbone (en Teq CO₂) sur l'impact carbone total du bâti de la ZAC	5 649	

Conclusion

Le bilan global initial des émissions de GES est évalué à **13 479 t CO₂e** pour les aménagements extérieurs et **508 293 t CO₂e** pour la partie bâtiments et parking silo.

Une première démarche de réduction a permis d'identifier des gisements d'économie carbone et sont rappelés ci-dessous :

- Aménagements extérieurs :
 - o Matériaux bas-carbone : 2 636 t CO₂e
 - o Revalorisation des déchets : 206 t CO₂e
- Bâtiments :
 - o Construction 100% bois : 3 703
 - o Performance énergétiques niveau E2 : 5 649 t CO₂e

Soit au total **2 842 t CO₂e** pour les aménagements paysagers et **9 352 t CO₂e** pour la partie bâtiment qui pourraient être réduites. Ces gisements sont estimés en appliquant une série de mesures de réduction telles que l'utilisation de matériaux bas-carbone (incluant des taux de recyclage), la valorisation des déchets en filière de recyclage ainsi que des améliorations sur la performance énergétique des bâtiments. En retranchant ces gisements aux émissions estimées, le coût carbone du projet pourrait être ramené aux **10 637 t CO₂e** et **498 941 t CO₂e** respectivement.

Les émissions du bilan initial et les variations apportées par les mesures de réduction sont montrées dans la **Figure 22** et la **Figure 23**. En plus des variations, cette figure permet de comparer le bilan initial et le bilan réduit après l'application des mesures préconisées.

Figure 22 : Variation des émissions GES du bilan initial concernant les aménagements extérieurs en appliquant les mesures de réduction (émissions directes et réduites).

ZAC de la Rucherie, Récapitulatif du bilan GES

Émissions directes, réduites et évitées (t CO₂e)

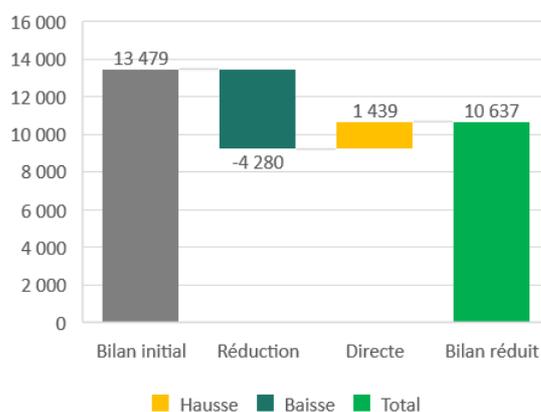
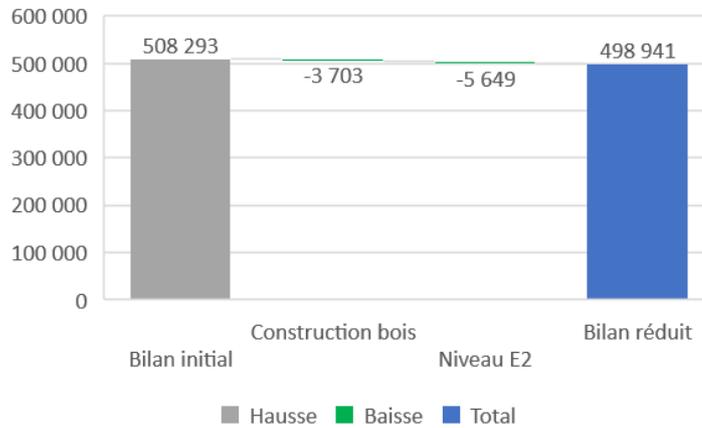


Figure 23 - Variation des émissions GES du bilan initial concernant les bâtiments en appliquant les mesures de réduction.

ZAC de la Rucherie, Récapitulatif du bilan GES

Émissions GES initiales et réduites, bâtiment (t CO₂e)



Afin d'assurer au projet une empreinte carbone réduite, il est primordial que les DCE et les études à venir soient rédigés en ce sens. Des objectifs carbone doivent être précisés avec la mise en place de pénalités s'ils ne sont pas atteints. La réponse des entreprises travaux au marché doit être assortie d'une première estimation des émissions de GES avec des pistes de réduction.

