

Février 2023

Projet de modification partielle du PRAS – ZIR 15 « Heysel »

Rapport sur les incidences environnementales

Annexe 1 : Bilan carbone

Table des matières

1. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	2
1.1. Introduction	2
1.2. Périmètre d'analyse	2
1.3. Gestion des calculs et sources de données	3
1.4. Précautions d'usage inhérentes à ce type d'évaluation	5
2. HYPOTHÈSES ET RÉSULTATS	5
2.1. Hypothèses générales	5
2.2. Volet Construction	7
2.2.1. Hypothèses	7
2.2.2. Résultats	15
2.3. Volet Exploitation	21
2.3.1. Hypothèses	21
2.3.2. Résultats	31
2.4. Volet Mobilité	35
2.4.1. Hypothèses	35
2.4.2. Résultats	39
2.5. Résultats globaux	42
2.6. Pistes d'amélioration et alternatives	44
2.6.1. Construction – Structure alternative	44
2.6.2. Construction – Suppression parkings souterrains	46
3. RECOMMANDATIONS	48
4. CONCLUSIONS	49
5. RÉFÉRENCES	52
5.1. Cadre de référence	52
5.2. Publications	52
5.3. Sites Internet consultés	52
6. ANNEXES	54
6.1. Facteurs d'émission pour la voiture particulière	54

1. Méthodologie générale

1.1. Introduction

Le présent bilan carbone a pour objectif d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre engendrées par la mise en œuvre de la ZIR n°15 – Heysel, selon les deux hypothèses de mise en œuvre : avec et sans PPAS.

De manière générale, le principe de calcul d'un bilan carbone consiste à sommer les émissions des sources de gaz à effet de serre considérées. Pour une source donnée, les émissions sont égales au produit d'une donnée d'activité (DA) et du facteur d'émission (FE) correspondant.

La donnée d'activité peut être définie comme étant une « *mesure quantitative de l'activité occasionnant l'émission des gaz à effet de serre* ». Il peut s'agir de quantités de matériaux (m³, m², tonnes, ...), de passagers-kilomètres relatifs à des déplacements engendrés par le projet, de consommations d'énergie (kWh de gaz, d'électricité, ...), ...

Le facteur d'émission peut quant à lui être défini comme étant le « *facteur rapportant les données d'activité aux émissions ou suppression de gaz à effet de serre* ». Il est exprimé en masse d'équivalent CO₂ par unité de la donnée d'activité (tonne de matériaux, passagers-kilomètres, kWh, ...).

Les émissions peuvent en effet consister en divers gaz à effet de serre, parmi lesquels, outre le CO₂, peuvent être cités le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les hydrofluorocarbures (HFC), l'hexafluore de soufre (SF₆), les perfluorocarbures (PFC), ... Afin de pouvoir comparer les émissions de gaz différents et de réaliser un bilan, il est nécessaire de les convertir en **tonnes équivalent CO₂**. Cette conversion consiste à multiplier le produit 'donnée d'activité x facteur d'émission' par le PRG¹ (ou en anglais, GWP : Global Warming Power) correspondant au gaz concerné.

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

1.2. Périmètre d'analyse

L'évaluation porte sur 3 volets :

- Les émissions liées à la **construction des bâtiments** (« volet Construction ») ;
- Les émissions liées à l'**exploitation des bâtiments**, consistant ici en les consommations d'énergie engendrées par leur occupation (« volet Exploitation ») ;
- Les émissions liées à la **mobilité** induite par le projet (« volet Mobilité »).

En ce qui concerne la construction, le bilan carbone ne prend ici en compte que les éléments de l'enveloppe ainsi que les planchers et principaux murs intérieurs des différents bâtiments. Les émissions liées à la fabrication des installations techniques, du mobilier, ... ne sont pas ici

¹ Potentiel de réchauffement global : « *terme utilisé pour décrire la puissance relative d'un gaz à effet de serre (GES), en tenant compte de la durée de temps pendant laquelle il restera actif dans l'atmosphère.*

Les potentiels de réchauffement global actuellement utilisés sont ceux calculés sur 100 ans. Le dioxyde de carbone est considéré comme le gaz de référence et il lui est attribué un PRG égal à 1 pour 100 ans. » [Source : Eurostat]

considérées. D'autres éléments, tels que, les aménagements de voirie et d'espaces publics, engendrent également des émissions de gaz à effet de serre. Etant donné l'importance relative des constructions par rapport à ces aménagements et les incertitudes liées au faible niveau de définition du projet, s'agissant d'un plan, ces émissions n'ont pas été considérées dans cette étude. Il en est de même pour la démolition des bâtiments existants, donnant lieu à des émissions marginales, les surfaces planchers des constructions concernées étant très limitées par rapport à celles des constructions neuves.

Pour l'exploitation, les émissions dues aux consommations d'énergie liées aux équipements extérieurs (éclairage, mobilier urbain, ...) ne sont pas considérées, de même que celles dues à l'adduction d'eau de ville et à la gestion des eaux usées.

Afin de mettre en perspective les 3 volets dans une approche de type analyse de cycle de vie du projet d'aménagement, un **périmètre temporel de 60 ans** a arbitrairement été fixé. Il s'agit d'une durée conventionnelle généralement considérée pour ce type d'analyse². Dans les faits, la durée du cycle de vie des matériaux des bâtiments devrait être plus importante, dans une optique d'utilisation rationnelle et durable des ressources. La période de temps ici considérée s'étend dès lors, par hypothèse, de 2031 à 2090.

1.3. Gestion des calculs et sources de données

Afin de mener à bien l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre, un outil de calcul a été développé dans Excel afin de prendre en compte les spécificités qu'implique une évaluation sur un plan d'aménagement en termes de types de données disponibles. Ce fichier comprend un onglet de calcul par volet.

S'agissant d'un bilan carbone relatif à un plan d'aménagement et non pas à un projet d'infrastructure bien défini pour lequel des informations détaillées sont potentiellement disponibles (métré, nature des matériaux, ...), une **spatialisation** à partir de données urbanistiques générales (programme, ...) doit préalablement être menée pour chacun des deux scénarios (avec et sans PPAS). Cela consiste à déterminer la géométrie de bâtiments fictifs (nombre, gabarits, emprise au sol, sous-sol), déterminée pour chaque affectation, en fonction de données urbanistiques de base (surfaces plancher, emprises maximales des constructions).

La première partie du **volet Construction** consiste ensuite à préciser cette géométrie des constructions, en déterminant les surfaces des principaux éléments constitutifs des bâtiments (façades, planchers, dalles de sol, murs contre terre au niveau des sous-sols, ...), qui constituent les données d'activité à partir desquelles les émissions sont calculées. Dans un second temps, les facteurs d'émission sont définis par unité de surface à l'aide du logiciel *One Click LCA*. Ce logiciel vise à évaluer les impacts environnementaux des bâtiments et infrastructures sur l'ensemble de leur cycle de vie. Pour ce faire, des compositions de parois types, représentatives des standards de performance actuels, ont été créées.

En ce qui concerne le volet **Exploitation**, l'évaluation consiste à déterminer des consommations spécifiques d'énergie finale pour chaque affectation (tant pour l'existant maintenu que pour le neuf), en fonction des vecteurs énergétiques (gaz et électricité), des

² Notamment dans l'outil belge TOTEM (Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials), ainsi que dans les certifications BREEAM et LEED, où une durée de vie minimale de 60 ans est considérée.

usages et du rendement des installations techniques (chauffage, ECS³ et refroidissement). Ces consommations sont ensuite multipliées par les surfaces de plancher correspondantes et sont converties en émissions de gaz à effet de serre par des facteurs d'émission issus de différentes sources de la littérature.

Enfin, en ce qui concerne le volet **Mobilité**, l'évaluation se base sur des quantités de déplacements hebdomadaires et sur leur répartition par classe de distances parcourues, et ce, pour différents modes (voiture individuelle, les transports en commun (métro, tram, bus) et le vélo) et motorisations, en fonction du programme. Les livraisons en lien avec les commerces et établissements divers ne sont pas considérées dans l'analyse, étant donné que les futurs exploitants et la nature de leurs activités ne sont pas connus à ce stade. Les données d'activité obtenues, exprimées, selon les modes, en passagers.km ou en véhicules.km, sont ensuite multipliées par les facteurs d'émission correspondants.

Les sources des différentes hypothèses sont précisées plus loin. Pour les volets Exploitation et Mobilité, des hypothèses d'évolution temporelles sont posées, afin de déterminer les émissions annuelles sur la période d'analyse considérée.

Les différents postes d'émission des trois volets sont par la suite compilés dans un onglet consistant en une **base de données reprenant tous les postes calculés**, à partir de laquelle des post-traitements sont réalisés.

La méthodologie générale et les principaux inputs sont synthétisés sur le *mindmap* ci-dessous.

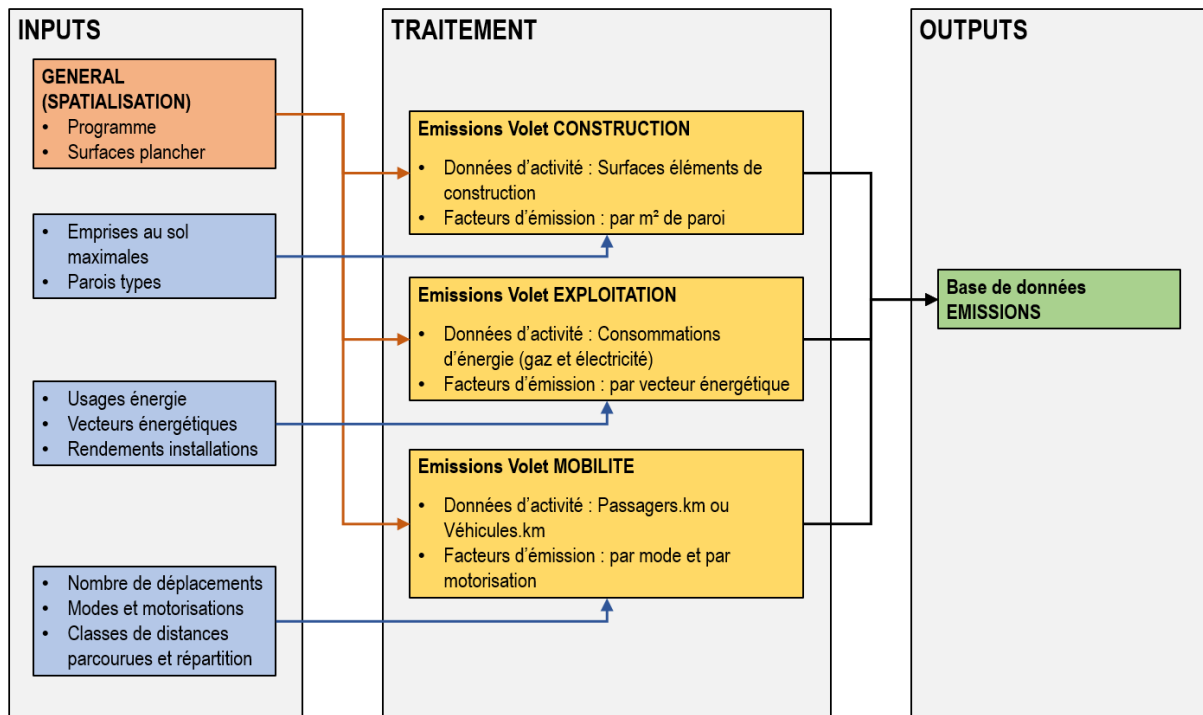


Figure 1 : Méthodologie générale et principaux inputs du bilan carbone (ARIES, 2023)

³ Eau chaude sanitaire.

1.4. Précautions d'usage inhérentes à ce type d'évaluation

Le périmètre de l'analyse s'étendant jusqu'en 2090, de nombreuses hypothèses doivent bien évidemment être formulées sur l'évolution de l'exploitation et de la mobilité, étant donné les potentielles évolutions technologiques, comportementales, ... pouvant avoir lieu dans cet intervalle. S'agissant, en outre, de l'évaluation d'un plan d'aménagement concernant des constructions dont les surfaces plancher et les affectations sont encore susceptibles d'évoluer et dont la géométrie (gabarits, emprises au sol) et l'architecture font également l'objet d'hypothèses, de nombreuses incertitudes affectent les résultats, qui ne doivent, de ce fait, pas être considérés comme absolus. L'exercice vise ici à déterminer un ordre de grandeur pour les différents postes d'émission et de permettre une objectivation des enjeux qu'il sous-tendent.

2. Hypothèses et résultats

2.1. Hypothèses générales

Comme mentionné précédemment, le **périmètre temporel** de l'analyse est de 60 ans, correspondant à une période s'étalant de 2031 à 2090.

Une **spatialisation** à partir de données urbanistiques générales a dû être menée, afin de déterminer la géométrie de bâtiments fictifs (nombre, gabarits, emprise au sol, sous-sol), déterminée pour chaque affectation, en fonction de données urbanistiques de base pour chacun des deux scénarios (avec et sans PPAS).

Ces données consistent en :

- La surface totale de la ZIR n°15 ;
- Le programme : affectations et surfaces planchers brutes totales pour chacune d'elles ;
- La surface des emprises des îlots existants maintenus et/ou démolis et reconstruits (stade Roi Baudouin, Kinopolis, Mini Europe, équipements divers, ...) ;
- La surface plancher des infrastructures maintenues et/ou démolies et reconstruites (stade Roi Baudouin, Kinopolis, Mini Europe, équipements divers, ...) ;
- La surface totale d'espaces verts en dehors des îlots destinés à être bâtis.

Cet ensemble de données permet de déterminer la superficie totale des îlots concernés par le projet. Pour les calculs, une simplification consiste à supposer que l'ensemble du programme est concentré sur un seul grand îlot⁴, faute d'informations précises sur la subdivision en îlots pour la ZIR avec PPAS et cette subdivision étant totalement inconnue dans le cas du scénario ZIR sans PPAS.

La proportion d'espaces ouverts considérée dans cet îlot est de 25% dans le scénario avec PPAS et de 40% dans le scénario ZIR sans PPAS. Cette grandeur, combinée aux précédentes,

⁴ A l'exception du stade Roi Baudouin (conservé dans les 2 scénarios), de Mini Europe (conservé dans les 2 scénarios) et de Kinopolis (conservé dans le cas du scénario sans PPAS).

permet de déterminer l’emprise maximale (ou surface bâtable maximale) des nouvelles constructions.

Le rapport entre la surface plancher totale envisagée (pour les constructions neuves) et cette emprise maximale correspond dès lors au gabarit moyen des constructions (neuves), s’élevant à 5,5 (« R+4,5 ») dans le scénario ZIR avec PPAS et à 4 (« R+3 ») dans le scénario ZIR sans PPAS.

Tant pour le scénario sans PPAS que pour le scénario avec PPAS, les affectations prévues sont les suivantes :

- Logement ;
- Equipement (dont le stade Roi Baudouin, la crèche Gabrielle Petit, le planétarium) ;
- Bureau ;
- Commerce (dont le cinéma et les loisirs) ;
- Hôtel.

Les données générales sont reprises dans le tableau ci-dessous.

	ZIR + PPAS	ZIR sans PPAS
Surfaces plancher programme – Neuf et existant [m²]		
▪ Logement	117.000	77.825
▪ Equipement	99.826	50.587
▪ Bureau	13.252	7.783
▪ Commerce	177.000	42.804
▪ Hôtel	18.000	15.565
Total	425.078	194.564
Surface plancher totale programme – Neuf [m²]	390.278	137.293
Surface plancher totale programme – Existant [m²]	*34.800	**57.271
Surface totale îlot projet (hors stade) [m²]	95.212	56.622
Surface espaces non bâtis [m²]	23.803	22.648
Surface bâtable maximale [m²]	71.409	33.973
Gabarit moyen constructions neuve (surface plancher totale programme Neuf/surface bâtable maximale)	5,47	4,04

* Correspond à la surface du stade Roi Baudouin, du planétarium, de la crèche Gabrielle Petit et de Mini Europe

** Correspond à la surface du stade Roi Baudouin, du planétarium, de la crèche Gabrielle Petit, de Kinopolis et de Mini Europe

Tableau 1 : Données de base principales pour la spatialisation (ARIES, 2023)

A titre de simplification, il est considéré qu’une seule affectation par bâtiment. Dans les faits, les constructions pourront abriter une combinaison d’affectations (bâtiments de logements avec un rez-de-chaussée commercial, par exemple).

La spatialisation concerne davantage le volet 'Construction', aussi, est-elle développée dans la section suivante qui y est dédiée.

Enfin, de manière générale, les hypothèses posées sont identiques pour les scénarios avec et sans PPAS :

- Construction : utilisation des mêmes parois types ;
- Exploitation : mêmes évolutions des besoins en énergie et répartition entre usages et vecteurs énergétiques, mêmes rendements des installations techniques, ... ;
- Mobilité : mêmes parts modales.

Seuls diffèrent le nombre de déplacements total et leur répartition selon les distances parcourues (volet Mobilité).

2.2. Volet Construction

2.2.1. Hypothèses

2.2.1.1. Valeurs considérées pour la détermination des données d'activité

L'évaluation des émissions pour le volet Construction nécessite de développer davantage la spatialisation. Connaissant les gabarits moyens, les surfaces plancher et les emprises maximales, l'étape suivante de celle-ci vise à déterminer plus précisément les caractéristiques géométriques des bâtiments et consiste à fixer les gabarits moyens pour chaque affectation (\bar{n}). Le principe consiste à les fixer pour 4 affectations (équipement, bureau, commerce et hôtel) et de déduire celui de l'affectation logement, en tenant compte des contraintes imposées ci-dessus.

	Scénario ZIR + PPAS	Scénario ZIR sans PPAS
Logement	9,64	6,16
Équipement	4	2
Bureau	6	5
Commerce	4,5	2
Hôtel	13	9

Tableau 2 : Gabarits moyens des affectations (ARIES, 2023)

Partant de cela, l'outil de calcul développé permet d'introduire, pour chaque affectation, deux ensembles de bâtiments présentant chacun un gabarit propre (n_1 et n_2), de manière à respecter, pour cette affectation, la surface bâissable maximale, la surface plancher totale et le gabarit moyen (\bar{n}). Les bâtiments sont, à titre de simplification, supposés être parallélépipédiques.

L'outil permet ensuite de définir, pour les ensembles de bâtiments ainsi obtenus, un nombre de bâtiments et le rapport longueur/largeur, afin d'obtenir des constructions géométriquement

réalistes (éviter les bâtiments de logements trop profonds, des bâtiments hauts de trop faibles longueur et largeur, ...).

Sont de cette manière déterminés, pour ce qui concerne la partie hors-sol de chaque bâtiment :

- La surface de la dalle de sol (celle-ci est considérée isolée, comme elle sépare le volume chauffé du bâtiment du parking souterrain non chauffé) ;
- La surface de la toiture ;
- La surface des planchers autres que la dalle de sol ;
- La surface des façades (parties opaques) ;
- La surface des parties vitrées des façades ;
- La surface des murs intérieurs.

Pour ce faire, l'introduction d'une série d'hypothèses est nécessaire : hauteur des niveaux et épaisseur des planchers (supposées identiques pour tous les niveaux), proportion de surfaces vitrées, proportion de murs intérieurs par rapport à la surface totale des murs extérieurs hors-sol. Ces données peuvent être différenciées par affectation.

La présence de sous-sols peut également être prise en compte, moyennant l'introduction du nombre de niveaux et de la hauteur de ceux-ci (identique pour tous les niveaux) et de leur taux d'emprise au sol (pourcentage de la surface de la dalle de sol du bâtiment hors-sol). Ces données peuvent également être différenciées par affectation. La spatialisation de base considère 2 niveaux de sous-sol, sous la totalité des emprises des bâtiments.

