

GRAND PARIS EXPRESS

Bilan des émissions de gaz à effet de serre du Grand Paris Express (mise à jour 2018)

Impacts attendus sur les émissions de GES

CONFIDENTIALITE C1

Ce document est la propriété de la Société du Grand Paris. Toute diffusion ou reproduction intégrale ou partielle est autorisée pour et dans la limite des besoins découlant des prestations ou missions du marché conclu avec le titulaire destinataire.

Ce document est la propriété de la Société du Grand Paris. Toute diffusion ou reproduction intégrale ou partielle est autorisée pour et dans la limite des besoins découlant des prestations ou missions du marché conclu avec le titulaire destinataire.

Sommaire

1. Le réseau de transport public du Grand Paris, un projet d'envergure aux effets multiples sur les émissions de gaz à effet de serre	6
1.1. Sphère d'influence	6
1.2. Objectifs du projet	6
1.2.1. Amélioration de l'offre de transport	7
1.2.2. Effets économiques et urbains	7
1.2.3. Participation au développement durable	8
2. Evolution conjointe du projet et études associées	8
2.1. Étapes du projet	8
2.2. Le Grand Paris Express et son calendrier de mise en service	9
2.3. Une succession d'études préalables et d'études environnementales	10
3. L'outil CarbOptimum®	12
3.1. La nécessité d'innover à travers un nouvel outil de calcul	12
3.2. Méthodologie d'élaboration de l'outil	12
3.3. Un outil évolutif permettant un suivi tout au long du projet	13
3.4. Première approche de 2012 et mise à jour de 2018	15
4. Concepts de base et méthodologie	16
4.1. Etudes et travaux préalables à la construction	16
4.1.1. Concepts	16
4.1.2. Méthodologie de calcul	17
4.2. Construction de l'infrastructure	18
4.2.1. Concepts	18
4.2.2. Méthodologie de calcul	19
4.2.3. Sensibilité et scénarios	30
4.3. Fonctionnement	30
4.3.1. Concepts	30
4.3.2. Méthodologie de calcul	31
4.4. Mobilité	35
4.4.1. Concepts	35
4.4.2. Méthodologie de calcul	36
4.5. Développement territorial	39
4.5.1. Concepts	39
4.5.2. Méthodologie	40

4.6. Conclusions	48
5. Emissions de GES du projet du Grand Paris Express par poste	49
5.1. Constituants du GPE	50
5.2. Etudes et travaux préalables	50
5.3. Construction	51
5.4. Fonctionnement	57
5.5. Mobilité	59
5.6. Développement territorial	60
6. Bilan global des émissions de GES liées au projet du Grand Paris Express	61
7. Discussion : le rôle du Grand Paris Express dans la Stratégie Nationale Bas Carbone	66
7.2. Cas du secteur des transports dans la SNBC	67
7.3. Conséquences de la SNBC pour le bilan des émissions de GES	68
7.3.1. Etudes et travaux préalables	68
7.3.2. Construction	68
7.3.3. Fonctionnement	68
7.3.4. Mobilité	69
7.3.5. Développement territorial	70
7.3.6. Conclusions du bilan au regard de la SNBC	71

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Grand Paris Express et calendrier de mises en service (source : SGP)	10
Figure 2 : Page d'accueil du CarbOptimum	13
Figure 3 : Principales catégories de postes d'émissions en fonction des différentes phases de réalisation du projet (source : STRATEC 2018)	15
Figure 4 : Représentation des postes d'émissions lors de la phase d'études et de travaux préalables. Source : STRATEC (11-2018)	16
Figure 5 : Schéma d'une vue en coupe et dimensions prises en compte dans l'outil CarbOptimum pour les tunnels (à gauche) et pour les tranchées couvertes (à droite) (source : STRATEC, Méthodologie de calculs des émissions, rapport de phase 2, 2012)	24
Figure 6 : Représentation des postes d'émissions induites par le fonctionnement du métro - Source : STRATEC, 2011	30
Figure 7 : Emissions moyennes en kg éq CO ₂ induites par des déplacements en fonction du mode de transport (voit. part. 1 personne en centre-ville, moto >125cm ³ , minibus 4 personnes, bus avec en moyenne de 21 personnes, train). Données extraites du modèle Bilan Carbone® de l'ADEME, 2012.	35
Figure 8 : Facteurs d'émissions d'utilisation de véhicules particuliers et évolution au cours du temps. Stratec 2011	36
Figure 9 : Relation entre la consommation de carburant des véhicules particuliers et leur vitesse calculée grâce au modèle COPERT 4 et selon les hypothèses de l'étude environnementale stratégique du Grand Paris (Biotope, Stratec, Burgeap 2010).	38