Les entreprises devront s'engager à fournir les facteurs d'émission par unité fonctionnel pour garantir la transparence de leur bilan. Dans le cas où les FE ne seraient pas disponibles, les entreprises pourront les fournir en cours de travaux après avoir consulté leurs sous-traitant.

En phase de travaux, les entreprises doivent réaliser un suivi de leurs émissions au cours du chantier et évaluer leurs propositions de travaux sous l'angle de la comptabilité carbone avant mise en œuvre. En plus de l'attention portée au contenu carbone des matériaux, ce suivi devra tenir compte des consommations d'énergie, du fret constaté dans les bons de livraison, des déchets produits et des déplacements du personnel.

Au même titre qu'un suivi environnementale ou budgétaire, un contrôle de la part de la MOA ou MOE doit être réalisé tout au long la vie du projet afin d'assurer le suivi des objectifs en termes des émissions de GES. En respectant une démarche d'amélioration continue, l'étude des pistes d'amélioration ainsi que l'approfondissement des mesures de réductions proposées dans ce rapport sera poursuivie au fur et à mesure de l'avancement des études de conception du projet.

Annexes

Annexe 1 : Engins de chantier

Annexe 1 : Caractéristiques des engins de chantier employées

Matériel	Carburant	Puissance (kW)	Charge moteur	Poids (t)	Distance (km)	Q (litre/h)	Huile (litre/h)
Bulldozer CAT D5	Gazole	127	50%	19	300	19	0,35
Camion benne 40T	Gazole	300	50%	32	100	45	0,35
Camion bras EB GC	Gazole	235	50%	16	150	35	0,35
Camion citerne 5000 L	Gazole	60	50%	35	50	9,26	0,35
Camion nacelle à bras articulé	Gazole	90	50%	3,00	150	14	0,35
Chargeuse sur pneus	Gazole	120	50%	35	100	18	0,35
Compacteur	Gazole	120	50%	12	300	18	0,35
Compacteur tandem	Gazole	63	50%	9,00	300	9,72	0,35
Compacteur à plaque	Essence	9,00	100%	12	50	7,76	0,00
Compacteur à pneu	Gazole	75	50%	5,00	300	11	0,35
Compresseur 22000L	Gazole	220	50%	6,80	150	33	0,35
DUMPER 600 L. FRONTA	Gazole	17	100%	1,40	100	5,45	0,35
Finisher	Gazole	150	50%	18	300	22	0,35
GRACO LINELAZER™ V 250DC	Essence	8,80	100%	0,35	150	7,59	0,00
Grenailleuse autoportée S320RD	Gazole	19	100%	0,90	150	5,93	0,35
Grue automotrice 25T	Gazole	156	50%	25	150	23	0,35
Hélicoptère	Essence	4,00	100%	0,07	50	3,45	0,00
Marteau piqueur	Essence	1,86	100%	0,02	100	1,61	0,00
Mini-pelleteuse Komatsu PC55MR-5	Gazole	35	50%	5,50	100	5,44	0,35
Motoculteur	Essence	10	100%	0,15	150	8,63	0,00
Motoniveleuse	Gazole	141	50%	17	300	21	0,35
Pelle sur pneus (CAT M315F)	Gazole	112	50%	23	100	17	0,35
Pelle à chenilles (CAT 320 EL)	Gazole	121	50%	23	300	18	0,35
Pelle à chenilles (brise-roche)	Gazole	74	50%	16	300	0,00	0,35
Rouleau léger plantation	Essence	6,00	100%	0,10	150	5,18	0,00
Répandeuse	Gazole	240	50%	18	300	36	0,35
Tondeuse	Essence	6,00	100%	0,10	100	5,18	0,00
Toupie à béton	Gazole	294	50%	25	0,00	44	0,35

Annexe 2 : Métrés des intrants

Annexe 2 : Quantités consommées par métier et par phase en unité fonctionnelle.