2.2.1.2. Facteurs d'émission pour le volet 'Construction'

Dans un scénario de base, il est supposé que les bâtiments soient construits de manière traditionnelle, selon les standards actuels, avec des structures portantes et des façades en béton. Les performances des parois de déperdition (façades, toitures et dalles en contact direct avec le sol ou avec un espace adjacent non chauffé (tel qu'un parking souterrain ou des caves) sont conformes aux exigences PEB actuelles en Région de Bruxelles-Capitale⁵.

Les facteurs d'émission sont déterminés pour chacune des parois types définies dans le volet Construction, à l'aide du logiciel *One Click LCA*. La période de calcul considérée pour le cycle de vie des bâtiments est de 60 ans.

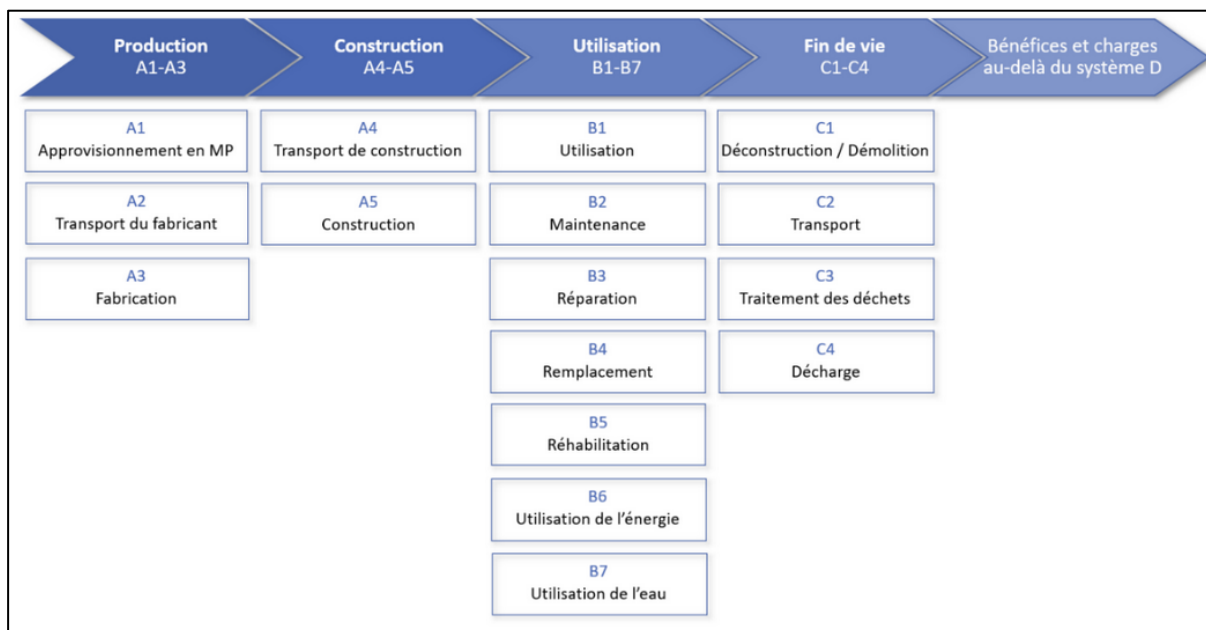
La méthodologie adoptée par ce logiciel est basée sur la norme EN 15978 (Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Evaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul).

Celle-ci est basée sur un découpage du cycle de vie selon différentes phases, appelées modules, elles-mêmes subdivisées en sous-modules, représentées sur la figure ci-dessous :

- Module A : Production des matériaux (A1-A3) et Construction (A4-A5) ;
- Module B : Utilisation des bâtiments (B1-B7) ;
- Module C : Fin de vie (C1-C4) ;
- Module D : Bénéfices et charges au-delà du système (cela correspond notamment au potentiel de réutilisation, de récupération et de recyclage de matériaux, de

⁵ Valeur $U_{\max} = 0,24 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pour toutes les parois concernées à partir du 1^{er} janvier 2021.

l'exportation de production locale d'énergie, ...). La prise en compte de ce module dans l'évaluation permet de tenir compte des aspects de la conception du projet visant à favoriser la réutilisation, la récupération et le recyclage des matériaux utilisés ultérieurement dans d'autres constructions ou produits. Il s'agit dans ces cas précis d'émissions évitées. La valorisation effective des matériaux est toutefois imprévisible.



MP = Matières premières

Figure 2 : Etapes du cycle de vie d'un bâtiment (INIES, 2022)

En termes de données, le logiciel est alimenté, selon les matériaux, par des valeurs issues d'EPD (*Environmental Product Declaration*, ou, en français, Déclarations Environnementales de Produit), de FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (France)) ou encore de valeurs génériques déterminées par le logiciel. Ces documents fournissent les facteurs d'émission relatifs aux différents modules. Toutefois, certaines données peuvent manquer.

De ce fait, les modules considérés dans ce bilan carbone au niveau de la construction sont les suivants : A1 à A5, B3, B4, B5, C2 à C4. Les émissions liées à l'utilisation (sous-module B1) et la maintenance (sous-module B2) ne sont pas prises en compte. Les émissions liées aux consommations d'énergie (sous-module B6) sont évaluées dans le volet Exploitation, tandis que les émissions liées aux consommations d'eau (sous-module B7) ne sont pas évaluées.

Il est ici fait choix de ne pas prendre en compte le module D étant donné le caractère aléatoire de la valorisation des matériaux.

La composition des parois types est reprise dans les tableaux ci-dessous, avec leurs principales caractéristiques, respectivement pour le scénario constructif « Structure de base » en béton et pour le scénario constructif « Structure alternative », où les bâtiments sont constitués d'une structure bois pour tout ou partie de leurs surfaces plancher (voir analyse au *Point 2.6.1. Construction – Structure alternative*). La structure des parkings est considérée construite en béton dans les deux scénarios constructifs, de même que la dalle de sol isolée séparant ce parking du volume chauffé (dalle de sol du rez-de-chaussée).

Sous-sol/ Hors sol	Élément	Composant	Épaisseur [m]	Masse surfactive [kg/m²]	Volume [m³]	Surface pour 1 m² de paroi [m²/m²]	Caractéristiques	Désignation One Click LCA
Sous-sol	Dalle de sol	Béton	0,3				Classe de résistance C25/30 avec ciment CEM II (30% cendres volantes)	Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI) with CEM II/B-V, 30% fly ash content (280 kg/m3; 17.5 lbs/ft3 total cement)
		Armatures acier		100			Acier neuf	Reinforcement steel (rebar), generic, 0% recycled content (only virgin materials), A615
		Étanchéité					Film polyéthylène	Polyethylene sealing film for slabs, ép. 150 micron, Donnee par default (MDEGD)
	Mur contre-terre	Béton	0,6				Classe de résistance C25/30 avec ciment CEM II (30% cendres volantes)	Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI) with CEM II/B-V, 30% fly ash content (280 kg/m3; 17.5 lbs/ft3 total cement)
		Armatures acier		100			Acier neuf	Reinforcement steel (rebar), generic, 0% recycled content (only virgin materials), A615
Hors sol	Dalle de sol isolée	Béton	0,2				Classe de résistance C25/30 avec ciment CEM II (30% cendres volantes)	Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI) with CEM II/B-V, 30% fly ash content (280 kg/m3; 17.5 lbs/ft3 total cement)
		Armatures acier		100			Acier neuf	Reinforcement steel (rebar), generic, 0% recycled content (only virgin materials), A615
		Isolation	2 x 0,08				Polyuréthane	PUR insulation board, aluminium facing, L=0.022 W/mK, R=3.6 m2K/W, 80 mm, 2.688 kg/m2, Lambda=0.022 W/(m.K), Powerdeck, Powerwall, Powerroof, Powerline and Powerline C (Recticel)
		Béton	0,05				Classe de résistance C25/30 avec ciment CEM II (30% cendres volantes)	Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI) with CEM II/B-V, 30% fly ash content (280 kg/m3; 17.5 lbs/ft3 total cement)
		Carreaux terre cuite	0,017					Floor tile, French average, 37.2 kg/m2 (CTMNC)
	Mur extérieur	Enduit plâtre			8,5			Plaster coating for walls and ceilings, 8.5 kg/m2, DONNEE PAR DEFAUT (DED)
		Blocs béton	0,2				Blocs 20 x 50 x 20/25 cm	Concrete panel, thick side joining, B40, 200x500x200/250 mm, 179.1 kg/m2 (CERIB)
		Pare-vapeur			0,18		Membrane polypropylène	Polypropylene vapour membrane, French average, 0.18 kg/m2 (MDEGD)
		Isolation	0,08				Polyuréthane	PUR insulation board, aluminium facing, L=0.022 W/mK, R=3.6 m2K/W, 80 mm, 2.688 kg/m2, Lambda=0.022 W/(m.K), Powerdeck, Powerwall, Powerroof, Powerline and Powerline C (Recticel)
		Enduit sur isolant			4,8			Exterior powder paint coating, 4.8 kg/m2 (SIPEV)
		Enduit plâtre			8,5			Plaster coating for walls and ceilings, 8.5 kg/m2, DONNEE PAR DEFAUT (DED)

Sous-sol/ Hors sol	Élément	Composant	Épaisseur	Masse surfaccique	Volume	Surface pour 1 m ² de paroi	Caractéristiques	Désignation One Click LCA
	Mur intérieur	Béton	0,2				Classe de résistance C25/30 avec ciment CEM II (30% cendres volantes)	Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI) with CEM II/B-V, 30% fly ash content (280 kg/m ³ ; 17.5 lbs/ft ³ total cement)
		Armatures acier		100			Acier neuf	Reinforcement steel (rebar), generic, 0% recycled content (only virgin materials), A615
		Enduit plâtre		8,5				Plaster coating for walls and ceilings, 8.5 kg/m ² , DONNEE PAR DEFAUT (DED)
	Plancher intérieur	Enduit plâtre		8,5				Plaster coating for walls and ceilings, 8.5 kg/m ² , DONNEE PAR DEFAUT (DED)
		Béton	0,2				Classe de résistance C25/30 avec ciment CEM II (30% cendres volantes)	Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI) with CEM II/B-V, 30% fly ash content (280 kg/m ³ ; 17.5 lbs/ft ³ total cement)
		Armatures acier		100			Acier neuf	Reinforcement steel (rebar), generic, 0% recycled content (only virgin materials), A615
		Carreaux terre cuite	0,017					Floor tile, French average, 37.2 kg/m ² (CTMNC)
	Toiture	Enduit plâtre		8,5				Plaster coating for walls and ceilings, 8.5 kg/m ² , DONNEE PAR DEFAUT (DED)
		Béton	0,3				Classe de résistance C25/30 avec ciment CEM II (30% cendres volantes)	Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI) with CEM II/B-V, 30% fly ash content (280 kg/m ³ ; 17.5 lbs/ft ³ total cement)
		Armatures acier		100				Reinforcement steel (rebar), generic, 0% recycled content (only virgin materials), A615
		Pare-vapeur		0,18			Acier neuf	Polypropylene vapour membrane, French average, 0.18 kg/m ² (MDEGD)
		Isolation	2 x 0,08				Polyuréthane	PUR insulation board, aluminium facing, L=0.022 W/mK, R=3.6 m ² K/W, 80 mm, 2.688 kg/m ² , Lambda=0.022 W/(m.K), Powerdeck, Powerwall, Powerroof, Powerline and Powerline C (Recticel)
		Étanchéité EPDM roofing	0,0015					EPDM roofing membrane, 1.5 mm, 1.95 kg/m ² , 1300 kg/m ³ , RubberGard (Firestone Building Products)
	Fenêtre	Châssis aluminium + double vitrage						Aluminium frame window, 24.27 kg/m ² , 2.3 m ² /unit (Organisation professionnelle représentative des concepteurs, fabricants et installateurs de menuiseries extérieures en profilés aluminium)

Tableau 3 : Composition des parois types – Scénario constructif « Structure de base » (ARIES, 2023)

Sous-sol/ Hors sol	Élément	Composant	Épaisseur [m]	Masse surfaccique [kg/m²]	Volume [m³]	Surface pour 1 m² de paroi [m²/m²]	Caractéristiques	Désignation One Click LCA	
Sous-sol	Dalle de sol	Béton	0,3				Classe de résistance C25/30 avec ciment CEM II (30% cendres volantes)	Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI) with CEM II/B-V, 30% fly ash content (280 kg/m3; 17.5 lbs/ft3 total cement)	
		Armatures acier		100			Acier neuf	Reinforcement steel (rebar), generic, 0% recycled content (only virgin materials), A615	
		Étanchéité					Film polyéthylène	Polyethylene sealing film for slabs, ép. 150 micron, Donnee par default (MDEGD)	
	Mur contre-terre	Béton	0,6				Classe de résistance C25/30 avec ciment CEM II (30% cendres volantes)	Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI) with CEM II/B-V, 30% fly ash content (280 kg/m3; 17.5 lbs/ft3 total cement)	
		Armatures acier		100			Acier neuf	Reinforcement steel (rebar), generic, 0% recycled content (only virgin materials), A615	
Hors sol	Dalle de sol isolée	Béton	0,2				Classe de résistance C25/30 avec ciment CEM II (30% cendres volantes)	Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI) with CEM II/B-V, 30% fly ash content (280 kg/m3; 17.5 lbs/ft3 total cement)	
		Armatures acier		100			Acier neuf	Reinforcement steel (rebar), generic, 0% recycled content (only virgin materials), A615	
		Isolation	2 x 0,08				Polyuréthane	PUR insulation board, aluminium facing, L=0.022 W/mK, R=3.6 m2K/W, 80 mm, 2.688 kg/m2, Lambda=0.022 W/(m.K), Powerdeck, Powerwall, Powerroof, Powerline and Powerline C (Recticel)	
		Béton	0,05				Classe de résistance C25/30 avec ciment CEM II (30% cendres volantes)	Ready-mix concrete, normal strength, generic, C25/30 (3600/4400 PSI) with CEM II/B-V, 30% fly ash content (280 kg/m3; 17.5 lbs/ft3 total cement)	
		Carreaux terre cuite	0,017					Floor tile, French average, 37.2 kg/m2 (CTMNC)	
	Mur extérieur	Plaque plâtre	0,0125					Gypsum plaster board, regular, generic, 6.5-25 mm (0.25-0.98 in), 10.725 kg/m2 (2.20 lbs/ft2) (for 12.5 mm/0.49 in), 858 kg/m3 (53.6 lbs/ft3)	
		Pare-vapeur		0,18				Membrane polypropylène	Polypropylene vapour membrane, French average, 0.18 kg/m2 (MDEGD)
		Ossature bois				0,02			Wooden frame element, biogenic CO2 not subtracted (for CML), 517.4 kg/m3 (Bois de France)
		Isolation	0,145				0,92	Panneau fibres de bois	Wood fiber insulation panel, biogenic CO2 not subtracted (for CML), L=0.039 W/mK, R=3.7 m2K/W, 145 mm, 16.7 kg/m2, 115 kg/m3, Lambda=0.039 W/(m.K), PAVAWALL® SMART 145 mm (SOPREMA SAS)

Sous-sol/ Hors sol	Élément	Composant	Épaisseur	Masse surfaccique	Volume	Surface pour 1 m ² de paroi	Caractéristiques	Désignation One Click LCA	
		Isolation	0,025				Panneau laine de bois	Wood wool cement panel, biogenic CO2 not subtracted (for CML), L= 0.083 W/mK, R= 0.30 m2K/W, 25 mm, 10.4 kg/m2, 416 kg/m3, Lambda=0.083 W/(m.K), ORGANIC PURE 25mm (KNAUF)	
		Pare-pluie		0,2			Membrane polypropylène	Polypropylene roofing membrane, French average, 0.2 kg/m2 (MDEGD)	
		Bardage bois	0,02					Treated wooden cladding, generic, 15-40 mm (0.59-1.57 in), 9.75 kg/m2 (1.99 lbs/ft2)(for 15 mm/0.59 in), 525 kg/m3 (32.8 lbs/ft3), min. G4-1	
	Mur intérieur	Plaque plâtre	0,0125					Gypsum plaster board, regular, generic, 6.5-25 mm (0.25-0.98 in), 10.725 kg/m2 (2.20 lbs/ft2) (for 12.5 mm/0.49 in), 858 kg/m3 (53.6 lbs/ft3), 50% recycled gypsum	
		Ossature bois				0,02		Wooden frame element, biogenic CO2 not subtracted (for CML), 517.4 kg/m3 (Bois de France)	
		Isolation	0,145				0,92	Panneau fibres de bois	Wood fiber insulation panel, biogenic CO2 not subtracted (for CML), L=0.039 W/mK, R=3.7 m2K/W, 145 mm, 16.7 kg/m2, 115 kg/m3, Lambda=0.039 W/(m.K), PAVAWALL® SMART 145 mm (SOPREMA SAS)
		Plaque plâtre	0,125					Gypsum plaster board, regular, generic, 6.5-25 mm (0.25-0.98 in), 10.725 kg/m2 (2.20 lbs/ft2) (for 12.5 mm/0.49 in), 858 kg/m3 (53.6 lbs/ft3), 50% recycled gypsum	
	Plancher intérieur	Plaque plâtre	0,0125					Gypsum plaster board, regular, generic, 6.5-25 mm (0.25-0.98 in), 10.725 kg/m2 (2.20 lbs/ft2) (for 12.5 mm/0.49 in), 858 kg/m3 (53.6 lbs/ft3), 50% recycled gypsum	
		Plancher sur solives				0,02		Wood panel flooring on wooden joists, biogenic CO2 not subtracted (for CML), 72.81 kg/m2 (Bois de France)	
		Panneau isolation fibres de bois	0,145				0,92	Wood fiber insulation panel, biogenic CO2 not subtracted (for CML), L=0.039 W/mK, R=3.7 m2K/W, 145 mm, 16.7 kg/m2, 115 kg/m3, Lambda=0.039 W/(m.K), PAVAWALL® SMART 145 mm (SOPREMA SAS)	
		Linoleum						Acoustic linoleum flooring, width: 2.0 m, 3.515 kg/m2, Acoustic attenuation = 18 dB, Pour FORBO FLOORING SYSTEMS : Marmoleum Decibel Pour GERFLOR : Linoleum acoustic PLUS (KALEI)	
	Toiture	Plaque plâtre	0,0125					Gypsum plaster board, regular, generic, 6.5-25 mm (0.25-0.98 in), 10.725 kg/m2 (2.20 lbs/ft2) (for 12.5 mm/0.49 in), 858 kg/m3 (53.6 lbs/ft3), 50% recycled gypsum	
		Plancher sur solives	1					Wood panel flooring on wooden joists, biogenic CO2 not subtracted (for CML), 72.81 kg/m2 (Bois de France)	
		Pare-vapeur			0,18			Polypropylene vapour membrane, French average, 0.18 kg/m2 (MDEGD)	

Sous-sol/ Hors sol	Élément	Composant	Épaisseur	Masse surfaccique	Volume	Surface pour 1 m ² de paroi	Caractéristiques	Désignation One Click LCA
		Isolation	0,145			0,92	Panneau fibres de bois	Wood fiber insulation panel, biogenic CO2 not subtracted (for CML), L=0.039 W/mK, R=3.7 m2K/W, 145 mm, 16.7 kg/m2, 115 kg/m3, Lambda=0.039 W/(m.K), PAVAWALL® SMART 145 mm (SOPREMA SAS)
		Isolation PUR	0,08					PUR insulation board, aluminium facing, L=0.022 W/mK, R=3.6 m2K/W, 80 mm, 2.688 kg/m2, Lambda=0.022 W/(m.K), Powerdeck, Powerwall, Powerroof, Powerline and Powerline C (Recticel)
		Étanchéité EPDM roofing	0,0015					EPDM roofing membrane, 1.5 mm, 1.95 kg/m2, 1300 kg/m3, RubberGard (Firestone Building Products)
	Fenêtre	Châssis bois + double vitrage						Double glazing windows with wooden frame, 30.7 kg/m2, 1.4 W/m2K, biogenic CO2 not subtracted (for CML), FDES collective utilisable par toute entreprise qui produit en France des fenêtres et portes fenêtres, double vitrage acoustique ou standard, en bois tropicaux. (INSTITUT TECHNOLOGIQUE FCBA)

Tableau 4 : Composition des parois types – Scénario constructif « Structure alternative » (ARIES, 2023)

Les facteurs d'émission obtenus pour les différentes parois (valeurs par unité de surface) sont repris dans le tableau ci-dessous.