Figure 10 : Etalement urbain (gauche) et forme de densification qualitative (droite) (source : Google Maps nov. 2018)	39
Figure 11 : Stocks de carbone contenus dans la biomasse et le sol selon le type d'occupation du territoire (Source : GIEC, 2000)	42
Figure 12 : Emissions globales liées à la construction par catégorie, scénario A (source : CarbOptimum, 2018)	53
Figure 13 : répartition des émissions liées à la construction du GPE entre les différentes lignes et les différents ouvrages, scénario A (Source : CarbOptimum 2018)	54
Figure 14 : Emissions liées à la construction par catégorie lors de la première version du bilan des émissions de GES (source : CarbOptimum, 2012)	56
Figure 15 : Emissions de fonctionnement (t éq CO ₂) annuelles globalement pour les différentes lignes du Grand Paris et pour les centres d'exploitation et de maintenance, scénario A (source : CarbOptimum 2018)	57
Figure 16 : Emissions évitées annuellement (t éq CO ₂) grâce aux impacts du GPE sur trafic routier, scénario A (source : CarbOptimum 2018)	59
Figure 17 : Emissions de GES liées au développement territorial cumulées au cours du temps en t éqCO ₂ , scénario A (soucre : CarbOptimum 2018)	60
Figure 18 : bilan des émissions de GES liées au projet du Grand Paris Express au cours du temps et selon le scénario A, en t éqCO ₂ (source : CarbOptimum 2018)	62
Figure 19 : bilan des émissions de GES liées au projet du Grand Paris Express au cours du temps et selon le scénario B, en t éqCO ₂ (source : CarbOptimum 2018)	62
Figure 20 : Somme des émissions 2010-2050 et 2010-2070 par poste selon le scénario A, en t éqCO ₂ .	63
Figure 21 : Bilan des émissions du réseau de métro automatique du Grand Paris Express (t éq CO ₂) (source : CarbOptimum 2012, hypothèses basses)	64
Figure 22 : Comparaison des thématiques à 2050 (t éq CO ₂), hypothèses basses (source : CarbOptimum 2012)	64
Figure 23 : Puits et émissions de gaz à effet de serre en France en 2050 selon le scénario de référence de la SNBC (source : SNBC Résumé, 2018, p.5)	66
Figure 24 : Historique et projection des émissions du secteur des transports entre 1990 et 2050 (en MtCO ₂ eq) (source : SNBC Résumé, 2018, p.13)	67
Figure 25 : Consommation d'énergie finale des transports domestiques dans la SNBC (source : SNBC, 2018, p.22)	69
Figure 26 : Consommation d'énergie finale des bâtiments dans la SNBC (source : SNBC, 2018, p.23)	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Hypothèses concernant les déplacements de personnes.....	23
Tableau 2 : Distances moyennes parcourues pour l'évacuation des déblais ou l'acheminement des matériaux lorsque les valeurs exactes ne sont pas connues (valeurs reprises par défaut).....	29
Tableau 3 : Hypothèses de fonctionnement et émissions globales 2024-2050 (source : SGP)	32
Tableau 4 : Facteurs d'émissions de consommation énergétique des bâtiments	33
Tableau 5 : Coûts annuels d'exploitation/maintenance (en millions d'euros constants 2015), hors traction et hors énergie des gares, par ligne (source : communications SGP 2018)	34
Tableau 6 : Facteurs d'émissions globaux d'utilisation des véhicules particuliers.	37
Tableau 7 : impacts du GPE sur le trafic routier selon différents scénarios et horizons de temps (source : modélisation MODUS, DRIEA)	37
Tableau 8 : facteurs d'émissions liées au chauffage des logements et de bâtiments tertiaires de différents âges et types en 2020. En kg éqCO ₂ / par m ² et par an	43
Tableau 9 : perspectives d'évolution de la population et des emplois entre 2015 et 2035.	44
Tableau 10 : Evolution des surfaces résidentielles et tertiaires selon les classes d'âge entre 2005 et 2035 en référence (sans Grand Paris Express) (source : estimations Startec, 2018).....	45
Tableau 11 : Répartition des surfaces résidentielles et tertiaires en Ile-de-France selon les classes d'âge en 2035 selon les scénarios de référence, A ou B.	46
Tableau 12 : Détail des superficies consommées ou épargnées (en hectares) selon les scénarios (source : STRATEC, 2018).	48
Tableau 13 : surfaces épargnées de l'urbanisation et voiries et réseaux non construits grâce au Grand Paris Express et selon les différents scénarios d'évolution de la population et des emplois.....	48
Tableau 14 : Emissions globales liées à la construction par catégorie, scénario A (source : CarbOptimum, 2018).....	53
Tableau 15 : Répartition des émissions de CO ₂ entre les différentes catégories, respectivement pour l'ensemble des lignes, pour l'ensemble des centres d'exploitation et de maintenance, pour l'ensemble du Grand Paris Express (lignes et CE) lors de la mise à jour du CarbOptimum 2018, en comparaison avec la version de 2012, en tonnes équivalent CO ₂	55
Tableau 16 : Linéaire en km de double voie considéré par catégorie d'ouvrages respectivement pour les versions du bilan 2012 et 2018 (source : STRATEC 2012 et 2018)	55
Tableau 17 : Emissions liées à la construction par catégorie lors de la première version du bilan des émissions de GES (source : CarbOptimum, 2012)	56
Tableau 18 : Résultats du bilan aux horizons 2050 et 2070 selon les scénarios en millions de téqCO ₂	61
Tableau 19 : Emissions de GES en téqCO ₂ par poste pour les différents scénarios selon les bilans de 2012 ou 2018	65
Tableau 20 : Facteurs d'émission liés à la mobilité, respectivement issus de la SNBC pour les véhicules neufs et du CarbOptimum pour l'ensemble du parc, à différents horizons temporels (source : SNBC 2018, CarbOptimum 2019).....	70