Inventaire	Inv. E1	Inv. E2	Inv. E3	Quantité	U.F.
Aménagement					
Espace vert					
Construction	Énergie	Combustibles	Essence, supercarburant sans Pb (95, 95-E10, 98)	10 238	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	103 344	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	6 108	litre
Construction	Intrants	Divers	Eau d'arrosage	5 729	m3
Construction	Intrants	Graviers/granulats	Tourbe horticole Brune	73	tonne
Construction	Intrants	Végétation	Arbres (Quercus ilex ϕ 35cm)	9 247	u
Construction	Intrants	Végétation	Arbuste	37 489	u
Construction	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	289 800	tonne.km
Construction	Fret	Routier	Rigide, 26 à 32 T diesel routier, 7 % de biodiesel	229 166	tonne.km
Maintenance	Énergie	Combustibles	Essence, supercarburant sans Pb (95, 95-E10, 98)	177 420	litre
Maintenance	Intrants	Divers	Eau d'arrosage	95 486	m3
Maintenance	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	4 519 083	tonne.km
Maintenance	Déchets	Ordures ménagères	Déchets putrescibles [incinération]	17 483	tonne
Chaussées					
Couche de surface					
Construction	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	2 797	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	54	litre
Construction	Intrants	Asphalte	Couche d'imprégnation (émulsion bitume)	25	tonne
Construction	Intrants	Enrobés bitume	Enrobés bitumineux	2 534	tonne
Construction	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	428 159	tonne.km
Maintenance	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	41 048	litre
Maintenance	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	1 495	litre
Maintenance	Intrants	Asphalte	Couche d'imprégnation (émulsion bitume)	84	tonne
Maintenance	Intrants	Enrobés bitume	Enrobés bitumineux	8 448	tonne
Maintenance	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	1 547 173	tonne.km
Maintenance	Déchets	Déchets bâtiment	Déchets non dangereux en mélange (DIB) [hors recyclage]	8 448	tonne
Trottoirs, voies douces					
Construction	Énergie	Combustibles	Essence, supercarburant sans Pb (95, 95-E10, 98)	5 708	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	10 158	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	208	litre
Construction	Intrants	Béton hydraulique	Béton C20/25	939	m3
Construction	Intrants	Béton hydraulique	Béton désactivé	1 362	m3

Construction	Intrants	Béton préfabriqué	Bordure T2	4 190	ml
Construction	Intrants	Béton préfabriqué	Bordurette en béton (h=20 cm)	12 470	mL
Construction	Intrants	Béton préfabriqué	Caniveau béton en U	2 095	ml
Construction	Intrants	Béton préfabriqué	Pavés en béton préfabriqué	848	m ²
Construction	Intrants	Divers	Eau d'arrosage	588	m3
Construction	Intrants	Graviers/granulats	Granulat sortie carrière	4 794	m3
Construction	Intrants	Graviers/granulats	Grave, non traitée	1 746	m3
Construction	Intrants	Graviers/granulats	Sable	4 278	tonne
Construction	Intrants	Végétation	Mélange de semences pelouse	236	kg
Construction	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	1 403 008	tonne.km
Maintenance	Énergie	Combustibles	Essence, supercarburant sans Pb (95, 95-E10, 98)	25 065	litre
Maintenance	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	29 625	litre
Maintenance	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	825	litre
Maintenance	Intrants	Béton hydraulique	Béton C20/25	4 584	m3
Maintenance	Intrants	Béton hydraulique	Béton désactivé	2 270	m3
Maintenance	Intrants	Béton préfabriqué	Bordure T2	13 550	ml
Maintenance	Intrants	Béton préfabriqué	Bordurette en béton (h=20 cm)	33 000	mL
Maintenance	Intrants	Béton préfabriqué	Caniveau béton en U	6 775	ml
Maintenance	Intrants	Béton préfabriqué	Pavés en béton préfabriqué	848	m ²
Maintenance	Intrants	Graviers/granulats	Sable	5 913	tonne
Maintenance	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	3 050 496	tonne.km
Maintenance	Déchets	Déchets bâtiment	Béton, briques, tuiles et céramiques [hors recyclage]	156	tonne
Maintenance	Déchets	Déchets bâtiment	Déchets inertes en mélange (Gravats) [hors recyclage]	7 890	tonne
Maintenance	Déchets	Ordures ménagères	Déchets putrescibles [incinération]	788	tonne
Génie civil					
Assainissement					
Construction	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	1 749	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	43	litre
Construction	Intrants	Béton préfabriqué	Cadre béton préfabriqué (OH)	5,70	m3
Construction	Intrants	Graviers/granulats	Tourbe horticoles Brune	0,53	tonne
Construction	Intrants	Matériel électronique	Câble moyenne tension 12/20 kV [Section conductrice de 150 mm ² à 240 mm ²]	900	mL