Sous-sol/Hors sol	Élément	Structure de base	Structure alternative
Sous-sol	Dalle de sol	155	155
	Mur contre-terre	213	213
Hors sol	Dalle de sol isolée	281	281
	Mur extérieur	46	37
	Mur intérieur	139	19
	Plancher intérieur	252	66
	Toiture	213	83
	Fenêtre	91	120

**Tableau 5 : Facteurs d'émission par unité de surface de paroi [kgCO₂ eq/m²]
 (ARIES, 2023)**

Les facteurs d'émission sont bien évidemment identiques pour les deux scénarios pour ce qui concerne les parties en sous-sol et la dalle de sol isolée, construites en béton. A noter que dans le cas de la structure de base, la composition des murs intérieurs comprend davantage de béton que celle des façades, ce qui explique le facteur d'émission plus élevé.

2.2.2. Résultats

Le graphique ci-dessous reprend les émissions globales pour le volet Construction, selon les différentes affectations, respectivement pour les scénarios avec et sans PPAS. Ces émissions sont exprimées en tonnes équivalent CO₂.

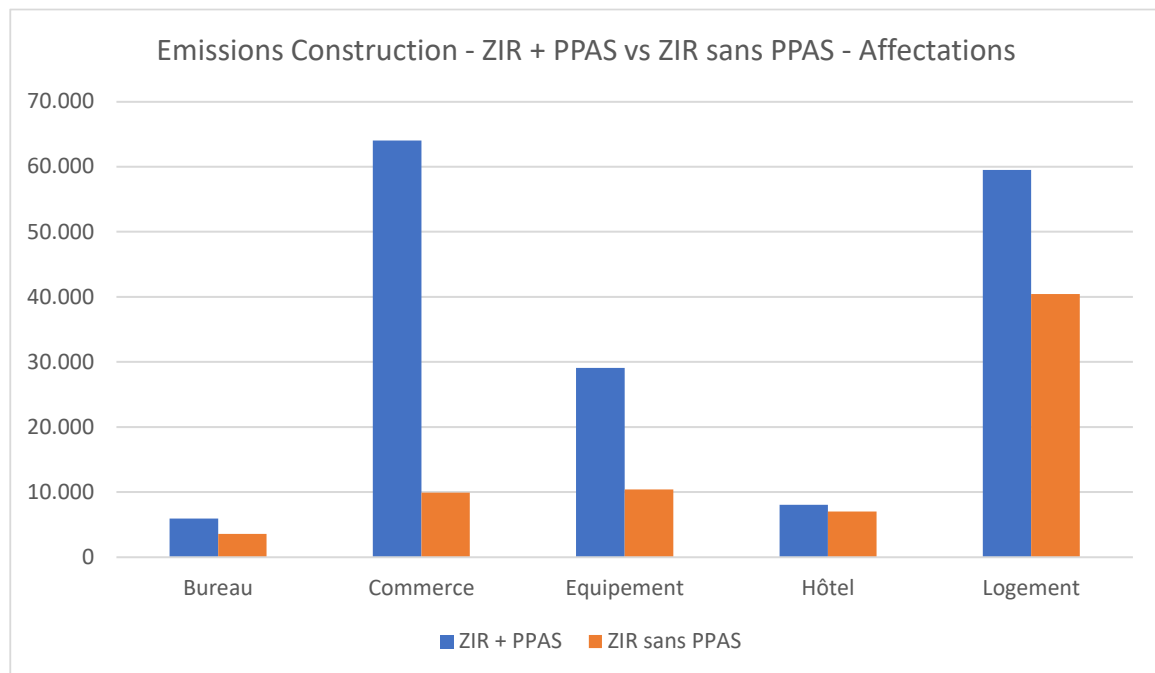


Figure 3 : Emissions du volet Construction réparties selon les affectations [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

Le tableau ci-dessous reprend les différents résultats, également répartis selon les modules du cycle de vie définis dans la norme EN 15978 (A : Production et construction – B : Utilisation – C : Fin de vie). Il est important de rappeler que les émissions du module B ne reprennent ici que les sous-modules B3 (réparation), B4 (remplacement) et B5 (réhabilitation). Elles ne reprennent pas les émissions du module B6, relatif aux consommations d'énergie, qui sont traitées dans le volet Exploitation.

Scénario	Affectation	Module A	Module B	Module C	Total
ZIR + PPAS	Logement	51.446	6.439	1.636	59.522
	Equipement	24.384	3.640	1.060	29.084
	Bureau	5.062	702	179	5.943
	Commerce	53.018	8.880	2.134	64.033
	Hôtel	6.904	938	189	8.031
	Total	140.815	20.600	5.199	166.613
	Proportion	85%	12%	3%	100%
ZIR sans PPAS	Logement	34.936	4.304	1.212	40.452
	Equipement	8.878	1.078	470	10.427
	Bureau	3.027	414	113	3.554
	Commerce	8.491	986	431	9.908
	Hôtel	6.008	814	178	7.000
	Total	61.342	7.596	2.404	71.342
	Proportion	86%	11%	3%	100%

Tableau 6 : Emissions du volet Construction réparties selon les affectations et les modules du cycle de vie [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

La production et la mise en œuvre des matériaux sont prépondérantes et représentent environ 85% des émissions totales du volet de la construction, pour les sous-modules pris en compte (voir *Point 2.2.1.2. Facteurs d'émission pour le volet 'Construction*).

Le graphique ci-dessous et le tableau ci-dessous reprennent les émissions globales pour le volet Construction, par catégorie de matériaux, respectivement pour les scénarios avec et sans PPAS. Ces émissions sont exprimées en tonnes équivalent CO₂.

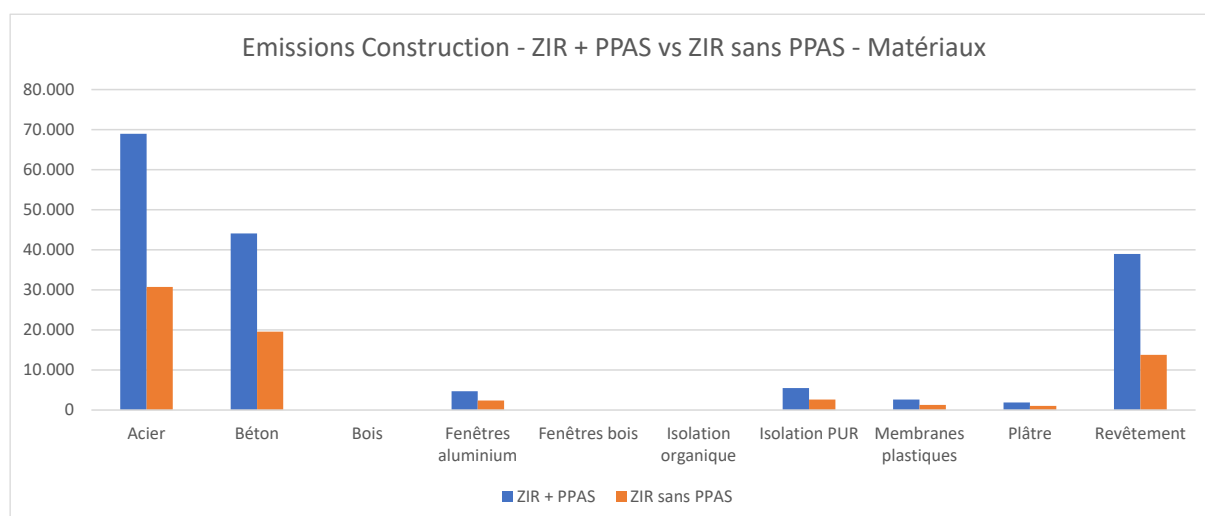


Figure 4 : Emissions du volet Construction réparties selon les catégories de matériaux [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

Scénario	Catégorie de matériaux	Emissions [tCO ₂ eq]	Proportion
ZIR + PPAS	Acier	68.943	41,4%
	Béton	44.039	26,4%
	Fenêtres aluminium	4.675	2,8%
	Isolation	5.482	3,3%
	Membranes plastiques	2.643	1,6%
	Plâtre	1.875	1,1%
	Revêtement	38.958	23,4%
	Total	166.613	100,0%
ZIR sans PPAS	Acier	30.699	43,0%
	Béton	19.590	27,5%
	Fenêtres aluminium	2.353	3,3%
	Isolation	2.644	3,7%
	Membranes plastiques	1.271	1,8%
	Plâtre	1.008	1,4%
	Revêtement	13.776	19,3%
	Total	71.342	100,0%

Tableau 7 : Emissions du volet Construction réparties selon les catégories de matériaux [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

L'ordre de grandeur des émissions par catégories de matériaux, en termes de proportion, reste similaire entre les scénarios. L'acier représente en la plus grande proportion (de l'ordre de 40-45%), suivi par le béton, pour environ 25-30%. Les revêtements (carrelages de sol et enduits de façade) représentent environ 20-25%. Les autres postes (fenêtres, isolation, membranes plastiques et plâtre) sont ensemble à l'origine d'environ 10% des émissions.

Il est important de souligner que les résultats sont très sensibles aux hypothèses posées pour les matériaux (voir *Point 2.2.1.2. Facteurs d'émission pour le volet 'Construction*), notamment dans le cas de l'acier, pour lequel des matériaux neufs ont été considérés. Le facteur d'émission peut être diminué de moitié dans le cas d'aciers comportant une partie de matériaux recyclés, en fonction de la proportion de ceux-ci⁶. Il en est de même pour le béton, dont le facteur d'émission dépend fortement du type de ciment (proportion de clinker). Il a été ici considéré un ciment de type CEM II, contenant 30% de cendres volantes⁷.

Les **émissions spécifiques**, rapportées à la surface plancher, sont représentées sur le graphique ci-dessous et reprises dans le tableau suivant, pour l'ensemble du cycle de vie.

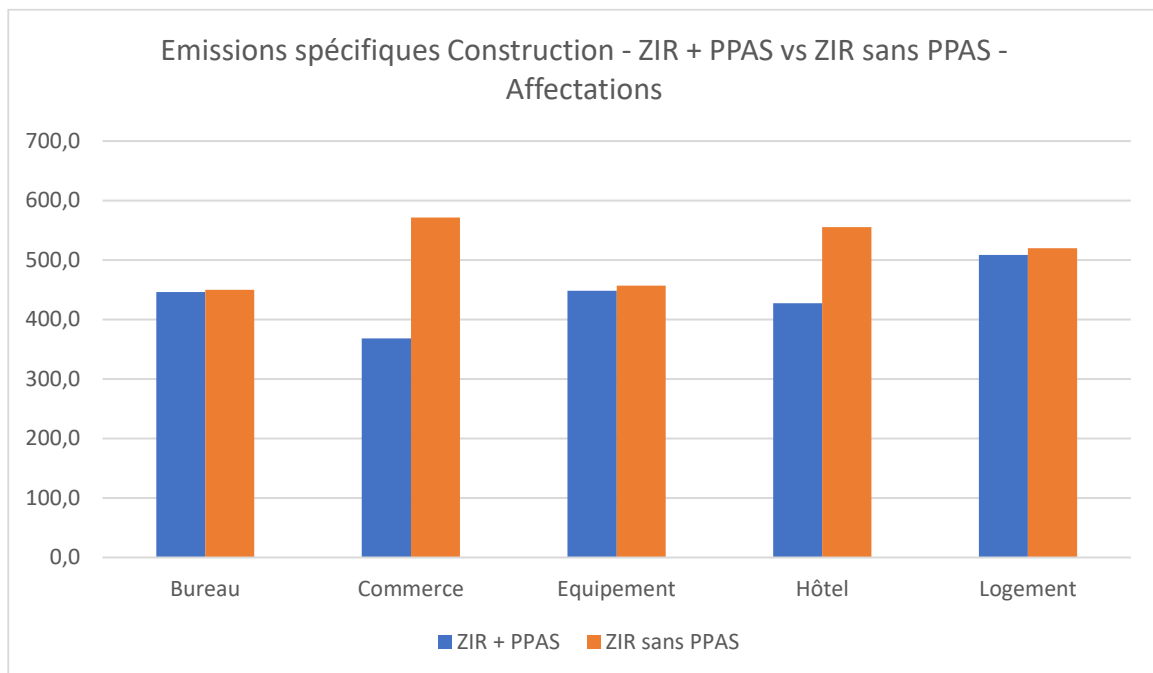


Figure 5 : Emissions spécifiques du volet Construction par affectation [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

⁶ Voir notamment la Base Carbone de l'ADEME, qui fournit un facteur d'émission pour l'acier neuf (2.211 kg CO₂ eq/tonne) et de l'acier recyclé (938 kgCO₂ eq/tonne), sans toutefois donner d'information sur le pourcentage d'acier recyclé.

⁷ Il s'agit donc d'un ciment comportant entre 50 et 64% de clinker, et donc d'un ciment « moyen ».

		Emissions totales [tCO ₂ eq/m ²]	Surface plancher – Constructives neuves [m ²]	Emissions spécifiques [kgCO ₂ eq/m ²]
ZIR + PPAS	Logement	59.522	117.000	508,7
	Equipement	29.084	68.026	427,5
	Bureau	5.943	13.252	448,5
	Commerce	64.033	174.000	368,0
	Hôtel	8.031	18.000	446,2
	Global	166.613	390.278	426,9
ZIR sans PPAS	Logement	40.452	77.825,4	519,8
	Equipement	10.427	18.786,5	555,0
	Bureau	3.554	7.782,5	456,7
	Commerce	9.908	17.333	571,6
	Hôtel	7.000	15.565,1	449,8
	Global	71.342	137.293	519,6

Tableau 8 : Emissions spécifiques sur le cycle de vie – Volet Construction (ARIES, 2023)

Les ordres de grandeur obtenus sont similaires d'une affectation à l'autre et d'un scénario à l'autre. Les différences entre ces derniers sont dues à la géométrie des bâtiments et la proportion entre les différents types de parois. Dans le cas des équipements et des commerces, les émissions spécifiques sont plus élevées dans le cas du scénario ZIR sans PPAS, du fait d'une plus grande proportion de surfaces horizontales (planchers, dalles de sol, toiture), pour lesquelles les facteurs d'émission spécifiques sont plus élevés.

A titre indicatif, dans le cas des logements, l'ordre de grandeur obtenu peut être comparé à l'exigence $I_{c,construction}$ de la réglementation thermique française RE 2020. Cette réglementation comprend en effet des exigences portant sur l'impact des projets en termes d'émissions de gaz à effet de serre, au contraire des législations régionales belges.

Pour les logements collectifs (dont le projet est, par hypothèse, totalement constitué), cet indicateur doit être inférieur à⁸ :

- 740 kg CO₂ eq/m² pour les constructions entre 2022 et 2024 ;
- 650 kg CO₂ eq/m² pour les constructions entre 2024 et 2027 ;
- 580 kg CO₂ eq/m² pour les constructions entre 2028 et 2030 ;
- 490 kg CO₂ eq/m² pour les constructions à partir de 2031.

Mentionnons que cet indicateur fait intervenir différents paramètres propres à la méthode de calcul adoptée (modulation des résultats en fonction de la localisation géographique, de la

⁸ Décret n° 2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine (publié au Journal Officiel de la République française le 31 juillet 2021).

présence de combles, ...). Il ne s'agit donc pas d'une comparaison absolue et stricte, mais d'une vérification générale quant à l'ordre de grandeur des valeurs obtenues.

L'ordre de grandeur correspond également à l'exigence dans le cas des bâtiments de bureaux ($I_{c,construction} \leq 980 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$ entre 2022 et 2024 et $\leq 590 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$ à partir de 2031)⁹.

Aucune exigence n'est actuellement fixée pour les autres affectations envisagées dans les programmes de la ZIR avec ou sans PPAS.

2.3. Volet Exploitation

2.3.1. Hypothèses

2.3.1.1. Principes de calcul

Comme précisé précédemment, l'évaluation consiste à déterminer des **consommations d'énergie finale**, qui sont par la suite converties en émissions de gaz à effet de serre. Différents jeux d'hypothèses sont dès lors à poser pour chaque affectation, en distinguant les constructions neuves et des constructions existantes maintenues, étant donné que la situation de départ peut être très différente entre ces deux ensembles (notamment en termes d'installations techniques ou de performances d'enveloppe). Etant donné ces spécificités, une méthodologie différenciée entre neuf et existant est en outre mise en place.

Une évolution temporelle de certains paramètres est également considérée, compte tenu de l'étendue du périmètre d'analyse adopté (60 ans) pendant laquelle des évolutions technologiques peuvent avoir lieu. Par ailleurs, les vecteurs énergétiques considérés sont le gaz et l'électricité. Des vecteurs énergétiques tels que le mazout ont en effet été négligés étant donné la grande proportion de constructions neuves pour lesquelles il ne sera pas fait recours à ce type de combustible.

Par conséquent, les hypothèses portent sur :

- Les **consommations finales spécifiques** (pour les bâtiments neufs) ou les **besoins spécifiques annuels en énergie** (pour les bâtiments existants), ainsi que leur répartition selon l'usage (chauffage, eau chaude sanitaire, refroidissement, autres usages du gaz et de l'électricité) et selon les vecteurs énergétiques ;
- Les **rendements des installations techniques**, pour lesquelles les suppositions suivantes sont faites :
 - Chauffage et eau chaude sanitaire :
 - Gaz : chaudières gaz à condensation ;
 - Electricité (hors géothermie) : pompes à chaleur de type air/eau ;
 - Electricité (géothermie) : pompes à chaleur de type eau/eau ;
 - Refroidissement : uniquement électricité ;
 - Autres usages :

⁹ Décret n° 2022-305 du 1^{er} mars 2022 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments de bureaux et d'enseignement primaire ou secondaire en France métropolitaine (publié au Journal Officiel de la République française le 3 mars 2022).

- Gaz (par exemple : cuisson) ;
- Electricité (éclairage, ventilation, électroménager, équipements de bureautique, ...).

Il est supposé que les installations techniques de tous les bâtiments sont remplacées en totalité tous les 20 ans. Trois périodes sont donc considérées sur la période d'analyse de 60 ans.

Dans le cas des bâtiments existants, le principe consiste à partir des consommations finales spécifiques issues de données régionales. Les données actuelles sont utilisées comme données de départ pour l'année 2031 (année 1). Ces consommations finales sont désagrégées selon les usages et les vecteurs énergétiques considérés. Les besoins spécifiques (par m² de surface plancher) correspondants sont ensuite calculés en appliquant les différents rendements des installations définis dans les hypothèses.

Cette méthodologie vise à pouvoir recalculer les consommations finales pour les années 2 et ultérieures en faisant varier les besoins ainsi obtenus, la répartition de ces besoins par usage, ainsi que les rendements.