1. LE RESEAU DE TRANSPORT PUBLIC DU GRAND PARIS, UN PROJET D'ENVERGURE AUX EFFETS MULTIPLES SUR LES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

Le projet de réseau de transport public du Grand Paris consiste en la création d'un nouveau métro automatique de 200 km, comprenant 68 gares et 7 centres techniques associés aux différentes lignes. Ce réseau reliera Paris aux pôles stratégiques de la région Ile-de-France et est conçu pour être en correspondance avec les principales lignes de transport actuelles. Plus qu'un projet d'infrastructure de transport, le réseau du Grand Paris est avant tout "un projet urbain, social et économique" ambitieux qui vise à "unir les grands territoires stratégiques de la région Ile-de-France" tout en promouvant "le développement économique durable, solidaire et créateur d'emplois de la région capitale"¹.

1.1. Sphère d'influence

La sphère d'influence du projet est donc particulièrement étendue, non seulement au niveau géographique (des impacts sont attendus sur l'ensemble de la région Ile-de-France et même au-delà) mais aussi au niveau des secteurs d'activités (des impacts sont attendus sur la mobilité, l'économie, la démographie, l'environnement). La compréhension des influences et des enjeux multiples du projet est prépondérante pour une évaluation adéquate et complète du projet sur les émissions de GES et par conséquent sur les changements climatiques. Les effets attendus sont expliqués par la suite au sein des différents postes d'émission analysés.

Le projet de métro est donc un des éléments qui contribuera au développement futur de la région d'Ile-de-France et peut être vu comme le système nerveux d'une nouvelle organisation spatiale intégrant les dimensions économiques, sociales et territoriales. Ces aspects ont une influence complexe sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) de la région qu'il est important de considérer.

Par ailleurs, comme toute infrastructure lourde de transport en commun mais à une échelle rarement égalée étant donné l'ampleur du projet, la construction du métro nécessitera l'organisation de chantiers majeurs et l'utilisation de quantités très importantes de matériaux de construction. La tenue de ces chantiers et les matériaux utilisés représentent des émissions de GES également importantes qu'il est nécessaire d'évaluer avec attention.

Les émissions induites par la construction représentent ainsi un « investissement » en termes d'émissions de GES qui doit être comparé à l'ensemble des impacts du Grand Paris Express à toutes les échelles (local, régional ou même national), que ce soit pour la mobilité ou pour le développement des territoires.

La sphère d'influence du projet est donc inédite tellement le projet est important et aura des impacts multiples.

1.2. Objectifs du projet

Le projet du Grand Paris est issu d'une réflexion prospective entreprise depuis plusieurs années et vise non seulement à l'amélioration de l'offre de transport en Île-de-France, mais également au développement économique, territorial et durable de l'Ile-de-France.