Construction	Intrants	Matériel électronique	Moteur électrique et pompes (moyenne)	26	kg
Construction	Intrants	Plastiques/polymères	Canalisation eaux usées/vannes en PVC [D=140 mm]	1 500	mL
Construction	Intrants	Plastiques/polymères	Plastique, PEHD [neuf]	1,30	tonne
Construction	Intrants	Végétation	Mélange de semences pelouse	158	kg
Construction	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	164 846	tonne. km
Construction	Déchets	Déchets bâtiment	Déchets inertes en mélange (Gravats) [hors recyclage]	2 188	tonne
Exploitation	Énergie	Électricité	2018 - usage : Autres (BTP. recherche. armée. etc.)	9 842	kWh
Maintenance	Énergie	Combustibles	Essence, supercarburant sans Pb (95, 95-E10, 98)	13 668	litre
Maintenance	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	21 402	litre
Maintenance	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	429	litre
Maintenance	Intrants	Matériel électronique	Moteur électrique et pompes (moyenne)	162	kg
Maintenance	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	49 356	tonne. km
Maintenance	Déchets	Déchets dangereux	DIS [stockage]	397	tonne
Maintenance	Déchets	Ordures ménagères	Déchets putrescibles [incinération]	53	tonne
Ouvrage divers					
Construction	Énergie	Combustibles	Essence, supercarburant sans Pb (95, 95-E10, 98)	11	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	5 415	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	112	litre
Construction	Intrants	Béton préfabriqué	Cadre béton préfabriqué (OH)	77	m3
Construction	Intrants	Enduits/revêtements résine	Enduit bitumineux pour l'étanchéité et l'imperméabilisation pour murs enterrés	528	m ²
Construction	Intrants	Graviers/granulats	Sable	79	tonne
Construction	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	241 601	tonne. km
Construction	Déchets	Déchets bâtiment	Déchets inertes en mélange (Gravats) [hors recyclage]	2 859	tonne
Réseaux et tranchées					
Construction	Énergie	Combustibles	Essence, supercarburant sans Pb (95, 95-E10, 98)	4 041	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	24 919	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	547	litre
Construction	Intrants	Acier	Réseau d'adduction gaz acier [Diam. Ext. entre 25 et 50 mm]	2 510	mL
Construction	Intrants	Béton hydraulique	Béton C20/25	58	m3
Construction	Intrants	Graviers/granulats	Sable	5 328	tonne
Construction	Intrants	Matériel électronique	Câble cuivre basse tension [section conductrice entre 95 et 285 mm ² /3G]	5 271	mL

Construction	Intrants	Matériel électronique	Câble haute tension [Section conductrice entre 0,97 mm ² et 3,1 mm ² - 60kV DC / 20kV AC]	2 510	mL
Construction	Intrants	Matériel électronique	Fibre optique (Réseaux) [D=4 à 8,5 mm]	2 510	mL
Construction	Intrants	Plastiques/polymères	Canalisation d'assainissement pluvial en PVC [D=315 mm]	4 135	mL
Construction	Intrants	Plastiques/polymères	Canalisation eaux usées/vannes en PVC [D=140 mm]	2 606	mL
Construction	Intrants	Plastiques/polymères	Gaine TPC en polyéthylène [Diamètre ext. = 63 mm]	10 290	mL
Construction	Intrants	Plastiques/polymères	Grillage avertisseur (polyéthylène, largeur=20 cm)	16 902	mL
Construction	Intrants	Plastiques/polymères	Réseaux d'adduction d'eau en PVC [D entre 110 et 200 mm]	2 252	mL
Construction	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	1 511 918	tonne. km
Installations temporaires					
Chantier et base de vie					
Construction	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	695	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	14	litre
Construction	Énergie	Électricité	2008 - usage : Autres (BTP. recherche. armée. etc.)	93 611	kWh
Construction	Intrants	Divers	Eau du robinet	1 221 016	litre
Construction	Intrants	Graviers/granulats	Grave non traitée	90	m3
Construction	Intrants	Matériel électronique	Câble moyenne tension 12/20 kV [Section conductrice de 150 mm ² à 240 mm ²]	300	mL
Construction	Intrants	Matériel électronique	Fibre optique (Réseaux) [D=4 à 8,5 mm]	300	mL
Construction	Intrants	Plastiques/polymères	Réseaux d'adduction d'eau en PVC [D entre 110 et 200 mm]	300	mL
Construction	Immobilisations	Bâtiments/EP	Bâtiment industriel, structure en béton	9,00	m ²
Construction	Immobilisations	Véhicules, Machines et Outils	Véhicules fabrication	7,00	tonne
Construction	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	62 520	tonne. km
Construction	Fret	Routier	Rigide, 26 à 32 T diesel routier, 7 % de biodiesel	1 298	tonne. km
Construction	Déplacements	Routiers	Autobus moyen, agglomération de plus de 250 000 habitants	23 548	passager.k m
Construction	Déplacements	Routiers	Voiture, motorisation moyenne 2018	42 815	km
Construction	Déchets	Déchets bâtiment	Déchets inertes en mélange (Gravats) [hors recyclage]	153	tonne
Maintenance	Énergie	Électricité	2008 - usage : Autres (BTP. recherche. armée. etc.)	228 885	kWh
Maintenance	Intrants	Divers	Eau du robinet	2 985 454	litre