Par hypothèse, les besoins spécifiques en énergie suivent une évolution linéaire décroissante jusqu'à une valeur donnée à une année donnée, puis une évolution constante pour les années ultérieures. La répartition de ces besoins entre vecteurs énergétiques suit quant à elle une évolution par paliers de 20 ans, suivant logiquement le remplacement des installations techniques. Les besoins sont convertis en consommations d'énergie finale, via les rendements des installations techniques qui évoluent également selon ces mêmes paliers.

La figure ci-dessous illustre de manière schématique la méthodologie adoptée pour les bâtiments existants.

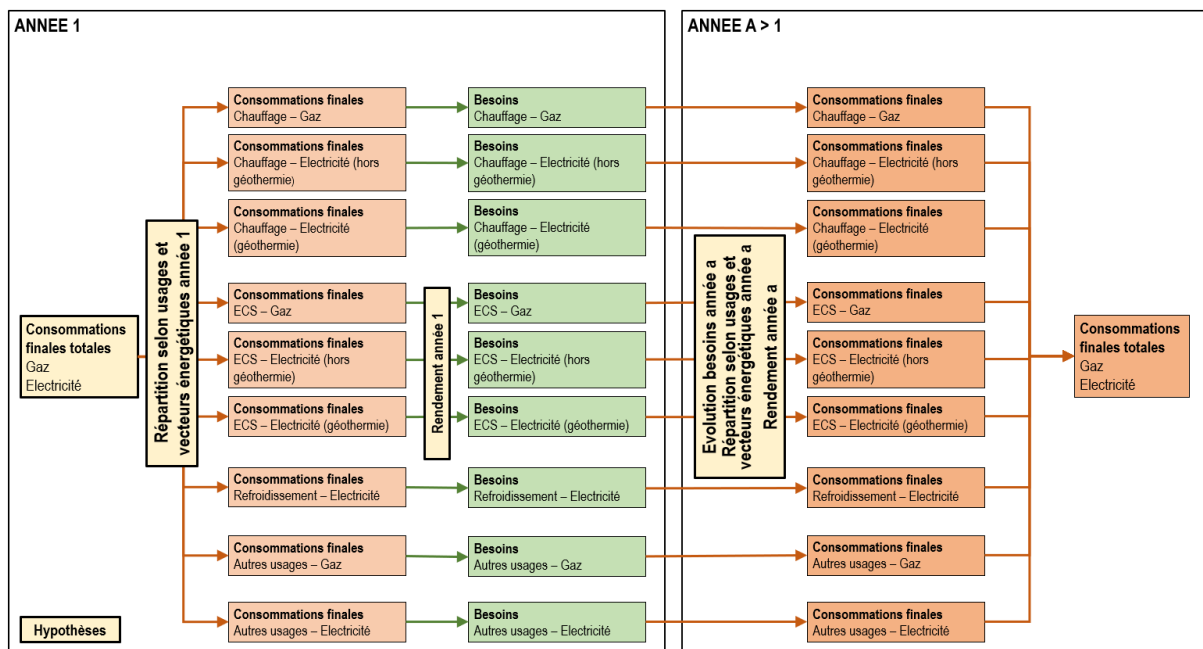


Figure 6 : Principe d'évaluation des consommations d'énergie finale – Bâtiments existants (ARIES, 2023)

Pour les bâtiments neufs, l'approche consiste à partir des besoins spécifiques et à déterminer les consommations d'énergie finales en appliquant les rendements correspondants. Comme

dans le cas des bâtiments existants, les besoins en énergie suivent une évolution linéaire décroissante jusqu'à une valeur donnée à une année donnée, puis une évolution constante pour les années ultérieures. De même, la répartition de ces besoins entre vecteurs énergétiques, ainsi que les rendements des installations techniques, suivent une évolution par paliers de 20 ans, suivant logiquement le remplacement de ces dernières.

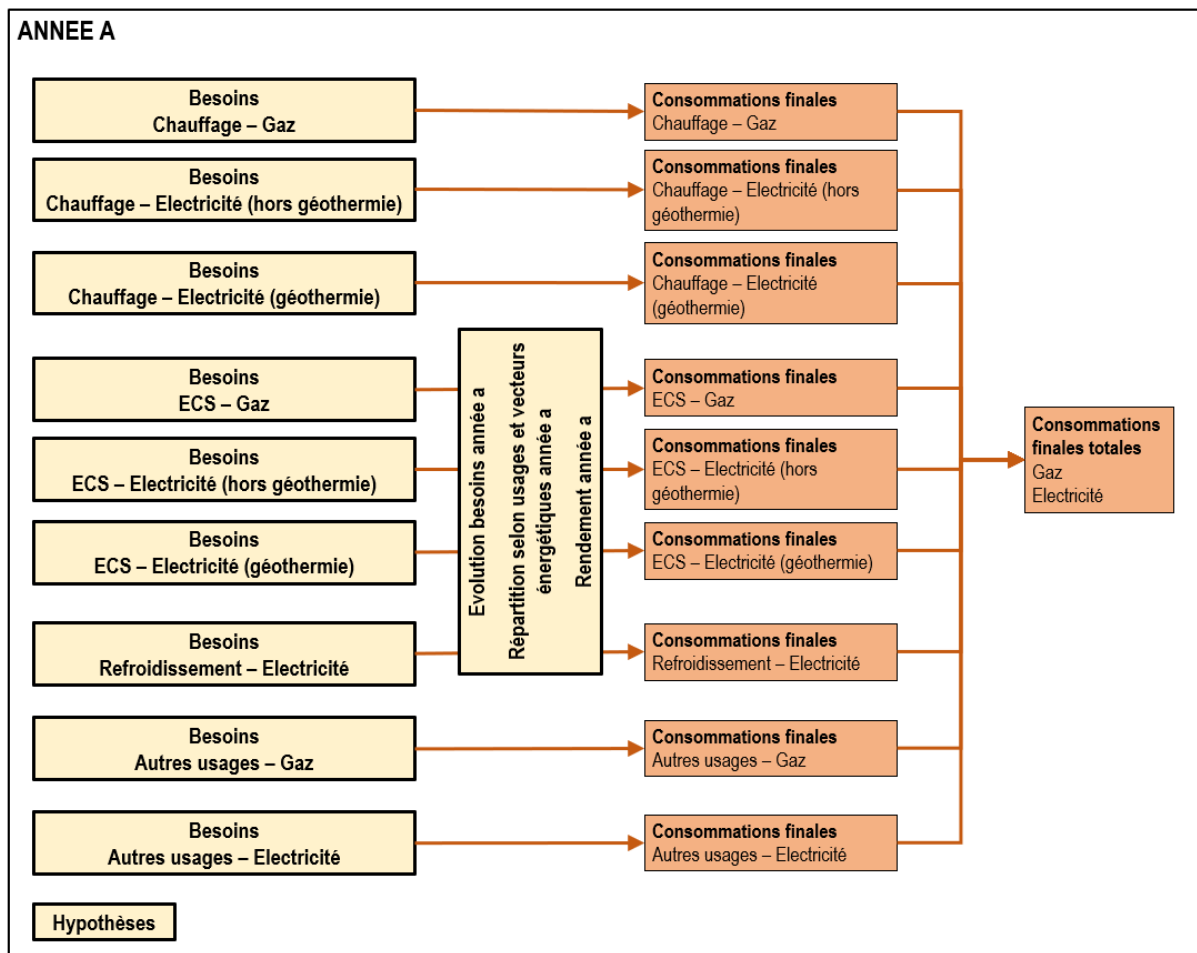


Figure 7 : Principe d'évaluation des consommations d'énergie finale – Bâtiments neufs (ARIES, 2023)

Dans le cas des bâtiments neufs, pour lesquels la marge de manœuvre est plus importante, la **production locale d'électricité** à l'aide de panneaux photovoltaïques peut en outre être prise en compte.

Enfin, dans le cas du stade Roi Baudouin, les émissions de gaz à effet de serre sont calculées à partir de données de consommations finales annuelles réelles, respectivement pour le gaz et l'électricité. Les hypothèses consistent à les convertir en besoins en appliquant des rendements d'installations, puis à appliquer une clef de répartition de ces besoins selon les usages pour l'année 1. Le raisonnement est similaire à celui suivi pour les autres bâtiments existants : les consommations d'énergie finales des années ultérieures sont calculées en repartant des besoins dont l'ampleur et la répartition varient, et en y appliquant des rendements d'installations s'améliorant après une période de 20 ans.

2.3.1.2. Valeurs considérées pour la détermination des données d'activité

A. Bâtiments existants (hors stade Roi Baudouin)

Les **consommations d'énergie finale spécifiques** considérées pour les bâtiments existants (à l'exception du stade Roi Baudouin) pour l'année 1 (2031) sont, par hypothèse, égales aux valeurs actuelles :

- Pour le résidentiel : les consommations finales sont déterminées sur base :
 - De l'intensité énergétique des ménages bruxellois¹⁰, à savoir les consommations d'énergie finale de combustibles et d'électricité ;
 - De la superficie moyenne brute d'un logement en Région de Bruxelles-Capitale, considérée de 100 m².

Par hypothèse, les ménages sont ici assimilés aux logements.

Le tableau ci-dessous reprend les intensités énergétiques des ménages bruxellois pour les années 2015 à 2020, les valeurs moyennes considérées, ainsi que les consommations d'énergie finale spécifiques déduites de ces moyennes et de la superficie moyenne mentionnée ci-dessus.

	Intensité énergétique Moyenne 2015-2020 [kWh/ménage]	Consommations finales spécifiques [kWh/m ²]
Combustibles	10.947	110
Electricité	2.610	26

Tableau 9 : Intensité énergétique et consommations d'énergie finale spécifiques (ARIES d'après Bruxelles Environnement, 2023)

- Pour les affectations non résidentielles : les consommations d'énergie finale spécifiques sont reprises d'une étude sur les consommations d'énergie dans le secteur tertiaire en Région de Bruxelles-Capitale par l'ICEDD¹¹, reprises dans le tableau ci-dessous.

¹⁰ « L'intensité énergétique d'un secteur d'activité correspond au rapport entre la quantité d'énergie consommée et une variable représentative du niveau d'activité de ce secteur. [...] Au niveau des ménages, l'unité de consommation est le ménage lui-même. L'intensité énergétique sera donc déterminée par rapport à ceux-ci. » (Source : Bruxelles Environnement)

¹¹ ICEDD (2021). *Etude sur les consommations énergétiques spécifiques du secteur tertiaire – Rapport final*

	Consommations finales spécifiques	
	Gaz [kWh/m ²]	Electricité [kWh/m ²]
Equipement*	125	60
Bureau	85	85
Commerce**	78	130
Hôtel	60	117

* Valeur « moyenne » évaluée à partir des consommations relatives aux théâtres et centres culturels, ainsi que les crèches.

** Hors supermarchés.

Tableau 10 : Consommations d'énergie finale spécifiques pour les affectations autres que le logement (ARIES d'après ICEDD, 2023)

En termes de **désagrégation** (répartition) **des consommations d'énergie finale spécifiques** selon les usages et les vecteurs énergétiques pour le démarrage des calculs à l'année 1, les valeurs suivantes considérées sont reprises dans le tableau ci-dessous.

	Désagrégation selon l'usage					Vecteur énergétique					
	Logement	Equipement	Bureau	Commerce	Hôtel		Logement	Equipement	Bureau	Commerce	Hôtel
Chauffage	65%	55%	45%	40%	25%	► Gaz	95%	95%	95%	95%	70%
						► Electricité (hors géothermie)	5%	5%	5%	5%	30%
						► Electricité (géothermie)	0%	0%	0%	0%	0%
ECS	15%	5%	5%	5%	15%	► Gaz	85%	100%	100%	75%	100%
						► Electricité (hors géothermie)	15%	0%	0%	25%	0%
						► Electricité (géothermie)	0%	0%	0%	0%	0%
Refroidissement	0%	5%	5%	10%	10%	► Electricité	100%	100%	100%	100%	100%
Autres usages du gaz	5%	0%	0%	0%	20%	► Gaz	100%	100%	100%	100%	100%
Autres usages de l'électricité	15%	35%	45%	45%	30%	► Electricité	100%	100%	100%	100%	100%

Tableau 11 : Désagrégation des consommations d'énergie finale spécifiques selon les usages et les vecteurs énergétiques – Bâtiment existants – Année 1 (ARIES, 2023)

Pour le résidentiel, la répartition entre usages est déterminée sur base des données fournies dans le bilan énergétique de la Région de Bruxelles-Capitale de 2020¹².

Pour les autres affectations, les répartitions sont déterminées sur base des données fournies dans l'étude sur le potentiel d'efficacité en matière de chaleur et de froid en Région de Bruxelles-Capitale de l'ICEDD¹³.

En ce qui concerne la **répartition des besoins par vecteur énergétiques** (dans le cas du chauffage et de l'eau chaude sanitaire), dans le cas de l'année 1, les proportions sont calculées à partir des besoins directement déduits des consommations finales désagrégées auxquels les différents rendements des installations techniques ont été appliqués. Par hypothèse, cette répartition est conservée jusqu'au premier remplacement des installations, après 20 ans. Lors de celui-ci, ainsi que lors du second remplacement 20 ans plus tard, la répartition entre vecteurs énergétiques est fixée par hypothèse. A titre de simplification, après ce premier remplacement, cette répartition est supposée identique quelle que soit l'affectation et qu'il s'agisse du chauffage ou de l'eau chaude sanitaire. Les valeurs considérées sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Période	Gaz	Electricité (hors géothermie)	Electricité (géothermie)
1 (2031-2050)	Proportions déduites selon les besoins calculés à l'année 1		
2 (2051-2070)	20%	60%	20%
3 (2071-2090)	10%	60%	30%

Tableau 12 : Répartition des besoins entre les vecteurs énergétiques – Toutes affectations – Chauffage et eau chaude sanitaire (ARIES, 2023)

Comme indiqué précédemment, les besoins spécifiques suivent dans un premier temps une évolution se traduisant par une diminution linéaire jusqu'à une année « cible » puis par une évolution constante :

- Dans le cas du chauffage, il est considéré que les besoins à l'horizon 2050 seront diminués de 50% par rapport à 2031. Cette diminution est également de 50% dans le cas de l'eau chaude sanitaire. Ces réductions devraient être dues à des rénovations énergétiques et à une diminution de la demande (sobriété, ...).
- Pour le refroidissement et les autres usages, aucune diminution des besoins n'est en revanche considérée. Dans le cas du refroidissement, une meilleure performance de l'enveloppe des bâtiments permettant de mieux lutter contre la surchauffe pourrait en effet être contrebalancée par l'augmentation des températures du fait du changement climatique. Dans le cas des usages de l'électricité, tels que les

¹² Répartition de la consommation finale énergétique en Région bruxelloise par secteur et type d'usage basé sur le Bilan énergétique régional 2020 (version v2020.2.3-2.2) (disponible sur le site de Bruxelles Environnement : <https://environnement.brussels/citoyen/outils-et-donnees/etat-des-lieux-de-lenvironnement/energie-etat-des-lieux> (consulté en février 2023).

Chauffage : 65,5% - ECS : 14,6% - Equipement électrique : 16,2% - Cuisson : 3,8%

¹³ ICEDD (2021). *Potentiel d'efficacité en matière de chaleur et de froid en Région de Bruxelles-Capitale*

appareils électroménagers, ..., une meilleure efficacité des équipements pourrait être compensée par un plus grand nombre d'appareils.

Enfin, les **rendements¹⁴ considérés pour les installations techniques** sont repris dans le tableau suivant, pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (rendements supposés identiques, à titre de simplification). A titre de simplification, le rendement global est ici considéré égal au produit de rendements des productions, de distribution, d'émission et de régulation.

Période	Gaz				
	Production	Distribution	Emission	Régulation	Global
1 (2031-2050)	90%	85%	90%	85%	59%
2 (2051-2070)	105%	98%	98%	95%	96%
3 (2071-2090)	105%	98%	98%	95%	96%
	Electricité (hors géothermie)				
	Production	Distribution	Emission	Régulation	Global
1 (2031-2050)	300%	85%	90%	85%	195%
2 (2051-2070)	300%	98%	98%	95%	274%
3 (2071-2090)	300%	98%	98%	95%	274%
	Electricité (géothermie)				
	Production	Distribution	Emission	Régulation	Global
1 (2031-2050)	450%	85%	90%	85%	293%
2 (2051-2070)	450%	98%	98%	95%	411%
3 (2071-2090)	450%	98%	98%	95%	411%

Tableau 13 : Rendements des installations techniques – Chauffage et eau chaude sanitaire – Toutes affectations – Bâtiments existants (ARIES, 2023)

Pour la période 1, les rendements de production correspondent :

- Pour le gaz : à une chaudière gaz (sans condensation, 90%) ;
- Pour l'électricité (hors géothermie) : à une pompe à chaleur air/eau, dont le COP¹⁵ est de 3 ;
- Pour l'électricité (géothermie) : à une pompe à chaleur eau/eau, dont le COP est de 4,5.

Pour les périodes ultérieures, il est considéré :

¹⁴ Rapport entre l'énergie utile fournie (chauffage, refroidissement, ...) par une installation technique et l'énergie que celle-ci consomme pour assurer le service qu'elle doit rendre.

¹⁵ Coefficient de performance.

- Pour le gaz : à une chaudière gaz à condensation, dont le rendement de production est de 105%. Les rendements de distribution, d'émission et de régulation sont également améliorés ;
- Pour l'électricité (hors géothermie) : à une pompe à chaleur air/eau, dont le COP reste de 3. Les rendements de distribution, d'émission et de régulation sont toutefois améliorés ;
- Pour l'électricité (géothermie) : à une pompe à chaleur eau/eau, dont le COP reste de 4,5. Les rendements de distribution, d'émission et de régulation sont ici également améliorés.

Pour le refroidissement, les rendements sont repris dans le tableau suivant.

Période	
1 (2031-2050)	200%
2 (2051-2070)	400%
3 (2071-2090)	400%

Tableau 14 : Rendements des installations techniques – Refroidissement – Toutes affectations – Bâtiments existants (ARIES, 2023)

Les rendements considérés pour les autres usages (gaz et électricité) sont considérés égaux à 100%.

B. Bâtiments neufs

Les valeurs considérées pour les besoins spécifiques annuels (kWh/m²) sont reprises dans le tableau ci-dessous. Pour le chauffage, les valeurs sont fixées sur base de l'exigence PEB portant sur les besoins nets de chauffage pour les unités Habitations individuelles. La réglementation ne fournissant pas d'équivalent pour les autres affectations, il est supposé que ces besoins sont identiques pour toutes les affectations. Pour le refroidissement ainsi que pour les autres usages du gaz et de l'électricité, les valeurs calculées pour les bâtiments existants sont considérées. Il est en effet considéré que les consommations, notamment liées à la cuisson des aliments ou aux équipements électriques (électroménager, bureautique, ...) sont indépendantes du fait qu'elles sont relatives à des bâtiments existants ou neufs.

	Chauffage	Eau chaude sanitaire	Refroidissement	Autres usages Gaz	Autres usages Electricité
Logement	15	20	0	Idem bâtiments existants	
Equipement	15	5		Idem bâtiments existants	
Bureau	15	10		Idem bâtiments existants	
Commerce	15	10		Idem bâtiments existants	
Hôtel	15	10		Idem bâtiments existants	

Tableau 15 : Besoins d'énergie spécifiques – Toutes affectations – Bâtiments neufs – Refroidissement [kWh/m²] (ARIES, 2023)

Comme pour les bâtiments existants, les besoins spécifiques suivent dans un premier temps une évolution se traduisant par une diminution linéaire jusqu'à une année « cible » puis par une évolution constante :

- Dans le cas du chauffage, il est considéré que les besoins à l'horizon 2050 seront diminués de 20% par rapport à 2031. Cette diminution est également de 20% dans le cas de l'eau chaude sanitaire. Cette réduction est plus faible que dans le cas des bâtiments existants, étant donné la performance plus importante de ceux-ci lors de leur conception.
- Pour le refroidissement et les autres usages, aucune diminution des besoins n'est en revanche considérée, pour les mêmes raisons que pour les bâtiments existants.