¹ Article 1 de la loi n°2010-597 du 3 juin 2010 relative au Grand Paris

1.2.1. Amélioration de l'offre de transport

Aujourd'hui, 70% des déplacements en Ile-de-France s'effectuent de banlieue à banlieue, et 80% de ceux-ci se font en voiture, faute d'une alternative performante en transport public. En effet, pour voyager d'une banlieue à une autre en transport en commun il est souvent nécessaire de passer par le centre de Paris, ce qui allonge le temps de transport et sature les lignes de métro et de RER.

Le projet de métro du Grand Paris, vise à améliorer l'offre de transport afin de :

- répondre aux besoins de déplacements de banlieue à banlieue ;
- décongestionner les lignes les plus surchargées du réseau actuel en évitant de passer par Paris pour aller d'une ville de banlieue à une autre ;
- améliorer l'accès aux gares de TGV et aux aéroports (Roissy-CDG, Orly, Le Bourget) à partir de l'ensemble de la région.

Le projet devrait donc permettre d'offrir des nouveaux services et d'induire un report modal de la voiture vers les transports publics.

1.2.2. Effets économiques et urbains

Le réseau de transport du Grand Paris favorisera le développement économique de la région Ile-de-France en :

- désenclavant les territoires aujourd'hui mal insérés dans le tissu métropolitain et en les mettant en relation avec les grands pôles d'emplois de la Région.
- soutenant le développement économique par la mise en relation de grands pôles d'activités, véritables générateurs de croissance pour la région.
- En améliorant l'attractivité du territoire, le fonctionnement des marchés du travail et du logement, les échanges entre les activités.

Le métro permettra notamment de faciliter l'accès des demandeurs d'emplois à plus d'offres d'emplois ainsi que d'encourager les échanges et la mise en réseau des pôles d'excellence. Les nouvelles lignes de métro assureront également aux zones stratégiques du centre et de la périphérie des gains d'accessibilité importants qui réduiront les coûts généralisés de transport et pourront induire de meilleures performances des activités existantes ainsi que des emplois nouveaux. Ces différents éléments sont porteurs de créations d'emplois et de gains de productivité pour les entreprises et les services publics.

Le métro devrait également contribuer à un meilleur aménagement urbain de l'agglomération parisienne. L'offre nouvelle de transport public sera en effet accompagnée de l'aménagement de véritables quartiers de gare, associant logements et emplois. Des mesures d'accompagnement sont mises en place pour maîtriser l'étalement urbain et couvrent une large gamme de politiques : mesures de transport, affectant la voiture ou les transports en commun, mesures d'aménagement du territoire, mesures réglementaires, etc. (p.ex. politique de stationnement urbain, politique de tarification des transports en commun en faveur du Grand Paris Express, amélioration de l'espace public et de l'intermodalité autour des gares). Ces mesures d'accompagnement favoriseront une structure d'agglomération plus compacte et des projets urbains plus denses et moins consommateurs d'espace.

1.2.3. Participation au développement durable

Les émissions de GES par kilomètre parcouru en transports en commun sont largement inférieures à celles de la voiture particulière, et ainsi le report modal, qui peut être considérable à terme, induira par exemple une réduction des émissions globales de l'Ile-de-France liées aux déplacements des franciliens.

De même, les émissions de GES liées aux habitations et aux emplois varient selon la densité du tissu urbain, la mixité des quartiers et la qualité de leur desserte en transports en commun. En désenclavant certains territoires, en rapprochant les habitants et les emplois et en favorisant un tissu urbain plus dense, le métro du Grand Paris aura également des impacts sur les émissions de GES.

Le métro du Grand Paris est donc un projet dont les effets seront bénéfiques tant au niveau des transports que sur les plans économiques, sociaux et territoriaux. Il contribuera à l'amélioration de la qualité de vie, notamment par la préservation des espaces naturels et agricoles, la prise en compte des risques naturels, la réduction des pollutions et des nuisances et assurera ainsi un développement plus durable de l'Ile-de-France.

2. EVOLUTION CONJOINTE DU PROJET ET ETUDES ASSOCIEES

2.1. Étapes du projet

Le réseau de transport en commun du Grand Paris a été réfléchi, justifié et motivé dans le cadre du Schéma d'ensemble du Grand Paris. Le Schéma d'ensemble a été approuvé le 24 août 2011. Le Gouvernement a par ailleurs précisé les orientations concernant la définition des projets de transport en commun en Ile-de-France (relevant à la fois du Grand Paris Express ainsi que de la modernisation et de l'extension du réseau existant), leur calendrier, leur financement et leur mise en œuvre.