Maintenance	Immobilisations	Véhicules, Machines et Outils	Véhicules fabrication	5,63	tonne
Maintenance	Déplacements	Routiers	Autobus moyen, agglomération de plus de 250 000 habitants	57 577	passager.km
Maintenance	Déplacements	Routiers	Voiture, motorisation moyenne 2018	104 685	km
Phase conception					
Études d'ingénierie					
Construction	Intrants	Ratios	Assurance, services bancaires, conseil et honoraires	7 000	k€
Signalisation					
Signalisation horizontale					
Construction	Énergie	Combustibles	Essence, supercarburant sans Pb (95, 95-E10, 98)	18	litre
Construction	Intrants	Enduits/revêtements résine	Enduit à froid projeté (ACV entreprise SIGNATURE)	1 158	litre
Construction	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	2 025	tonne.km
Maintenance	Énergie	Combustibles	Essence, supercarburant sans Pb (95, 95-E10, 98)	91	litre
Maintenance	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	15	litre
Maintenance	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	0,90	litre
Maintenance	Intrants	Enduits/revêtements résine	Enduit à froid projeté (ACV entreprise SIGNATURE)	5 790	litre
Maintenance	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	8 877	tonne.km
Terrassement					
Signalisation verticale					
Construction	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	146	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	5,07	litre
Construction	Intrants	Acier	Poteau panneau de police acier galvanisé	54	u
Construction	Intrants	Aluminium	Panneaux de signalisation [m ²]	51	m ²
Construction	Intrants	Béton hydraulique	Béton C20/25	11	m ³
Construction	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	43 602	tonne.km
Maintenance	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	1 213	litre
Maintenance	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	47	litre
Maintenance	Intrants	Acier	Poteau panneau de police acier galvanisé	270	u
Maintenance	Intrants	Aluminium	Panneaux de signalisation [m ²]	257	m ²
Maintenance	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	48 533	tonne.km
Maintenance	Déchets	Déchets bâtiment	Métaux [hors recyclage]	4,68	tonne
Travaux préparatoires					
Terrassement de surface					
Construction	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	51 248	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	1 215	litre
Construction	Intrants	Graviers/granulats	Granulat sortie carrière	57 843	m ³
Construction	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	6 255 455	tonne.km