Enfin, les **rendements considérés pour les installations techniques** sont repris dans le tableau suivant, pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (rendements supposés identiques, à titre de simplification).

Période	Gaz				
	Production	Distribution	Emission	Régulation	Global
1 (2031-2050)	105%	98%	98%	95%	96%
2 (2051-2070)	105%	98%	98%	95%	96%
3 (2071-2090)	105%	98%	98%	95%	96%
	Electricité (hors géothermie)				
	Production	Distribution	Emission	Régulation	Global
1 (2031-2050)	300%	98%	98%	95%	274%
2 (2051-2070)	300%	98%	98%	95%	274%
3 (2071-2090)	300%	98%	98%	95%	274%
	Electricité (géothermie)				
	Production	Distribution	Emission	Régulation	Global
1 (2031-2050)	450%	98%	98%	95%	411%
2 (2051-2070)	450%	98%	98%	95%	411%
3 (2071-2090)	450%	98%	98%	95%	411%

Tableau 16 : Rendements des installations techniques – Chauffage et eau chaude sanitaire – Toutes affectations – Bâtiments neufs (ARIES, 2023)

En l'absence de tendance claire à long terme, aucune évolution technologique n'est considérée pour les bâtiments neufs. Il s'agit de ce fait d'hypothèses conservatrices.

Quelles que soient les périodes, les rendements de production correspondent :

- Pour le gaz : à une chaudière gaz à condensation, dont le rendement de production est de 105%. Les rendements de distribution, d'émission et de régulation sont également améliorés ;

- Pour l'électricité (hors géothermie) : à une pompe à chaleur air/eau, dont le COP reste de 3.
- Pour l'électricité (géothermie) : à une pompe à chaleur eau/eau, dont le COP reste de 4,5.

Pour le refroidissement, les rendements sont repris dans le tableau suivant.

Période	
1 (2031-2050)	400%
2 (2051-2070)	400%
3 (2071-2090)	400%

Tableau 17 : Rendements des installations techniques – Refroidissement – Toutes affectations – Bâtiments existants (ARIES, 2023)

Les rendements considérés pour les autres usages (gaz et électricité) sont considérés égaux à 100%.

L'**installation de panneaux photovoltaïques** est prise en compte au travers des paramètres suivants :

- Surface de panneaux nécessaire pour produire 1 kWc : 8 m² ;
- Production par kWc installé : 900 kWh/kWc ;
- Facteur de correction pour tenir compte du fait que la position des panneaux s'écarte de la position idéale¹⁶) : 0,90 ;
- Proportion de toitures équipées : 75% (afin de tenir compte des impossibilités dues à l'ombrage).

Par hypothèse conservatrice, aucune évolution technologique n'est considérée sur la période d'analyse : la surface de panneaux nécessaires pour produire 1 kWc reste de 8 m².

C. Stade Roi Baudouin

En situation existante, les **consommations finales annuelles réelles** sont :

- Pour le gaz : 1.863.110 kWh ;
- Pour l'électricité : 1.693.680 kWh.

Les **rendements considérés pour les installations techniques** sont, par hypothèse, identiques à ceux considérés pour les autres bâtiments existants (voir *Point 2.3.1.2.A. Bâtiments existants (hors stade Roi Baudouin)*).

Les hypothèses relatives à la répartition des besoins selon les vecteurs énergétiques sont reprises dans le tableau ci-dessous.

¹⁶ La position idéale correspond à une orientation sud et à une inclinaison de 35°. Il est ici considéré des panneaux posés horizontalement à titre de simplification (pas d'ombrage des panneaux les uns sur les autres).

Période	Gaz	Electricité	Géothermie
1 (2031-2050)	90%	10%	0%
2 (2051-2070)	30%	70%	0%
3 (2071-2090)	10%	90%	0%

Tableau 18 : Répartition des besoins entre les vecteurs énergétiques – Chauffage et eau chaude sanitaire – Stade Roi Baudouin (ARIES, 2023)

Les émissions sont calculées à partir de données de consommations finales réelles, respectivement pour le gaz et l'électricité. Les hypothèses consistent à les convertir en besoins en appliquant des rendements d'installations, puis à appliquer une clef de répartition de ces besoins selon les usages pour l'année 1. Le raisonnement est similaire à celui suivi pour les autres bâtiments existants : les consommations d'énergie finales des années ultérieures sont calculées en repartant des besoins dont l'ampleur et la répartition varient, et en y appliquant des rendements d'installations s'améliorant après une période de 20 ans.

2.3.1.3. Facteurs d'émission pour le volet 'Exploitation'

Les facteurs d'émission considérés sont les suivants :

- Pour le gaz : 0,200 kgCO₂ eq/kWh¹⁷ ;
- Pour l'électricité (réseau) : 0,350 kgCO₂ eq/kWh¹⁸ ;
- Pour l'électricité (photovoltaïque) : 0,041 kgCO₂ eq/kWh¹⁹.

Les facteurs d'émission sont supposés constants sur l'ensemble de la période d'analyse²⁰.

2.3.2. Résultats

Le graphique ci-dessous reprend les émissions globales pour le volet Exploitation, selon les vecteurs énergétiques (gaz et électricité), sur l'ensemble de la durée d'analyse (60 ans), respectivement pour les scénarios avec et sans PPAS. Ces émissions sont exprimées en tonnes équivalent CO₂. La présence de panneaux photovoltaïques (sur les toitures des bâtiments neufs) est considérée sur le graphique de gauche et ne l'est pas sur le graphique de droite.

¹⁷ ICEDD (2021). *Update of the impact assessment of federal Policies and Measures*

¹⁸ Ibidem

¹⁹ Valeur moyenne pour les panneaux photovoltaïques en toiture, fournie par le GIEC (dans l'annexe III de l'assessment report 5 – Technology-specific Cost and Performance Parameters)

²⁰ Pour l'électricité, les projections de l'étude de l'ICEDD ne prévoient qu'une évolution très marginale : 0,340 kgCO₂ eq/kWh en 2040, contre 0,350 kgCO₂ eq/kWh dès 2026.

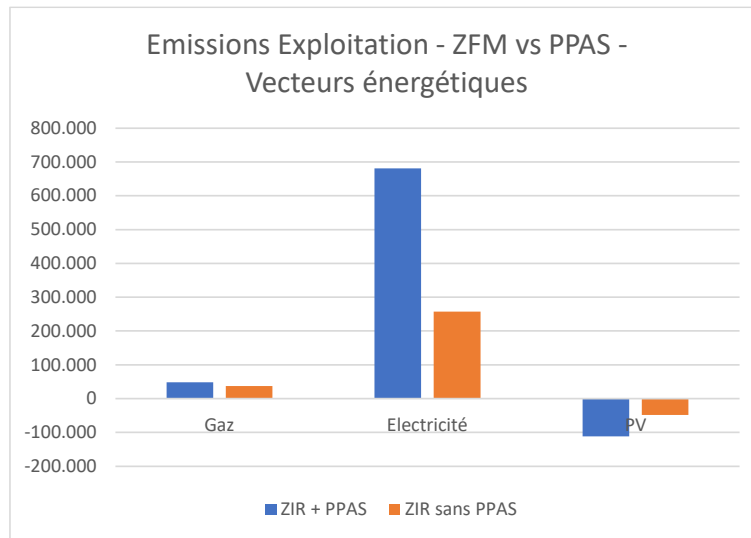


Figure 8 : Emissions du volet Exploitation réparties selon les vecteurs énergétiques sur l'ensemble de la durée d'analyse – Avec PV (à gauche) et sans PV (à droite) [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

Le tableau ci-dessous reprend également les émissions par vecteur énergétique. Les émissions évitées par l'installation de panneaux photovoltaïques (PV) y sont également indiquées.

Scénario	Gaz	Electricité	Total (sans PV)	PV	Total avec PV
ZIR + PPAS	48.474	680.579	729.054	-111.706	617.348
	7%	93%	100%	-15%	85%
ZIR sans PPAS	36.931	257.638	294.569	-47.830	246.739
	13%	87%	100%	-16%	84%

Tableau 19 : Emissions du volet Exploitation réparties selon les vecteurs énergétiques sur l'ensemble de la durée d'analyse [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

Ces proportions s'expliquent par l'évolution supposée des besoins en gaz et électricité au profit de cette dernière. Les hypothèses posées précédemment consistent en effet à considérer une diminution nette des besoins en gaz. La production locale d'électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques horizontaux sur 75% de la surface des toitures des bâtiments neufs conduit à une diminution de l'ordre de 15% des émissions totales liées aux consommations d'énergie.

En termes d'**évolution temporelle** des émissions, les graphiques ci-dessous montrent, respectivement pour les scénarios avec et sans PPAS, des diminutions des émissions totales d'environ 7% et de 18% à l'horizon 2090 par rapport à 2031 (en ne considérant pas la pose de panneaux photovoltaïques). Ces diminutions sont pratiquement totalement dues aux émissions liées aux consommations de gaz, qui, selon les hypothèses posées, diminuent de 62% dans le cas du scénario ZIR avec PPAS et de 71% dans le cas du scénario ZIR sans PPAS.

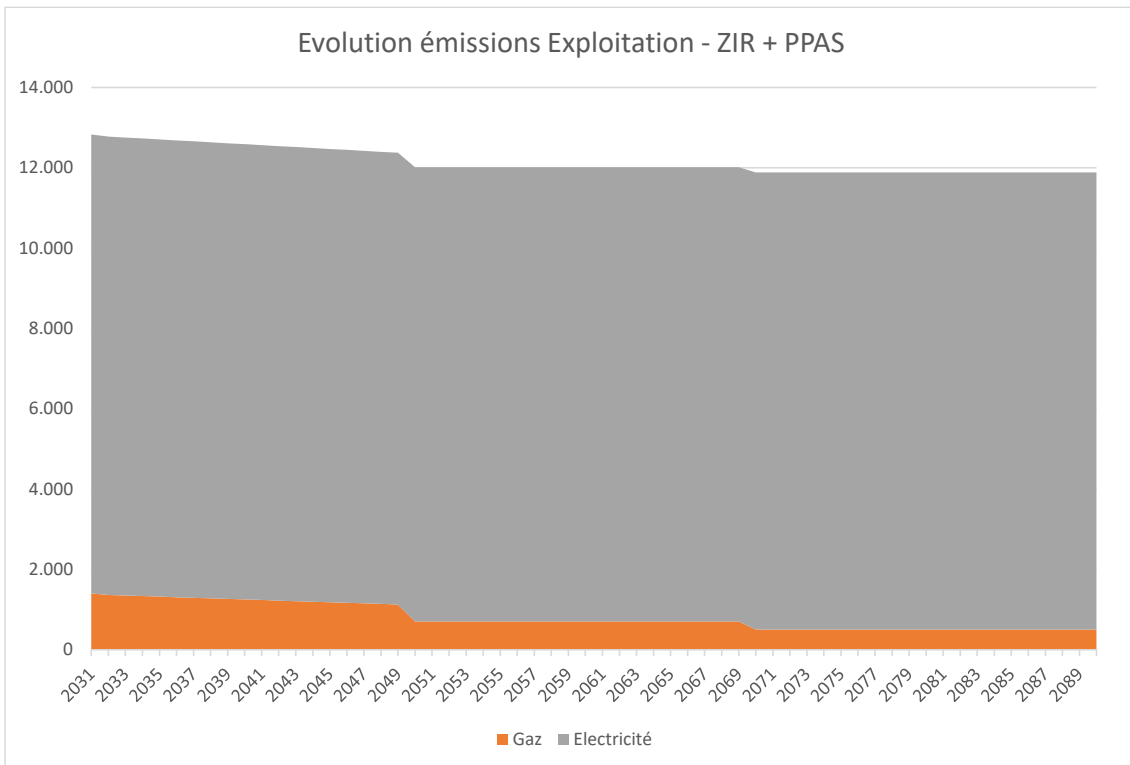


Figure 9 : Evolution des émissions liées aux consommations d'énergie sur la période d'analyse 2031-2090 – Scénario ZIR + PPAS [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

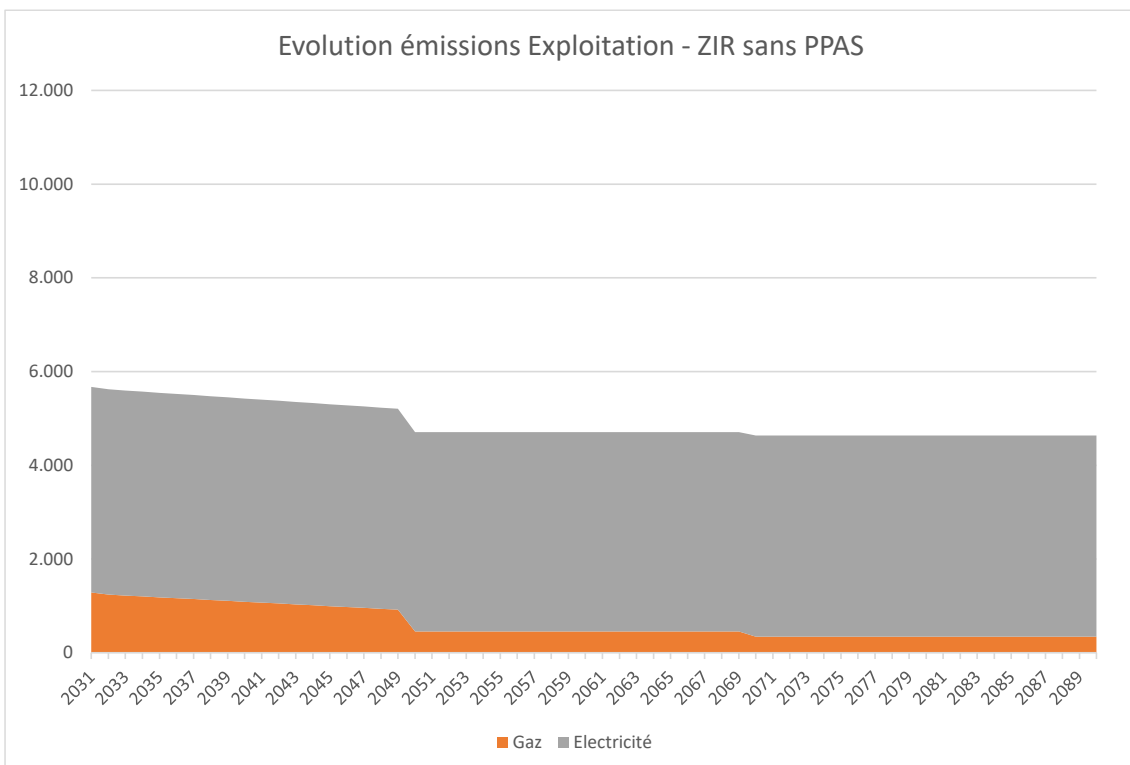


Figure 10 : Evolution des émissions liées aux consommations d'énergie sur la période d'analyse 2031-2090 – Scénario ZIR sans PPAS [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

La très faible évolution des émissions dues aux consommations d'électricité s'explique par le fait qu'il est supposé que le recours au gaz diminue drastiquement à l'avenir et est compensé par une augmentation de l'utilisation de l'électricité. Il est en outre supposé que les besoins en électricité (notamment pour les usages qui y sont exclusivement liés, tels que les appareils électroménagers, ...) ne connaissent pas de diminution au cours de la période d'analyse.

Les sauts de paliers visibles en 2050 et 2070 sont liés au remplacement des installations techniques, effectués par hypothèse tous les 20 ans (augmentation des rendements) et à la modification de la répartition des besoins en énergie selon les vecteurs énergétiques et les usages (voir *Point 2.3.1. Hypothèses*).

Les **émissions spécifiques**, rapportées à la surface plancher, sont les suivantes, pour l'ensemble du cycle de vie. Une distinction entre constructions existantes et neuves doit être faite, étant donné les différences en termes de performances énergétiques. Du fait que les hypothèses sont identiques pour les deux scénarios, les émissions spécifiques le sont également. Aussi, seuls les résultats pour le scénario ZIR avec PPAS sont repris ci-dessous, à l'exception des résultats globaux, dépendant, eux, des surfaces plancher.

		Existant			Neuf		
		Emissions totales (gaz + électricité) [tCO ₂ eq/m ²]	Surface plancher [m ²]	Emissions totales (gaz + électricité) [kgCO ₂ eq/m ²]	Emissions totales (gaz + électricité) [tCO ₂ eq/m ²]	Surface plancher [m ²]	Emissions totales (gaz + électricité) [kgCO ₂ eq/m ²]
ZIR + PPAS	Logement	0	0	-	84.225	117.000	719.9
	Equipement	5.205	2.980	1.747	84.413	68.026	1.241
	Bureau	0	0	-	23.751	13.252	1.792
	Commerce	8.517	3.000	2.839	437.241	174.000	2.707
	Hôtel	0	0	-	40.576	18.000	2.254
	Stade	45.126	28.820	1.566	0	-	-
	Global	58.848	34.800	1.691	670.206	390.278	1.717
ZIR sans PPAS	Global	122.614	57.271	2.141	171.928	137.293	1.252

Tableau 20 : Emissions spécifiques sur la durée d'analyse – Volet Exploitation (ARIES, 2023)

Les ordres de grandeur sont globalement similaires d'une affectation à l'autre, les logements se distinguant cependant par des émissions spécifiques inférieures, dues à des consommations finales plus faibles. Une faible différence est à pointer entre les bâtiments existants et neufs pour les commerces. Celle-ci s'explique par le poids important des consommations d'électricité qui ne diminuent pas pendant la durée d'analyse et pour lesquelles les besoins sont supposés, par hypothèse, rester constants (refroidissement et autres usages de l'électricité, voir *Point 2.3.1.2. Valeurs considérées pour la détermination des données d'activité*).

Il est également possible de comparer de manière indicative, dans le cas des bâtiments résidentiels, les émissions spécifiques obtenues à l'exigence I_c , énergie de la réglementation

thermique française, devant être inférieures à (dans le cas des logements collectifs non raccordés à un réseau de chaleur urbain) :

- 560 kg CO₂ eq/m² pour les constructions entre 2022 et 2024 ;
- 260 kg CO₂ eq/m² pour les constructions entre 2024 et 2027 ;
- 260 kg CO₂ eq/m² pour les constructions à partir de 2028.

Les valeurs obtenues dans le cadre du présent bilan carbone sont supérieures à ces valeurs, ce qui peut s'expliquer à leur établissement tenant compte des spécificités du contexte français (différences en termes de mix énergétique, ...). La durée de vie considérée dans cette réglementation est en outre de 50 ans et non pas de 60 ans. Ajoutant enfin le fait d'une importante incertitude liée à l'évolution des différents paramètres sur base desquels les émissions sont calculées, l'ordre de grandeur obtenu pour ces dernières peut néanmoins être validé.

La même constatation peut être tirée dans le cas des bureaux. Aucune exigence n'est actuellement fixée pour les autres affectations envisagées dans les programmes de la ZIR + PPAS ou de la ZIR sans PPAS.

2.4. Volet Mobilité

2.4.1. Hypothèses

2.4.1.1. Principes de calcul

La méthodologie consiste à déterminer les passagers.km (pour les transports en commun) ou les véhicules.km (pour les voitures individuelles, les taxis, les vélos électriques) afin de les convertir en émissions de gaz à effet de serre via les facteurs d'émission.