3 juin 2010	La loi n°2010-597 relative au Grand Paris est publiée. Elle en indique les principales caractéristiques et crée l'établissement public de l'Etat à caractère industriel et commercial, maître d'ouvrage du projet : la Société du Grand Paris.
Juillet-août 2010	Evaluation Environnementale Stratégique du projet sous la forme d'une évaluation a priori des impacts du projet sur l'environnement sur la base d'un fuseau d'étude d'au moins 3 km de large.
1er octobre 2010 - 31 janvier 2011	Débat public , coordonné et mené par la Commission Nationale du Débat Public (CNDP)
26 mai 2011	Le schéma d'ensemble du « réseau de transport public du Grand Paris » tel que figurant à l'acte motivé a été voté à l'unanimité du Conseil de surveillance de la Société du Grand Paris,
24 août 2011	approuvé par décret publié au Journal officiel de la République française.
2012	Lancement des études et des dossiers de déclaration d'utilité publique
6 mars 2013	Le Premier ministre présente les orientations pour la mise en œuvre du projet, issues des arbitrages rendus suite à différentes analyses portant sur le financement et le phasage du projet dans le cadre du « Nouveau Grand Paris des transport ».
Juin 2016	Les premiers de travaux de génie civil ont débuté sur le chantier de la gare Fort d'Issy - Vanves - Clamart pour la ligne 15 sud.
22 février 2018	Le Premier ministre a rappelé l'importance du réseau de transports francilien et la volonté de mettre en service l'ensemble du réseau du Grand Paris pour 2030. Une nouvelle feuille de route est établie pour en phaser au mieux la réalisation et l'effort d'investissement associé.

2.2. Le Grand Paris Express et son calendrier de mise en service

La traduction de ces orientations en schéma d'exploitation prévisionnel et de dimensionnement de l'offre de transport a conduit à définir, à partir du réseau de transport public du Grand Paris et du réseau complémentaire structurant, trois ensembles de projets constitutifs du Grand Paris Express :

- **Une liaison de rocade**, la ligne 15, regroupant les tronçons les plus chargés des lignes rouge et orange et assurant tout particulièrement la désaturation des réseaux de transport en commun en cœur d'agglomération ;
- **Des métros automatiques à capacités adaptées pour la desserte des territoires en développement**, concernant les tronçons nord-est et est de la ligne rouge (les lignes 16 et 17 entre Saint-Denis Pleyel, Noisy-Champs et Le Mesnil-Amelot) ainsi que la ligne verte (ligne 18) entre Orly et Versailles ;
- **Des prolongements de lignes de métro existantes lorsque cela apparaît pertinent tant fonctionnellement que du point de vue de la rapidité de mise en œuvre** : sont concernés le

prolongement de la ligne 14 au nord jusqu'à Saint-Denis Pleyel et au sud jusqu'à Orly (soit la ligne bleu du schéma d'ensemble), ainsi que le prolongement de la ligne 11 jusqu'à Noisy-Champs via Rosny Bois-Perrier (qui reprend l'un des tronçons constitutifs de la ligne organe, la prise en compte de cette option ayant été confirmée à l'occasion de l'approbation par le conseil du STIF en décembre 2013 du bilan de la concertation réalisée sur la ligne orange.

En matière de calendrier, le Grand Paris Express présente un échéancier de mise en service progressive et continue des différents projets relevant à la fois du Plan de mobilisation pour les transports et du programme Grand Paris Express, depuis 2020 jusqu'à l'horizon 2030.