Utilisation des terres, leurs changements et la forêt					
Dévoisement de réseaux					
Construction	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	515	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	12	litre
Construction	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	24 588	tonne. km
Construction	Déchets	Déchets bâtiment	Déchets inertes en mélange (Gravats) [hors recyclage]	614	tonne
Équipements					
Changement d'affectation du sol					
Construction	UTCF	Cultures	Prairies zones arbustives	3,05	ha
Construction	UTCF	Cultures	Prairies zones herbacées	12	ha
Construction	UTCF	Cultures	Sols artificiels enherbés/arbustifs	7,76	ha
Construction	UTCF	Cultures	Sols artificiels imperméabilisés	51	ha
Construction	UTCF	Cultures	Zones humides	2,71	ha
Construction	UTCF	Forêts Feuillus	Prairies zones arbustives	0,01	ha
Construction	UTCF	Forêts Feuillus	Prairies zones herbacées	0,41	ha
Construction	UTCF	Forêts Feuillus	Sols artificiels enherbés/arbustifs	0,34	ha
Construction	UTCF	Forêts Feuillus	Sols artificiels imperméabilisés	0,87	ha
Construction	UTCF	Forêts Feuillus	Zones humides	1,56	ha
Construction	UTCF	Prairies zones herbacées	Prairies zones arborées	0,37	ha
Construction	UTCF	Prairies zones herbacées	Sols artificiels enherbés/arbustifs	0,97	ha
Construction	UTCF	Prairies zones herbacées	Sols artificiels imperméabilisés	1,25	ha
Construction	UTCF	Prairies zones herbacées	Zones humides	0,06	ha
Mobilier urbain					
Construction	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	804	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	16	litre
Construction	Intrants	Acier	Acier ou fer blanc [neuf]	7,02	tonne
Construction	Intrants	Acier	Éléments en acier galvanisé	6,44	tonne
Construction	Intrants	Bois	Bois courte durée [fabrication]	3,78	tonne
Construction	Intrants	Béton préfabriqué	Equipements en béton préfabriqué	12	m3
Construction	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	23 482	tonne. km
Maintenance	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	5 607	litre
Maintenance	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	148	litre
Maintenance	Intrants	Acier	Acier ou fer blanc [neuf]	12	tonne
Maintenance	Intrants	Acier	Éléments en acier galvanisé	11	tonne
Maintenance	Intrants	Bois	Bois courte durée [fabrication]	6,30	tonne
Maintenance	Intrants	Béton préfabriqué	Equipements en béton préfabriqué	20	m3
Maintenance	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	49 691	tonne. km
Maintenance	Déchets	Déchets bâtiment	Bois de classe B [hors recyclage]	6,30	tonne
Maintenance	Déchets	Déchets bâtiment	Béton, briques, tuiles et céramiques [hors recyclage]	48	tonne
Maintenance	Déchets	Déchets bâtiment	Métaux [hors recyclage]	22	tonne

Éclairage					
Construction	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	2 484	litre
Construction	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	94	litre
Construction	Intrants	Acier	Mât de lampadaire d'éclairage	1 028	u
Construction	Intrants	Aluminium	Luminaires pour éclairage fonctionnel	1 028	u
Construction	Intrants	Béton hydraulique	Béton C20/25	261	m3
Construction	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	108 649	tonne. km
Exploitation	Énergie	Électricité	2018 - usage : Eclairage public	10 130 940	kWh
Maintenance	Énergie	Combustibles	Gazole non routier	17 851	litre
Maintenance	Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	648	litre
Maintenance	Intrants	Acier	Mât de lampadaire d'éclairage	2 570	u
Maintenance	Intrants	Aluminium	Luminaires pour éclairage fonctionnel	2 570	u
Maintenance	Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	152 280	tonne. km
Maintenance	Déchets	Déchets bâtiment	Métaux [hors recyclage]	225	tonne

Annexe 3 : Base de données FE

Annexe 3 : Facteurs d'émission, caractéristiques et sources

Inv. E1	Inv. E2	Inv. E3	U.F.	M.U. (kg)	Scope 1	Scope 2	Scope 3	Incertitude	Source
Énergie	Combustibles	Essence, supercarburant sans Pb (95, 95-E10, 98)	litre		2,23	0,50		10%	Base Carbone 20
Énergie	Combustibles	Gazole non routier	litre		2,51	0,66		10%	Base Carbone 20
Énergie	Combustibles	Huile moteur lubrifiant	litre	0,00		1,56		20%	Ecoinvent
Énergie	Électricité	2008 - usage : Autres (BTP. recherche. armée. etc.)	kWh			0,05		30%	Base Carbone 20
Énergie	Électricité	2018 - usage : Autres (BTP. recherche. armée. etc.)	kWh			0,05		30%	Base Carbone 20
Énergie	Électricité	2018 - usage : Eclairage public	kWh			0,06		30%	Base Carbone 20
UTCF	Cultures	Prairies zones arbustives	ha				- 85 165	70%	Aldo
UTCF	Cultures	Prairies zones herbacées	ha				- 59 498	70%	Aldo
UTCF	Cultures	Sols artificiels enherbés/arbustifs	ha				- 85 165	70%	Aldo
UTCF	Cultures	Sols artificiels imperméabilisés	ha				40 941	70%	Aldo
UTCF	Cultures	Zones humides	ha				- 307 392	70%	Aldo
UTCF	Forêts Feuillus	Prairies zones arbustives	ha				414 929	70%	Aldo
UTCF	Forêts Feuillus	Prairies zones herbacées	ha				440 595	70%	Aldo
UTCF	Forêts Feuillus	Sols artificiels enherbés/arbustifs	ha				414 929	70%	Aldo
UTCF	Forêts Feuillus	Sols artificiels imperméabilisés	ha				541 035	70%	Aldo
UTCF	Forêts Feuillus	Zones humides	ha				192 701	70%	Aldo
UTCF	Prairies zones herbacées	Prairies zones arborées	ha				- 176 000	70%	Aldo
UTCF	Prairies zones herbacées	Sols artificiels enherbés/arbustifs	ha				- 25 667	70%	Aldo
UTCF	Prairies zones herbacées	Sols artificiels imperméabilisés	ha				100 439	70%	Aldo