Le nombre de passagers.km d'un mode donné sont déterminés selon l'équation suivante.

$$n_{pkm,mode} = p_{mode} \cdot n_{déplacements,tot,mode} \cdot \sum_{i=1}^n p_{d,i,mode} \cdot C_{d,i,mode}$$

Dans laquelle :

- $n_{pkm,mode}$: passagers.km pour le mode considéré ;
- p_{mode} : part modale du mode considéré ;
- $n_{déplacements,tot,mode}$: nombre de déplacements total pour le mode considéré ;
- $p_{d,i,mode}$: proportion des déplacements effectués sur une distance située dans une classe de distances donnée, pour le mode considéré ;
- $C_{d,i,mode}$: centre de classe de distances (par exemple, pour la classe de distance [10-20 km] : 15 km) ;
- n : nombre de classes de distances.

Le principe est de considérer les distances parcourues ($C_{d,i,mode}$) par le biais de classes de distances, entre lesquelles les déplacements d'un mode considéré ($p_{d,i,mode} \cdot n_{déplacements,tot,mode}$) sont répartis (au travers des pourcentages $p_{d,i,mode}$).

Les modes de transport « globaux » considérés sont la voiture particulière, le taxi, le car, les transports en commun, le vélo et la marche. Certains de ces modes présentent des sous-catégories selon le type ou la motorisation, tel que repris dans le tableau ci-dessous.

Mode « global »	Sous-catégorie
Voiture particulière	Diesel
	Essence
	Electricité
	Autres
Taxi	Electricité
	Thermique
Transports en commun	Méto
	Tram
	Bus
Vélo	Electricité
	Normal

Tableau 21 : Modes de transport « globaux » et sous-catégories correspondantes considérées (ARIES, 2023)

Etant donné le périmètre temporel de l'analyse de 60 ans, des évolutions temporelles sont prises en compte au travers de valeurs « cibles » aux horizons 2030 et 2050 définies pour :

- Les parts modales par mode de transport « global » (p_{mode}) ;
- Le nombre total de déplacements ($n_{déplacements,tot,mode}$) ;
- La répartition du nombre de déplacements par classe de distances ($p_{d,i,mode}$).

Ces grandeurs permettent de calculer un nombre de passagers.km pour ces horizons 2030 et 2050. Une évolution linéaire est considérée entre ceux-ci. Du fait de la grande incertitude de la mobilité de manière générale, une évolution constante est ensuite supposée pour les années postérieures.

Les passagers.km obtenus pour les modes « globaux » sont ensuite répartis entre les sous-catégories de modes (en particulier en ce qui concerne la motorisation des voitures particulières ou les transports en commun), via des parts modales définies pour ces dernières. Ces parts modales évoluent également dans le temps.

2.4.1.2. Valeurs considérées pour la détermination des données d'activité

Les **parts modales considérées pour les différents modes « globaux »** (p_{mode}) sont reprises dans le tableau ci-dessous. Les parts modales sont supposées identiques pour les scénarios avec et sans PPAS.

Mode « global »	2023	2030	2050
Voiture particulière – Conducteur	33%	24%	12%
Voiture particulière – Passager	15%	15%	20%
Taxi	1%	3%	5%
Transports en commun	32%	32%	32%
Vélo	4%	12%	17%
Marche	15%	14%	14%
Total	100%	100%	100%

Tableau 22 : Parts modales pour les modes de transport « globaux » (ARIES, 2023)

L'évolution de la part modale « Voiture particulière – Conducteur » en 2030 est issue du plan Good Move²¹.

Le **nombre de déplacements totaux hebdomadaires par mode global** ($n_{\text{déplacements,tot,mode}}$) en situation existante (2023) est donné dans le tableau suivant, pour chaque scénario. Par hypothèse, il ne varie pas jusqu'en 2030. Il subit ensuite une décroissance linéaire, pour atteindre 75% de sa valeur de 2030 à l'horizon 2050. Bien que cela puisse conduire à une surestimation des déplacements, les résultats annuels sont simplement déduits en multipliant les résultats hebdomadaires par 52, dans un souci de simplification et de ne pas multiplier les hypothèses.

Mode « global »	ZIR + PPAS			ZIR sans PPAS		
	2023	2030	2050	2023	2030	2050
Voiture particulière – Conducteur	223.746	162.724	61.022	80.675	58.673	22.002
Voiture particulière – Passager	101.703	101.703	101.703	36.670	36.670	36.670
Taxi	6.780	20.341	25.426	2.445	7.334	9.168
Transports en commun	216.965	216.965	162.724	78.230	78.320	58.673
Vélo	27.121	81.362	86.447	9.779	29.336	31.170
Marche	101.703	94.922	71.192	36.670	34.226	25.669
Total	678.017	678.017	508.513	244.469	244.469	183.352

Tableau 23 : Nombre de déplacements totaux hebdomadaires par mode « global » - Scénarios ZIR avec PPAS et ZIR sans PPAS (ARIES, 2023)

Les **classes de distances parcourues**, ainsi que les **proportions de déplacements effectués dans chacun d'elles** sont reprises dans le tableau ci-dessous, pour chaque scénario. Il est supposé qu'elles ne varient pas sur la période d'analyse.

²¹ Bruxelles Mobilité (2021). *Plan régional de mobilité 2020-2030. Plan stratégique et opérationnel*

Signalons que le « mode » Voiture particulière – Passager n’est pas à prendre en compte, étant donné que les émissions de gaz à effet de serre liées aux voitures particulières sont indépendantes du nombre d’occupants (facteurs d’émission exprimés en gCO₂/vkm²²). Les émissions dues à la marche sont par ailleurs négligées. Précisons que des déplacements de distances plus importantes, pour lesquelles la répartition est considérée nulle, peuvent bel et bien avoir lieu en réalité mais sont supposés être peu fréquents et sont dès lors négligés.

Scénario	Mode « global »	Répartition des déplacements par classes de distance											
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	> 100	
ZIR + PPAS	Voiture particulière – Conducteur	20%	30%	12%	12%	10%	4%	3%	3%	2%	2%	2%	100%
	Taxi	37,5%	37,5%	12,5%	12,5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
	Transports en commun	35%	35%	15%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
	Vélo	50%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
ZIR sans PPAS	Voiture particulière – Conducteur	48%	21%	8%	6%	5%	3%	3%	2%	2%	1%	1%	100%
	Taxi	37,5%	37,5%	12,5%	12,5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
	Transports en commun	35%	35%	15%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
	Vélo	50%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

Tableau 24 : Classes de distances parcourues et répartition des déplacements selon ces classes – Scénarios ZIR avec PPAS et ZIR sans PPAS (ARIES, 2023)

En ce qui concerne la voiture particulière – Conducteur, une hausse du nombre de déplacements dans la classe [10-20] a été considérée dans le cas du scénario ZIR avec PPAS pour tenir compte du fait que le programme comprend une large part de commerces, engendrant potentiellement des déplacements intra-RBC ou depuis la périphérie.

2.4.1.3. Facteurs d’émission pour le volet ‘Mobilité’

Les facteurs d’émission pour la **voiture particulière** dépendent de la répartition entre motorisations (essence, diesel, électricité, autres) et de son évolution sur la période d’analyse. Pour des raisons de fluidité du rapport, ces facteurs d’émission sont repris en annexe (voir *Point 6.1. Facteurs d’émission pour la voiture particulière*).

Les **taxis** sont supposés présenter une motorisation électrique dans leur totalité. Le facteur d’émission considéré est de 100 g CO₂ eq/vkm²³.

En ce qui concerne les **transports en commun**, la répartition entre sous-catégories est la suivante :

- Métro : 70% ;
- Tram : 15% ;
- Bus : 15%.

²² Véhicule.km

²³ Valeur moyenne, inspirée de la Base Carbone de l’ADEME.

Ces proportions sont supposées constantes sur la durée d'analyse.

Les facteurs d'émission considérés sont fournis par la STIB²⁴ et repris dans le tableau ci-dessous.

Mode	Facteur d'émission [gCO ₂ eq/passager.km]
Métro	20
Tram	30
Bus	110

Tableau 25 : Facteurs d'émission pour les transports en commun (STIB, 2023)

En ce qui concerne les **vélos**, il est supposé que 40% des véhicules sont à assistance électrique. Le facteur d'émission considéré est de 11 gCO₂ eq/vkm, valeur fournie par la Base Carbone de l'ADEME²⁵. Son évolution est par hypothèse constante sur l'ensemble de la durée d'analyse, calquée sur l'évolution du facteur d'émission pour la production d'électricité.

2.4.2. Résultats

Le graphique ci-dessous reprend les émissions globales pour le volet Mobilité, selon les différents modes globaux et les sous-catégories, sur l'ensemble de la durée d'analyse (60 ans), respectivement pour les scénarios avec et sans PPAS. Ces émissions sont exprimées en tonnes équivalent CO₂.

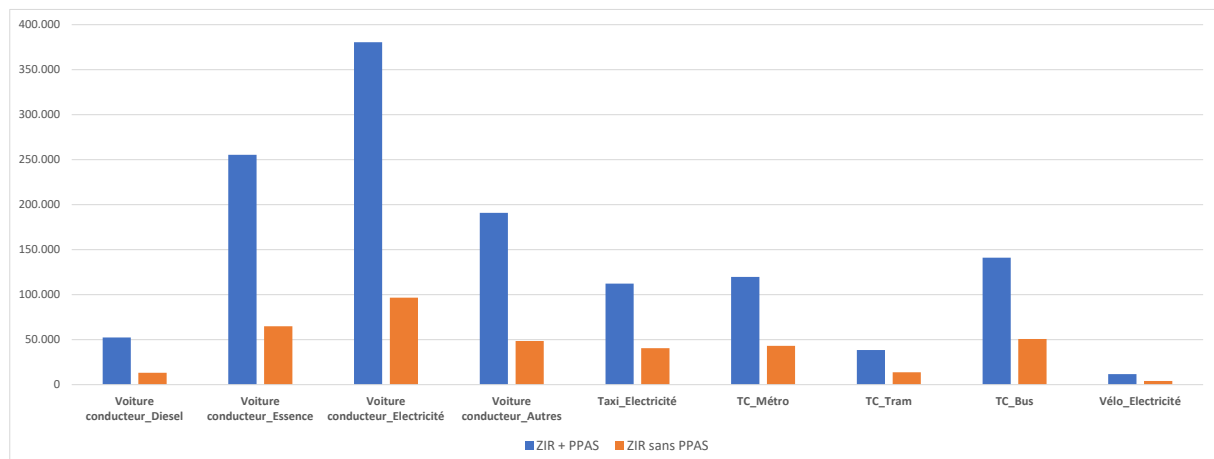


Figure 11 : Emissions du volet Mobilité réparties selon les modes sur l'ensemble de la durée d'analyse [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

Le tableau ci-dessous reprend également les émissions par mode.

²⁴ Informations disponibles sur le site de la STIB à la page Environnement > Engagements : https://www.stib-mivb.be/article.html?_guid=008a3561-2ac1-3410-22bc-d575f8441615&l=fr (consulté en février 2023)

²⁵ Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France)

	Voiture particulière					Taxi	Transports en commun				Vélo	Total
	Diesel	Essence	Electricité	Autres	Total	Electricité	Métro	Tram	Bus	Total	Electricité	
ZIR + PPAS	52.553	255.419	380.612	190.994	879.577	112.365	119.727	38.484	141.106	299.317	11.757	1.303.016
	4,0%	19,6%	29,2%	14,7%	68%	8,6%	9,2%	3,0%	10,8%	23%	0,9%	100%
ZIR sans PPAS	13.347	64.871	96.667	48.508	223.394	40.515	43.169	13.876	50.878	107.923	4.239	376.071
	3,5%	17,2%	25,7%	12,9%	59%	10,8%	11,5%	3,7%	13,5%	29%	1,1%	100%

Tableau 26 : Emissions du volet Mobilité réparties selon les modes sur l'ensemble de la durée d'analyse [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

A l'échelle de la totalité de la durée d'analyse, les émissions prépondérantes sont dues à la voiture particulière, quel que soit le scénario (68% dans le cas ZIR avec PPAS et 59% dans le cas de la ZIR sans PPAS), du fait des émissions évaluées pour les années avant 2050. La part due à la voiture électrique est dominante (entre 25 et 30%), étant donné son développement actuel et à venir. En ce qui concerne les transports en commun, deuxième mode global le plus émetteur au niveau de la mobilité (entre 25 et 30%), le bus présente la part la plus importante, ce qui s'explique par les hypothèses faites pour les parts modales entre métro, tram et bus et par le facteur d'émission par passager.km, plus élevé que celui du métro. Ce facteur d'émission correspond à une situation actuelle, avec un parc de bus dont la composition n'est pas précisée sur le site de la STIB. En l'absence d'informations détaillées, ce facteur d'émission a été considéré constant sur l'ensemble de la durée d'analyse, ce qui conduit à une surestimation des émissions.

En termes d'**évolution temporelle** des émissions, les graphiques ci-dessous montrent, respectivement pour les scénarios avec et sans PPAS, des diminutions des émissions totales d'environ 59% et de 62% à l'horizon 2090 par rapport à 2031. Ces diminutions sont pratiquement totalement dues aux émissions des voitures particulières qui sont réduites de 73% à l'horizon 2090 et ce, par une baisse rapide de près de 70% à l'horizon 2050. Il est en effet supposé que la majeure partie des efforts sont fournis avant cette année (en termes de diminution de la part modale voiture, de la part des voitures à motorisation thermique et de réduction des déplacements effectués). Les diminutions relatives aux transports en commun sont principalement dues à la diminution des déplacements envisagée avant 2050. Les parts des taxis et des vélos électriques augmentent quant à elle légèrement, du fait de la hausse supposée des parts modales.

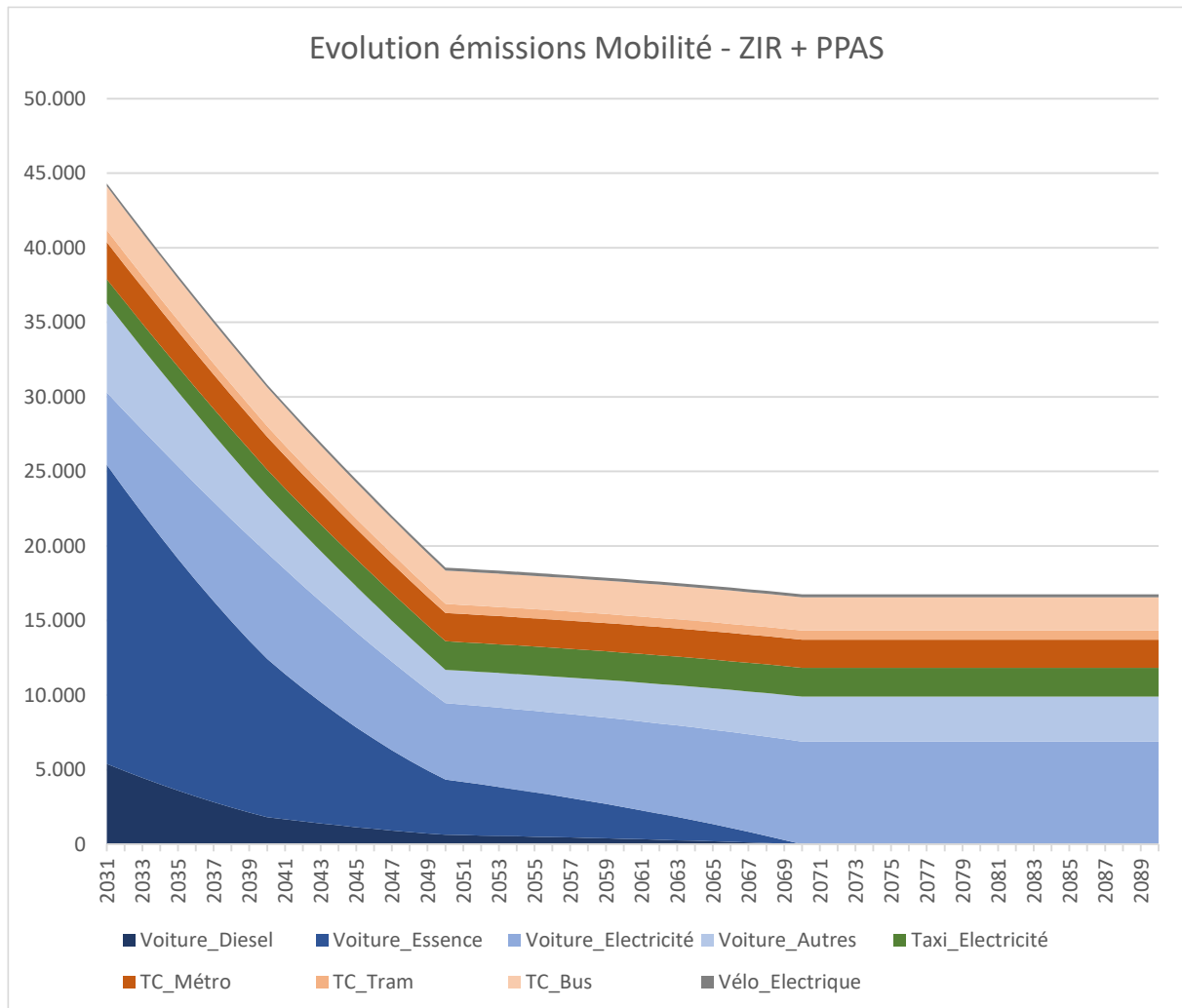


Figure 12 : Evolution des émissions liées à la mobilité sur la période d’analyse 2031-2090 – Scénario ZIR avec PPAS [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

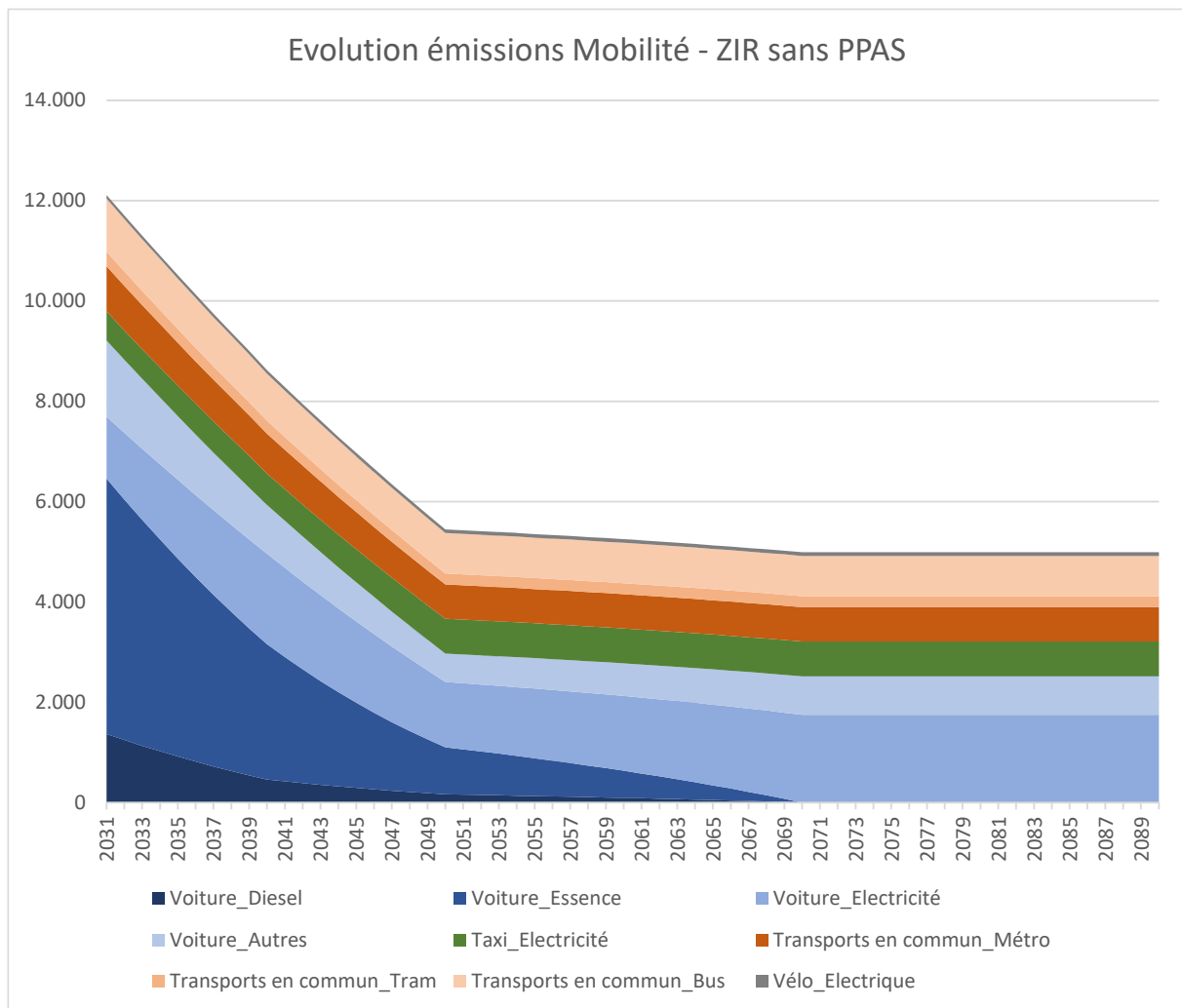


Figure 13 : Evolution des émissions liées à la mobilité sur la période d’analyse 2031-2090 – Scénario ZIR sans PPAS [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

2.5. Résultats globaux

Le graphique et le tableau ci-dessous reprennent les émissions globales pour chaque volet (Construction, Exploitation, Mobilité) sur la totalité de la durée d’analyse (60 ans) afin de considérer l’ensemble du cycle de vie du projet, respectivement pour les scénarios avec et sans PPAS. Ces émissions sont exprimées en tonnes équivalent CO₂. A noter que les émissions Exploitation ne tiennent pas compte des émissions évitées par la production locale d’électricité par des panneaux photovoltaïques.