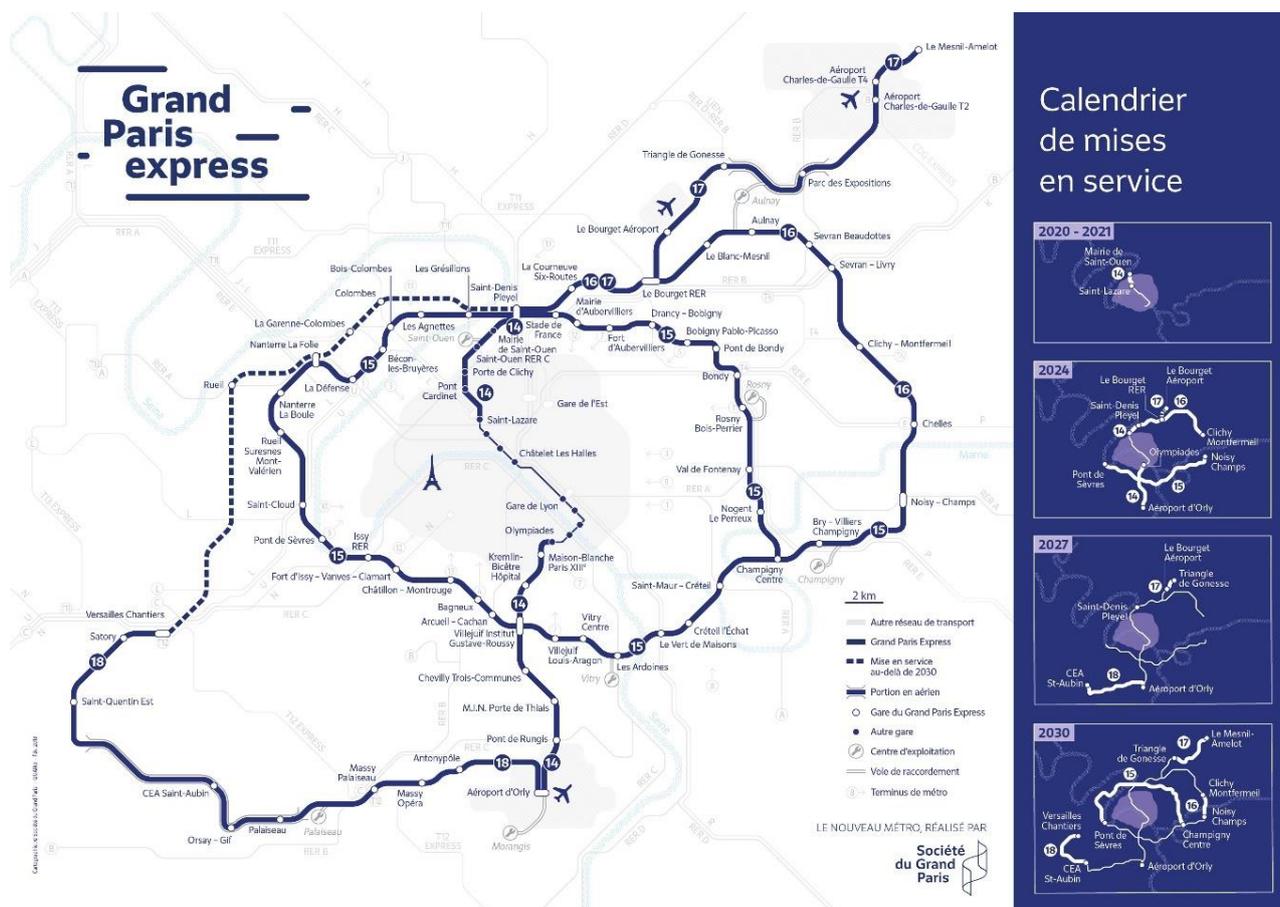


Figure 1: Grand Paris Express et calendrier de mises en service (source : SGP)

2.3. Une succession d'études préalables et d'études environnementales

Des nombreuses études spécifiques ont été réalisées, dans une logique réglementaire ainsi que de prise en compte des effets environnementaux dès la conception du projet. Les enjeux environnementaux ont pu réellement être pris en considération et certains ont influé de manière substantielle sur les positionnements et méthodes constructives des ouvrages.

2011
-
2016

La Société du Grand Paris a mandaté des bureaux d'études indépendants pour la réalisation des études, en commençant **par l'étude stratégique environnementale** puis par les **études d'impacts sur l'environnement** liées aux **dossiers de Déclaration d'Utilité Publique (DUP)** pour la réalisation des ouvrages et des infrastructures.

Au total, ce sont **7 études d'impact** qui ont été réalisées. La première étude globale concernait **tout le réseau** tandis que les 6 suivantes concernaient **plus spécifiquement chacune des lignes constituant ce nouveau réseau**. Alors que pour le volet global, les enjeux environnementaux ont été abordés à l'échelle d'un territoire aussi vaste que l'agglomération parisienne, les études par tronçon ont examiné les problématiques plus finement pour un fuseau d'étude de 500 m autour du tracé et autour des futures gares.

En parallèle, en vue de préparer les dossiers réglementairement requis au titre du code de l'environnement, la Société du Grand Paris a mené et continue de mener différentes études environnementales spécifiques.