UTCF	Prairies zones herbacées	Zones humides	ha				- 247 894	70%	Aldo
Intrants	Acier	Acier ou fer blanc [neuf]	tonne	1 000			2 211	10%	Base Carbone 20
Intrants	Acier	Mât de lampadaire d'éclairage	u	79	0,00	0,00	175	10%	Base Carbone 20
Intrants	Acier	Poteau panneau de police acier galvanisé	u	10	0,00	0,00	28	20%	Bilan produit
Intrants	Acier	Réseau d'adduction gaz acier [Diam. Ext. entre 25 et 50 mm]	mL	4,90			28	30%	INIES
Intrants	Acier	Éléments en acier galvanisé	tonne	1 000			2 820	20%	Bilan produit
Intrants	Aluminium	Luminaires pour éclairage fonctionnel	u	8,38			635	30%	INIES
Intrants	Aluminium	Panneaux de signalisation [m ²]	m ²	7,69	0,00	0,00	115	30%	Bilan produit
Intrants	Asphalte	Couche d'imprégnation (émulsion bitume)	tonne	1 000	0,00	0,00	485	28%	Base Carbone 20
Intrants	Bois	Bois courte durée [fabrication]	tonne	1 000			37	50%	Base Carbone 20
Intrants	Béton hydraulique	Béton C20/25	m3	2 300	0,00	0,00	186	30%	Base Carbone 20;INIES
Intrants	Béton hydraulique	Béton désactivé	m3	2 400			426	30%	INIES
Intrants	Béton préfabriqué	Bordure T2	ml	82	0,00	0,00	17	30%	INIES
Intrants	Béton préfabriqué	Bordurette en béton (h=20 cm)	mL	20	0,00	0,00	4,20	30%	INIES
Intrants	Béton préfabriqué	Cadre béton préfabriqué (OH)	m3	2 400	0,00	0,00	516	28%	CERIB;DIOGEN
Intrants	Béton préfabriqué	Caniveau béton en U	ml	36	0,00	0,00	7,57	30%	INIES
Intrants	Béton préfabriqué	Equipements en béton préfabriqué	m3	2 400	0,00	0,00	335	30%	INIES
Intrants	Béton préfabriqué	Pavés en béton préfabriqué	m ²	184			22	30%	INIES
Intrants	Divers	Eau d'arrosage	m3	1 000	0,30	0,08	0,00	5%	Base Carbone 20
Intrants	Divers	Eau du robinet	litre	1,00			0,00	30%	Base Carbone
Intrants	Enduits/revêtements résine	Enduit bitumineux pour l'étanchéité et l'imperméabilisation pour murs enterrés	m ²	2,00			20	30%	INIES
Intrants	Enduits/revêtements résine	Enduit à froid projeté (ACV entreprise SIGNATURE)	litre	1,30			5,64	30%	Signature
Intrants	Enrobés bitume	Enrobés bitumineux	tonne	1 000			53	20%	Base Carbone 20
Intrants	Graviers/granulats	Granulat sortie carrière	m3	1 700	0,00	0,00	6,80	50%	Base Carbone 20