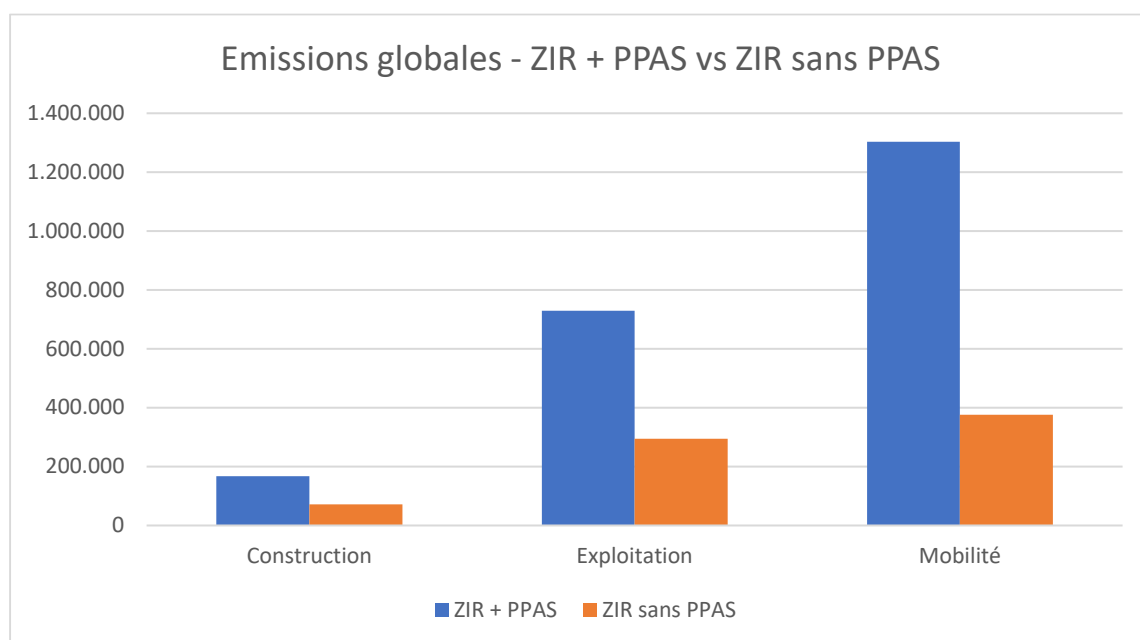


Figure 14 : Emissions totales des volets Construction, Exploitation (sans PV) et Mobilité sur la durée d’analyse – ZIR avec PPAS et ZIR sans PPAS [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

Scénario	Construction	Exploitation	Mobilité	Total
ZIR + PPAS	166.613	729.054	1.303.016	2.198.683
	7,6%	33,2%	59,3%	100,0%
ZIR sans PPAS	71.342	294.569	376.071	741.982
	10,3%	35,5%	54,2%	100,0%
ZIR sans PPAS/ ZIR + PPAS	42,8%	40,4%	28,9%	33,7%

Tableau 27 : Emissions totales des volets Construction, Exploitation (sans PV) et Mobilité sur la durée d’analyse [tCO₂ eq] – ZIR avec et sans PPAS (ARIES, 2023)

Le graphique ci-dessous illustre la répartition des émissions selon les trois volets, pour les deux scénarios.

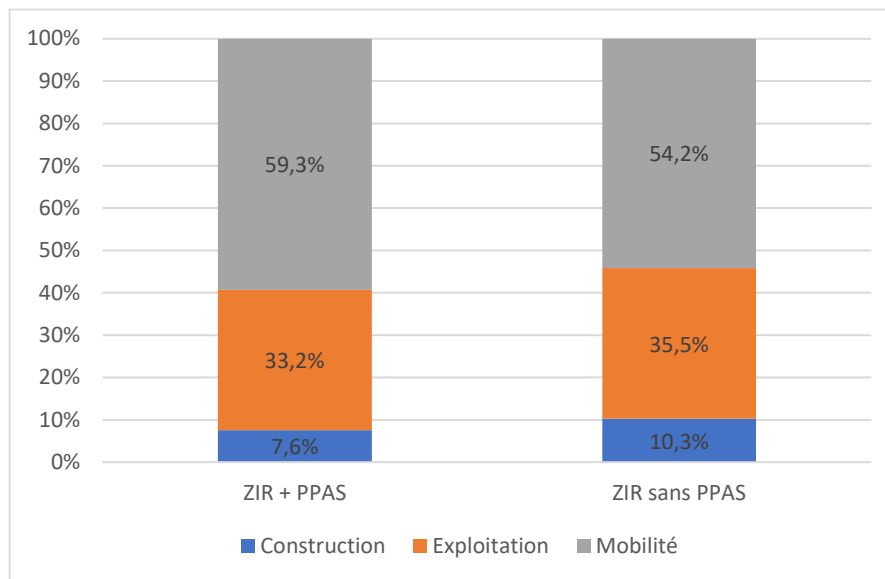


Figure 15 : Répartition des émissions totales selon les volets Construction, Exploitation et Mobilité sur la durée d’analyse – ZIR avec et sans PPAS [%] (ARIES, 2023)

En mettant en regard les 3 volets, les proportions présentent un ordre de grandeur similaire, qu’il s’agisse de la ZIR avec ou sans PPAS. La proportion de la construction est de l’ordre de 8-10%, de l’exploitation de l’ordre de 35% et de la mobilité de l’ordre de 55%. En ne considérant que la phase d’occupation des bâtiments, le poids de la mobilité présente donc un poids plus élevé.

Rappelons que la durée d’analyse de 60 ans est une durée fixée arbitrairement : les proportions des 3 volets obtenues varient en fonction de celle-ci. Le poids de la construction diminue dans les cas où la durée d’analyse est supérieure, ce qui sera très vraisemblablement le cas, étant donné que la durée de vie des bâtiments devrait l’être également.

Globalement, en tenant compte des hypothèses retenues, la mise en œuvre du scénario ZIR sans PPAS engendre la division des émissions totales d’un facteur 3.

2.6. Pistes d’amélioration et alternatives

2.6.1. Construction – Structure alternative

L’analyse a visé à déterminer dans quelle mesure les émissions liées à la construction varient lorsqu’une partie de la structure des bâtiments, considérée construite de manière traditionnelle en béton, est remplacée par une structure bois (voir description des parois types liées à cette structure au *Point 2.2.1.2. Facteurs d’émission pour le volet ‘Construction*). Le paramètre d’influence est ici la proportion de surface plancher dont la structure correspondante est modifiée.

Les graphiques suivants illustrent l’évolution des émissions en fonction de cette proportion, respectivement pour les scénarios avec et sans PPAS (les émissions relatives à l’exploitation ne tiennent pas compte de la production d’électricité à l’aide de panneaux photovoltaïques).

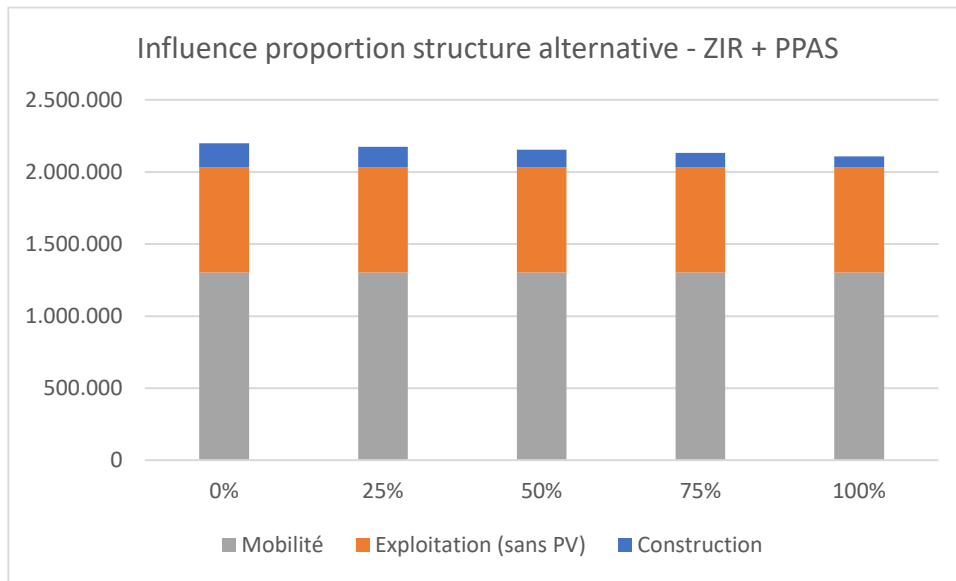


Figure 16 : Influence de la proportion de surface plancher en structure alternative – ZIR avec PPAS [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

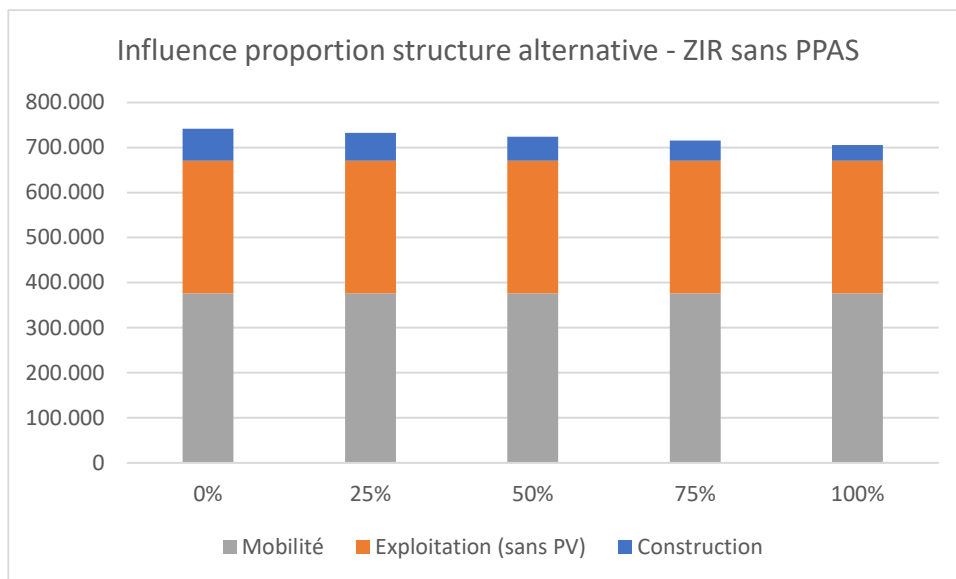


Figure 17 : Influence de la proportion de surface plancher en structure alternative – ZIR sans PPAS [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

Les tableaux ci-dessous reprennent les émissions dans les deux scénarios.

Volet	Proportion de surface plancher en structure alternative				
	0%	25%	50%	75%	100%
Construction	166.613	142.567	121.219	99.872	75.825
Exploitation	729.054	729.054	729.054	729.054	729.054
Mobilité	1.303.016	1.303.016	1.303.016	1.303.016	1.303.016
Total	2.198.683	2.174.636	2.153.289	2.131.942	2.107.895
Réduction volet Construction		-14,4%	-27,2%	-40,1%	-54,5%
Réduction Total		-1,1%	-2,1%	-3,0%	-4,1%

Tableau 28 : Influence de la proportion de surface plancher en structure alternative – ZIR avec PPAS [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

Volet	Proportion de surface plancher en structure alternative				
	0%	25%	50%	75%	100%
Construction	71.342	61.622	53.069	44.515	34.795
Exploitation	294.569	294.569	294.569	294.569	294.569
Mobilité	376.071	376.071	376.071	376.071	376.071
Total	741.982	732.263	723.709	715.155	705.436
Réduction volet Construction		-13,6%	-25,6%	-37,6%	-51,2%
Réduction Total		-1,3%	-2,5%	-3,6%	-4,9%

Tableau 29 : Influence de la proportion de surface plancher en structure alternative – ZIR sans PPAS [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

Au regard du volet Construction seul, les émissions diminuent linéairement en fonction de la proportion de surface plancher en structure alternative et ce, respectivement de 55% et 51% pour les scénarios avec et sans PPAS, dans le cas où la structure de base est totalement remplacée par la structure alternative.

Au regard de l'ensemble des émissions des 3 volets, la diminution totale est de l'ordre de 5%, étant donné le poids relativement limité du volet Construction.

2.6.2. Construction – Suppression parkings souterrains

Pour rappel, la spatialisation de base considère 2 niveaux de sous-sol. L'impact de leur suppression totale est illustré sur les graphiques ci-dessous (les émissions relatives à l'exploitation ne tiennent pas compte de la production d'électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques).

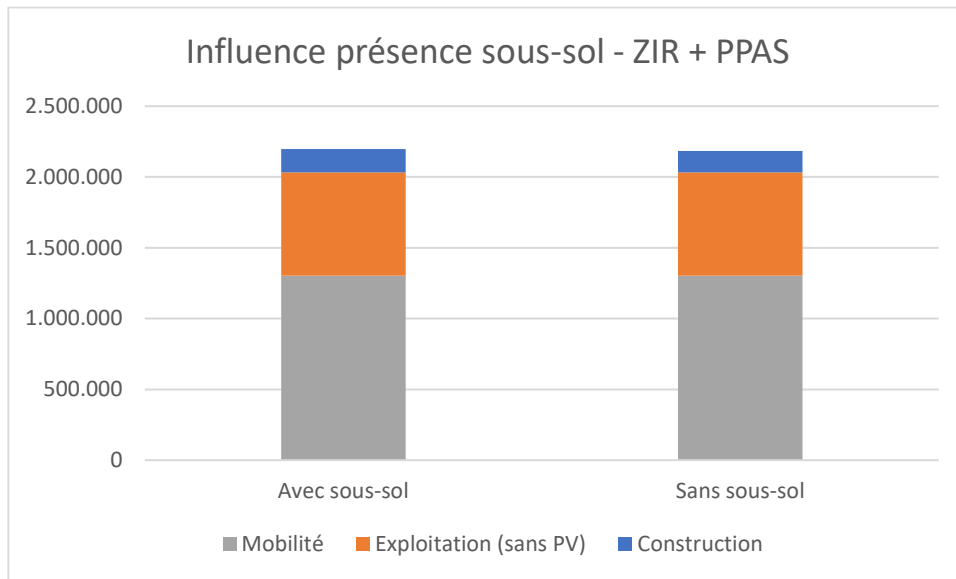


Figure 18 : Influence de la suppression des niveaux de sous-sol – ZIR avec PPAS [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

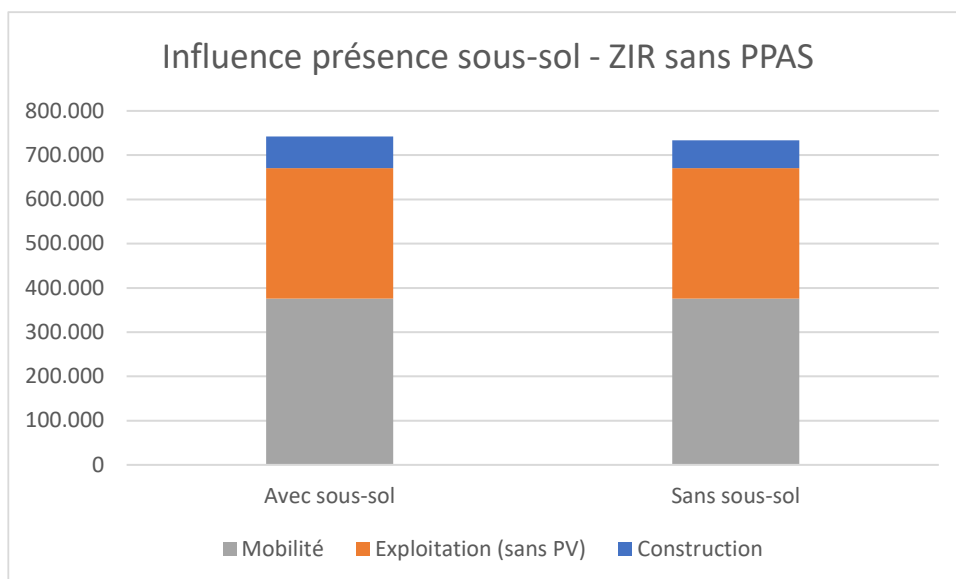


Figure 19 : Influence de la suppression des niveaux de sous-sol – ZIR sans PPAS [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

Les tableaux ci-dessous reprennent les émissions dans les deux scénarios.

Volet	ZIR + PPAS		ZIR sans PPAS	
	Avec sous-sols	Sans sous-sols	Avec sous-sols	Sans sous-sols
Construction	166.613	150.938	71.342	62.602
Exploitation	729.054	729.054	294.569	294.569
Mobilité	1.303.016	1.303.016	376.071	376.071
Total	2.198.683	2.183.008	741.982	733.242
Evolution volet Construction	100,0%	90,6%	100,0%	87,7%
Evolution total	100,0%	99,3%	100,0%	98,8%

Tableau 30 : Influence de la proportion de surface plancher en structure alternative – ZIR avec PPAS et ZIR sans PPAS [tCO₂ eq] (ARIES, 2023)

Au regard du volet Construction seul, les émissions diminuent respectivement de 9% et 12% pour les scénarios avec et sans PPAS, dans le cas où l'ensemble des sous-sols est supprimé.

Au regard de l'ensemble des émissions des 3 volets, la diminution totale est marginale et est de l'ordre de 1%, étant donné le poids relativement limité du volet Construction.