Il s'agit :

- Des **études préliminaires de tronçons** spécifiques ;
- Des **études géotechniques** plus précises (sur les caractéristiques du sous-sol, indispensables pour la définition précise des ouvrages en matière de stabilité et pérennité, complétées en fonction de l'avancement des études de conception) ;
- Des **études architecturales** (définition précise de certains ouvrages, en particulier les gares) ;

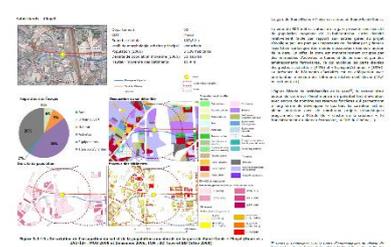
Des **études techniques** liées aux procédures réglementaires ultérieures (procédures au titre de la loi sur l'eau, des installations classées, des permis de construire, apportant des modifications aux caractéristiques de certains ouvrages au fur et à mesure de leur avancement).



Exemple de dossier d'enquête publique



Exemple de planche illustrative des gains de temps de parcours



Exemple de planche illustrative d'une analyse de gare

La Société du Grand Paris a ainsi fait le choix de l'exigence environnementale dès les premières phases de réflexion afin d'adopter des méthodes de constructions adaptées et réalistes, déclinées pour chaque tronçon du métro, chaque gare et chaque ouvrage, et de faire du projet du Grand Paris Express un levier majeur du développement durable de l'Ile-de-France.

3. L'OUTIL CARBOPTIMUM®

3.1. La nécessité d'innover à travers un nouvel outil de calcul

Sachant que la construction du métro du Grand Paris représente un « investissement » transformationnel, c'est-à-dire ayant de considérables conséquences à long terme sur la structure même de l'agglomération, en particulier en ce qui concerne les émissions liées à la construction, il était primordial de pouvoir également déterminer les réductions de CO₂ qui seront rendues possibles tout au long de la durée de vie de l'infrastructure et d'évaluer dans quelle mesure celles-ci permettront de compenser l'investissement consenti au départ.

Dès les premières études sur les impacts élargis du réseau du Grand Paris Express sur la mobilité mais également sur le développement économique, social et territorial de l'Ile-de-France, il est apparu que les implications en termes d'émissions de GES étaient multiples et que les outils d'évaluation de ces émissions disponibles (en particulier la méthodologie Bilan Carbone développée par l'ADEME) ne permettaient pas de répondre de manière suffisamment complète aux enjeux très importants du projet.

Dans le cadre de la démarche innovante menée par la Société du Grand Paris depuis le lancement des premières réflexions sur le projet, un consortium de bureaux indépendants a été mobilisé afin de développer un outil spécifique capable de prendre en compte les impacts multiples du projet et d'estimer le plus précisément possible les émissions de GES liées au Grand Paris Express.

Dans l'objectif de s'appuyer autant que possible sur les nombreuses recherches et outils existants en termes d'évaluation des émissions de GES des grands projets et de centrer les efforts sur les spécificités propres au projet du Grand Paris Express, le développement de l'outil a commencé par un benchmark des méthodologies existantes et des éléments pouvant être repris pour le calcul des émissions de GES liées au Grand Paris Express.

Ces éléments constitutifs identifiés, ils ont pu ensuite être combinés, adaptés et complétés pour répondre de manière adéquate aux enjeux multiples du projet. Plus précisément, si les techniques d'évaluation de nombreux facteurs d'émissions étaient disponibles dans la littérature et les méthodologies existantes, il fut nécessaire d'adapter la plupart au contexte francilien et/ou au projet du Grand Paris Express et de les faire évoluer dans le temps. La plupart des méthodologies existantes se basaient en effet sur des moyennes nationales ou internationales qui n'étaient pas toujours adaptées au contexte francilien et étaient développées pour évaluer les émissions d'un projet de court terme avec un effet immédiat sur les émissions de GES. Dans le cas du Grand Paris Express, les impacts sont intrinsèquement liés au contexte territorial de l'Ile-de-France et s'appliqueront davantage sur le long, voire le très long terme, que sur le court terme. L'outil CarbOptimum® propose donc une vision beaucoup plus prospective des émissions de GES que les méthodologies existantes et utilise notamment des facteurs d'émissions évolutifs au cours du temps.