Intrants	Graviers/granulats	Grave non traitée	m3	1 700	0,00	0,00	25	20%	Base Carbone 20
Intrants	Graviers/granulats	Grave, non traitée	m3	1 700	0,00	0,00	25	20%	Base Carbone 20
Intrants	Graviers/granulats	Sable	tonne	1 000			45	30%	Ecoinvent
Intrants	Graviers/granulats	Tourbe horticole Brune	tonne	1 000			373	20%	Base Carbone 20
Intrants	Matériel électronique	Câble cuivre basse tension [section conductrice entre 95 et 285 mm ² /3G]	mL	3,40			28	30%	INIES
Intrants	Matériel électronique	Câble haute tension [Section conductrice entre 0,97 mm ² et 3,1 mm ² - 60kV DC / 20kV AC]	mL	0,23			8,64	30%	INIES
Intrants	Matériel électronique	Câble moyenne tension 12/20 kV [Section conductrice de 150 mm ² à 240 mm ²]	mL	6,41			25	30%	INIES
Intrants	Matériel électronique	Fibre optique (Réseaux) [D=4 à 8,5 mm]	mL	0,07			0,22	30%	INIES
Intrants	Matériel électronique	Moteur électrique et pompes (moyenne)	kg	1,00			5,23	30%	Ecoinvent
Intrants	Plastiques/polymères	Canalisation d'assainissement pluvial en PVC [D=315 mm]	mL	10			12	30%	INIES
Intrants	Plastiques/polymères	Canalisation eaux usées/vannes en PVC [D=140 mm]	mL	1,82			3,80	30%	INIES
Intrants	Plastiques/polymères	Gaine TPC en polyéthylène [Diamètre ext. = 63 mm]	mL	1,02			4,19	30%	INIES
Intrants	Plastiques/polymères	Grillage avertisseur (polyéthylène, largeur=20 cm)	mL	0,02	0,00	0,00	0,05	20%	Base Carbone 20
Intrants	Plastiques/polymères	Plastique, PEHD [neuf]	tonne	1 000			1 920	20%	Base Carbone 20
Intrants	Plastiques/polymères	Réseaux d'adduction d'eau en PVC [D entre 110 et 200 mm]	mL	3,50			31	30%	INIES
Intrants	Ratios	Assurance, services bancaires, conseil et honoraires	k€				110	80%	Base Carbone 20
Intrants	Végétation	Arbres (Quercus ilex φ35cm)	u	600			1,07	50%	Donnée métier
Intrants	Végétation	Arbuste	u	12			1,07	50%	Donnée métier
Intrants	Végétation	Mélange de semences pelouse	kg	1,00			1,20	30%	Ecoinvent
Immobilisations	Bâtiments/EP	Bâtiment industriel, structure en béton	m ²	0,00			825	50%	Base Carbone 20

Immobilisations	Véhicules, Machines et Outils	Véhicules fabrication	tonne				5 500	50%	Base Carbone 20
Fret	Routier	Articulé, 40 à 44 T diesel routier, 7 % de biodiesel	tonne.k m		0,05	0,01		70%	Base Carbone 20
Fret	Routier	Rigide, 26 à 32 T diesel routier, 7 % de biodiesel	tonne.k m		0,07	0,02		70%	Base Carbone 20
Déplacements	Routiers	Autobus moyen, agglomération de plus de 250 000 habitants	passage r.km				0,13	60%	Base Carbone 20
Déplacements	Routiers	Voiture, motorisation moyenne 2018	km				0,19	60%	Base Carbone 20
Déchets	Déchets bâtiment	Bois de classe B [hors recyclage]	tonne	1 000			23	30%	Base Carbone 20
Déchets	Déchets bâtiment	Béton, briques, tuiles et céramiques [hors recyclage]	tonne	1 000			11	30%	Base Carbone 20
Déchets	Déchets bâtiment	Déchets inertes en mélange (Gravats) [hors recyclage]	tonne	1 000			9,00	30%	Base Carbone 20
Déchets	Déchets bâtiment	Déchets non dangereux en mélange (DIB) [hors recyclage]	tonne	1 000			23	30%	Base Carbone 20
Déchets	Déchets bâtiment	Métaux [hors recyclage]	tonne	1 000			8,00	20%	Base Carbone 20
Déchets	Déchets dangereux	DIS [stockage]	tonne	1 000			128	50%	Base Carbone 20
Déchets	Ordures ménagères	Déchets putrescibles [incinération]	tonne	1 000			45	50%	Base Carbone 20