3. Recommandations

- **Construction :**
 - Envisager le recours à des constructions en structure bois, tout en assurant des performances équivalentes en termes de confort thermique, de stabilité, ... ;
 - Utiliser des aciers au maximum recyclés, tout en assurant des performances équivalentes en termes de stabilité ;
 - Utiliser du béton composé de ciment de type CEM III, pauvre en clinker, tout en assurant des performances équivalentes en termes de stabilité ;
 - Limiter la formation ou l'accentuation d'îlots de chaleur par l'utilisation de matériaux de façades, de toiture et de revêtements adéquats + ...

- **Exploitation :**
 - Réduire dans un premier temps les besoins en énergie en optimisant la performance énergétique des bâtiments (utilisation rationnelle de l'énergie) :
 - Enveloppe ;
 - Mise en place de systèmes passifs (free-cooling, ...) ;
 - Mise en place d'une production centralisée de chaleur : permettant l'adaptation plus aisée à une autre source d'énergie recourant à une technologie plus performante (géothermie, ...)
 - Limitation des pertes de distribution en réduisant les distances à parcourir par les fluides

- Satisfaire dans un second temps les besoins en énergie résiduels par l'utilisation d'installations techniques et en recourant à des vecteurs énergétiques peu carbonés ;
- **Mobilité :**
 - Favoriser l'utilisation de modes de transports moins émetteurs (transports en commun, modes actifs, voitures électriques).
 - Favoriser la mutualisation de l'utilisation des véhicules individuels par des installations et dispositifs dans le périmètre

4. Conclusions

Le présent bilan carbone a pour objectif d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre engendrées par la ZIR n°15 – Heysel, dans le cas de la mise en œuvre du programme selon deux scénarios :

- avec la mise en œuvre d'un PPAS, permettant le développement de la totalité de l'ambition du Gouvernement, notamment la création d'un pôle commercial de dimension métropolitaine
- sans PPAS (en application de la prescription 18) limitant le développement à ce qui est autorisé par les prescriptions de la zone de forte mixité.

L'analyse porte sur 3 volets : les émissions liées à la construction des bâtiments, les émissions liées à l'exploitation des bâtiments, dues aux consommations d'énergie engendrées par leur occupation, et les émissions liées à la mobilité induite par le projet. Afin de mettre en perspective les 3 volets dans une approche de type analyse de cycle de vie du projet d'aménagement, un périmètre temporel de 60 ans a arbitrairement été fixé. Pour mener à bien les calculs nécessaires, un outil Excel a été développé.

Etant donné qu'il s'agit d'un bilan carbone relatif à un plan d'aménagement et non pas à un projet d'infrastructure bien défini pour lequel des informations détaillées sont potentiellement disponibles (métré, nature des matériaux, ...), une spatialisation à partir de données urbanistiques générales (programme, ...) doit préalablement être menée pour chacun des deux scénarios étudiés. Cette spatialisation consiste à déterminer la géométrie de bâtiments fictifs (nombre, gabarits, emprise au sol, sous-sol), déterminée pour chaque affectation, en fonction de données urbanistiques de base (programme, surfaces plancher, emprises maximales des constructions).

L'évaluation des émissions pour chacun des trois volets nécessite de poser des hypothèses. Pour la construction, il s'agit de données géométriques et de parois types constituant les bâtiments, dont les impacts sont calculés à l'aide du logiciel *One Click LCA*. Pour l'exploitation, les hypothèses portent sur l'ampleur et la répartition des besoins ou des consommations d'énergie (selon qu'il s'agisse de bâtiments neufs ou existants) selon les usages et les vecteurs énergétiques et le rendement des installations techniques, ainsi que sur l'évolution temporelle de ces grandeurs. Enfin, en ce qui concerne la mobilité, l'évaluation se base sur des quantités

de déplacements hebdomadaires et sur leur répartition par classe de distances parcourues, et ce, pour différents modes et motorisations, en fonction du programme.

A l'échelle globale, au regard des émissions sur la totalité de la durée d'analyse, pouvant être considérée comme la durée conventionnelle du cycle de vie du projet, la proportion des émissions dues à la construction est de l'ordre de 8-10%, tandis que celles de l'exploitation et de la mobilité sont respectivement de l'ordre de 35% et de 55%. Cela met en évidence la prépondérance des émissions relatives à ces deux volets. Ces proportions sont similaires d'un scénario à l'autre. Les émissions totales évaluées pour le scénario sans PPAS sont approximativement de l'ordre d'un tiers de celles relatives au scénario avec PPAS.

Plus en détails, au niveau de la construction, la production et la mise en œuvre des matériaux sont prépondérantes et représentent environ 85% des émissions totales du volet de la construction. En examinant les émissions par catégories de matériaux, compte tenu des hypothèses posées sur les caractéristiques de ceux-ci, l'acier représente en la plus grande proportion (de l'ordre de 40-45%), suivi par le béton, pour environ 25-30%. Ces proportions présentent toutefois une sensibilité et peuvent varier dans de larges mesures, notamment dans le cas où de l'acier, en tout ou partie recyclé, est utilisé au lieu de l'acier neuf tel qu'ici considéré, ou encore en faisant varier le type de ciment entrant dans la composition du béton.

En ce qui concerne le volet exploitation, les émissions dues aux consommations de gaz représentent de l'ordre de 10% des émissions, tandis que les émissions liées aux consommations d'électricité en représentent le complément (aucun autre vecteur énergétique n'étant considéré, ni de production locale d'électricité par panneaux photovoltaïques). Ces proportions s'expliquent par l'évolution supposée des besoins en gaz et électricité au profit de cette dernière. Les hypothèses posées précédemment consistent en effet à considérer une diminution nette des besoins en gaz pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et les autres usages (cuisson, ...). En termes d'évolution temporelle des émissions, les diminutions des émissions totales calculées sont évaluées à environ 7% et à 18% à l'horizon 2090 par rapport à 2031 respectivement pour les scénarios avec et sans PPAS (en ne considérant pas la pose de panneaux photovoltaïques). Ces diminutions sont pratiquement totalement dues aux émissions liées aux consommations de gaz, les émissions aux consommations d'électricité ne connaissant pas de diminution. Ceci s'explique une nouvelle fois par les hypothèses en termes d'évolution du recours aux vecteurs énergétiques et des besoins.

Pour la mobilité induite par le projet, les émissions prépondérantes sont dues à la voiture particulière (respectivement d'environ 70% pour le scénario PPAS et 60% pour le scénario sans PPAS), quel que soit le scénario, du fait des émissions évaluées pour les années avant 2050. La part due à la voiture électrique est dominante (entre 25 et 30%), étant donné son développement actuel et à venir. Le bus représente la part la plus importante au niveau des transports en commun (par rapport au métro et au tram). En termes d'évolution temporelle des émissions, on envisage des diminutions des émissions totales d'environ 60% à l'horizon 2090 par rapport à 2031, pour les deux scénarios. Ces diminutions sont pratiquement totalement dues aux émissions des voitures particulières qui sont réduites d'environ 75% à l'horizon 2090 et ce, par une baisse rapide de près de 70% à l'horizon 2050. Il est supposé que la part des moteurs thermiques (essence et diesel) diminue linéairement à partir de 2040 pour être nulle en 2070, au profit des autres motorisations. De manière générale, il est supposé que la majeure partie des efforts sont fournis avant 2050 (en termes de diminution de la part modale voiture, de la part des voitures à motorisation thermique et de réduction des déplacements effectués).

Il apparaît très clairement que les **leviers d'action en termes de diminution d'impacts carbone du projet se situent au niveau de l'exploitation et de la mobilité**. Des recommandations très générales peuvent être formulées, visant à limiter en premier lieu dans les deux cas les besoins, en énergie et en déplacements. Dans le cas de l'exploitation, cela passe par une performance énergétique optimisée, notamment par la composition de l'enveloppe des bâtiments, la mise en place de systèmes passifs et le plus possible *low-tech* afin de viser la plus grande indépendance énergétique possible, ainsi que par une certaine sobriété (diminution du nombre d'appareils électriques, de la fréquence et de leur durée d'utilisation). Dans le cas de la mobilité, la mise en place d'une mixité fonctionnelle à l'échelle du périmètre permet de limiter le nombre de déplacements et les distances parcourues. Tant le programme du scénario ZIR avec PPAS que celui du scénario ZIR sans PPAS comportent une certaine mixité, par la présence de logements, de bureaux, de commerces et d'équipements.

Dans un second temps, il peut être intéressant d'analyser la manière de répondre adéquatement aux besoins résiduels pour ces deux volets, par l'utilisation d'installations techniques performantes dans la mesure où celles-ci restent nécessaires, et le recours à des vecteurs énergétiques limitant les émissions de gaz à effet de serre, et en favorisant l'utilisation de modes de transports moins émetteurs (transports en commun, modes actifs, voitures électriques).

Il est à souligner qu'en termes de mobilité, la mise en place de ces mesures doit s'inscrire dans l'ensemble des mesures initiées par la Région de Bruxelles-Capitale.

En ce qui concerne la construction, des analyses complémentaires ont visé à, d'une part, déterminer dans quelle mesure les émissions varient lorsqu'une partie de la structure des bâtiments, considérée en base construite de manière traditionnelle en béton, est remplacée par une structure bois, et, d'autre part, lorsque les 2 niveaux de sous-sol considérés en base sont totalement supprimés. Le remplacement de la structure béton par une structure bois pour la totalité des bâtiments permet de diviser par deux les émissions liées à la construction, cet impact variant linéairement pour des remplacements partiels. A l'échelle des émissions globales des 3 volets réunis, cette diminution n'est néanmoins que de l'ordre de 5%. Dans le cas de la suppression totale des sous-sols, la diminution est de l'ordre de 10% pour le volet construction et de 1% pour les 3 volets réunis, soit un impact très marginal.

Dans le sens où toute émission de gaz à effet de serre est bonne à éviter, il est toutefois recommandé d'envisager la mise en œuvre de ces configurations alternatives. Ces recommandations peuvent être combinées au fait d'utiliser de l'acier recyclé au maximum et du béton composé de ciment de type CEM III (pauvre en clinker, par rapport à un ciment de type CEM I). Il est important de garder à l'esprit que le recours à des matériaux « alternatifs » doit permettre d'atteindre des standards équivalents en termes de confort thermique, de performances énergétique et sanitaire, de stabilité, ...

Toujours au niveau de la construction, l'architecture des bâtiments peut permettre de limiter les émissions, notamment par le recours au maximum à des matériaux issus du réemploi puis à des matériaux recyclés. Pour les matériaux neufs, utiliser des structures standardisées, permettant de réaliser des économies d'échelle lors de leur production, conduit à limiter les émissions d'un poste identifié comme prépondérant. Par ailleurs, concevoir des bâtiments de gabarits homogènes (sans toutefois nuire aux qualités architecturales, esthétiques et sensibles des constructions afin d'éviter toute monotonie, à l'instar du fait d'assurer des performances équivalentes dans le cas de l'énergie ou de la stabilité) permet également de faciliter de potentielles interventions ultérieures visant à améliorer les performances des bâtiments.

5. Références

5.1. Cadre de référence

Belgique et Région de Bruxelles-Capitale

- Plan National énergie-climat (PNEC) 2021-2030
- Région de Bruxelles-Capitale (2019). *Plan énergie climat 2030*
- Région de Bruxelles-Capitale (2022). *Projet de plan régional Air Climat Energie 2023-2027*
- Bruxelles Mobilité (2021). Plan régional de mobilité 2020-2030. Plan stratégique et opérationnel

France

- Décret n° 2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine (publié au Journal Officiel de la République française le 31 juillet 2021).
- Décret n° 2022-305 du 1er mars 2022 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments de bureaux et d'enseignement primaire ou secondaire en France métropolitaine (publié au Journal Officiel de la République française le 3 mars 2022).

5.2. Publications

- Bureau fédéral du Plan (2022). Parc automobile @2040
- Bureau fédéral du Plan (2022). Perspectives de la demande de transport en Belgique à l'horizon 2040 – Annexe méthodologique
- GIEC (2014). Assessment report 5 – Annex III – Technology-specific Cost and Performance Parameters
- ICEDD (2021). *Etude sur les consommations énergétiques spécifiques du secteur tertiaire – Rapport final*
- ICEDD (2021). *Potentiel d'efficacité en matière de chaleur et de froid en Région de Bruxelles-Capitale*
- ICEDD (2021). *Update of the impact assessment of federal Policies and Measures*

5.3. Sites Internet consultés

- Base Carbone (ADEME) : <https://www.bilans-ges.ademe.fr> (consultée en février 2023)

- Bruxelles Environnement : <https://environnement.brussels> (consulté en février 2023)
- Eurostat : <https://ec.europa.eu> (consulté en février 2023)
- STIB : <https://www.stib-mivb.be> (consulté en février 2023)

6. Annexes

6.1. Facteurs d'émission pour la voiture particulière

Pour la **voiture particulière**, l'évolution de la répartition entre motorisations (essence, diesel, électricité, autres) sur la période d'analyse est reprise dans le tableau ci-dessous. Cette répartition est basée sur les projections fournies par le Bureau fédéral du Plan à l'horizon 2040²⁶. Il est supposé que la part des moteurs thermiques (essence et diesel) diminue linéairement à partir de 2040 pour être nulle en 2070, au profit des autres motorisations. Cette catégorie « Autres » inclut les voitures GPL²⁷, GNC²⁸, hybrides non rechargeables (essence, diesel) et hybrides rechargeables (essence, diesel). Des hypothèses sont posées concernant la répartition du parc entre ces types de véhicules²⁹, supposée constante sur l'ensemble de la durée d'analyse.

²⁶ Bureau fédéral du Plan (2022). *Parc automobile @2040*

²⁷ Gaz de pétrole liquéfié

²⁸ Gaz naturel comprimé

²⁹ Hybrides non rechargeables essence : 35% - Hybrides non rechargeables diesel : 10%

Hybrides non rechargeables essence : 35% - Hybrides non rechargeables diesel : 10%

GNC : 5%

GPL : 5%

Année	Diesel	Essence	Electricité	Autres
2031	15,0%	45,0%	20,0%	20,0%
2032	14,2%	43,7%	22,3%	19,8%
2033	13,3%	42,4%	24,6%	19,7%
2034	12,5%	41,1%	26,9%	19,5%
2035	11,6%	39,8%	29,3%	19,4%
2036	10,7%	38,4%	31,6%	19,2%
2037	9,9%	37,1%	34,0%	19,0%
2038	9,0%	35,7%	36,4%	18,9%
2039	8,1%	34,4%	38,8%	18,7%
2040	7,2%	33,0%	41,2%	18,6%
2041	6,9%	31,8%	42,6%	18,7%
2042	6,7%	30,5%	44,0%	18,8%
2043	6,4%	29,3%	45,3%	18,9%
2044	6,2%	28,1%	46,7%	19,1%
2045	5,9%	26,9%	48,0%	19,2%
2046	5,6%	25,8%	49,3%	19,3%
2047	5,4%	24,6%	50,6%	19,4%
2048	5,1%	23,4%	51,9%	19,6%
2049	4,9%	22,3%	53,2%	19,7%
2050	4,6%	21,1%	54,5%	19,8%
2051	4,4%	20,3%	55,2%	20,1%
2052	4,3%	19,5%	55,9%	20,3%
2053	4,1%	18,7%	56,6%	20,6%
2054	3,9%	17,8%	57,4%	20,9%
2055	3,7%	16,9%	58,2%	21,2%
2056	3,5%	16,0%	59,0%	21,5%
2057	3,3%	15,1%	59,8%	21,8%
2058	3,1%	14,1%	60,7%	22,1%
2059	2,9%	13,1%	61,6%	22,4%
2060	2,7%	12,1%	62,5%	22,7%
2061	2,4%	11,1%	63,4%	23,1%
2062	2,2%	10,0%	64,4%	23,4%
2063	1,9%	8,9%	65,4%	23,8%
2064	1,7%	7,7%	66,4%	24,2%
2065	1,4%	6,5%	67,5%	24,5%

Année	Diesel	Essence	Electricité	Autres
2066	1,2%	5,3%	68,6%	24,9%
2067	0,9%	4,1%	69,7%	25,3%
2068	0,6%	2,7%	70,9%	25,8%
2069	0,3%	1,4%	72,1%	26,2%
2070	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2071	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2072	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2073	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2074	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2075	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2076	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2077	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2078	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2079	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2080	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2081	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2082	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2083	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2084	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2085	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2086	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2087	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2088	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2089	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%
2090	0,0%	0,0%	73,3%	26,7%

**Tableau 31 : Répartition des voitures particulières selon la motorisation
 (ARIES, d'après Bureau fédéral du Plan, 2023)**

Les facteurs d'émission relatifs aux voitures diesel et essence sont repris dans le tableau suivant. Ils sont déterminés sur base des valeurs fournies par le Bureau fédéral du Plan à l'horizon 2040³⁰. Pour les voitures électriques, la valeur est inspirée de la Base Carbone de l'ADEME³¹. L'évolution du facteur d'émission est calquée sur l'évolution du facteur d'émission pour la production d'électricité, qui est supposée constante (voir *Point 2.3.1.3. Facteurs d'émission pour le volet 'Exploitation)*. Pour la catégorie « Autres », le facteur d'émission est une moyenne des facteurs d'émission fournis par le Bureau fédéral du Plan pondérée par les proportions présentées ci-dessus.

³⁰ Bureau fédéral du Plan (2022). *Perspectives de la demande de transport en Belgique à l'horizon 2040 – Annexe méthodologique*

³¹ Base de données de facteurs d'émission de l'ADEME disponible en ligne via le lien suivant : <https://bilans-ges.ademe.fr> (consultée en janvier 2021)

Année	Diesel [gCO ₂ eq/vkm]	Essence [gCO ₂ eq/vkm]	Electricité [gCO ₂ eq/vkm]	Autres [gCO ₂ eq/vkm]
2031	148	184	100	123
2032	148	184	100	123
2033	147	184	100	123
2034	147	185	100	122
2035	147	185	100	122
2036	147	185	100	122
2037	146	186	100	121
2038	146	186	100	121
2039	146	186	100	121
2040	146	187	100	120
2041	146	187	100	120
2042	146	187	100	120
2043	146	187	100	120
2044	146	187	100	120
2045	146	187	100	120
2046	146	187	100	120
2047	146	187	100	120
2048	146	187	100	120
2049	146	187	100	120
2050	146	187	100	120
2051	146	187	100	120
2052	146	187	100	120
2053	146	187	100	120
2054	146	187	100	120
2055	146	187	100	120
2056	146	187	100	120
2057	146	187	100	120
2058	146	187	100	120
2059	146	187	100	120
2060	146	187	100	120
2061	146	187	100	120
2062	146	187	100	120
2063	146	187	100	120
2064	146	187	100	120
2065	146	187	100	120

Année	Diesel [gCO ₂ eq/vkm]	Essence [gCO ₂ eq/vkm]	Electricité [gCO ₂ eq/vkm]	Autres [gCO ₂ eq/vkm]
2066	146	187	100	120
2067	146	187	100	120
2068	146	187	100	120
2069	146	187	100	120
2070	146	187	100	120
2071	146	187	100	120
2072	146	187	100	120
2073	146	187	100	120
2074	146	187	100	120
2075	146	187	100	120
2076	146	187	100	120
2077	146	187	100	120
2078	146	187	100	120
2079	146	187	100	120
2080	146	187	100	120
2081	146	187	100	120
2082	146	187	100	120
2083	146	187	100	120
2084	146	187	100	120
2085	146	187	100	120
2086	146	187	100	120
2087	146	187	100	120
2088	146	187	100	120
2089	146	187	100	120
2090	146	187	100	120

Tableau 32 : Facteurs d'émission des voitures particulières selon la motorisation (ARIES, d'après Bureau fédéral du Plan, 2023)