3.2. Méthodologie d'élaboration de l'outil

Les différentes sources d'émissions ont été étudiées en profondeur à travers la littérature et l'élaboration d'une méthodologie d'identification d'impact rigoureuse et spécifique au Grand Paris Express. Il a été question :

- d'identifier les flux de CO₂, positifs et négatifs, directement ou indirectement liés à la réalisation du réseau de transport du Grand Paris,

- de développer la méthodologie pour l'évaluation des postes d'émissions retenus dans le cadre du projet, en ce compris les facteurs d'émission utilisés,
- de calculer et présenter les résultats du CarbOptimum par poste d'émissions (cf. ci-après), d'une part pour les différentes lignes du Grand Paris Express et d'autre part pour le projet dans son ensemble.

Cet outil, prenant la forme d'un calculateur associé à une revue bibliographique et méthodologique, englobe l'ensemble des facteurs d'émissions pertinents du projet et, ce, tant pour la phase de conception et de construction que pour la phase d'exploitation du métro en intégrant les impacts indirects sur le développement du territoire.

Plus précisément, le calculateur consiste en un tableau Excel constitué de plusieurs onglets de calculs inter-liés. La structure des onglets est identique à celle de l'étude le concernant et séparée en cinq thématiques : (1) Etudes et travaux préalables à la construction, (2) Construction de l'infrastructure, (3) Fonctionnement de l'infrastructure, (4) Mobilité en Ile-de-France, (5) Développement territorial.



Figure 2 : Page d'accueil du CarbOptimum

Outre les cinq thématiques, l'outil CarbOptimum reprend les onglets complémentaires suivants :

- 2 onglets de présentation : synthèse des résultats et analyse des résultats,
- 2 onglets de données sous-jacentes au calcul : facteurs d'émissions et valeurs par défaut en matière de construction.

L'outil permet ainsi de visualiser les résultats des bilans ainsi que l'ensemble des facteurs d'émissions utilisés.

3.3. Un outil évolutif permettant un suivi tout au long du projet

Outre les spécificités de cette méthodologie de calcul pour permettre de répondre aux enjeux importants et multiples du projet du Grand Paris Express en matière d'émissions de GES, l'outil devait également permettre d'évaluer le projet à différents stades d'avancement du projet (esquisse, avant-projet, projet) et donc selon différents niveaux de précision. Utilisé initialement dans le cadre des études d'impacts des

dossiers de DUP il a en effet également été complété en phase d'avant-projet et de projet par les maîtres d'œuvre (MOE). L'évaluation de cet outil à plusieurs étapes du projet alimente et enrichit ainsi les réflexions sur les impacts du projet sur les émissions de GES et sur les mesures à mettre en œuvre pour maximiser les effets positifs du projet. Le CarbOptimum® constitue ainsi un outil d'aide à la décision en matière d'émissions de gaz à effet de serre à disposition de la Maîtrise d'ouvrage et des acteurs du projet.



Les **émissions de GES** liées au projet seront ainsi très **variables au cours du temps** : la phase de conception et de construction de l'infrastructure induira des émissions très importantes tandis que la mise en service progressive des différentes lignes, tout en induisant toujours des émissions liées au fonctionnement du métro et des gares, permettra également une réduction des émissions liées à la mobilité en Ile-de-France et au développement du territoire.

La figure ci-après schématise les 5 postes d'émissions de GES du Grand Paris Express et leur taille relative, d'une part pour les émissions induites (conception-construction et fonctionnement) et d'autre part les émissions évitées (mobilité et développement territorial).

Les premières émissions de GES correspondent aux études préalables démarrées dès 2011 et qui se sont principalement déroulées jusqu'en 2017, et dont des extensions de moindre ampleur s'étaleront vraisemblablement jusqu'à la mise en service du dernier tronçon en 2030. Les émissions de construction s'étalent principalement entre 2017 et 2030, et celles liées au fonctionnement augmentent progressivement selon le calendrier de mise en service en 2020, 2024, 2027 et 2030. Les émissions de GES évitées à travers les impacts sur la mobilité et le développement territorial s'étendent progressivement en parallèle avec la mise en service du Grand Paris Express et viennent ainsi contrebalancer directement les émissions liées à son fonctionnement.

L'outil CarbOptimum® a été conçu pour évaluer les émissions induites et évitées de manière continue, année après année permettant ainsi de visualiser les tendances évolutives jusqu'à 20 ans ou 30 ans après les premières mises en service. Bien que les horizons plus lointains soient plus difficiles à prévoir, il va de soi que les incidences positives du projet continueront au-delà de 2070, la durée de vie d'une telle infrastructure dépassant généralement les 50 voire 100 ans de services.

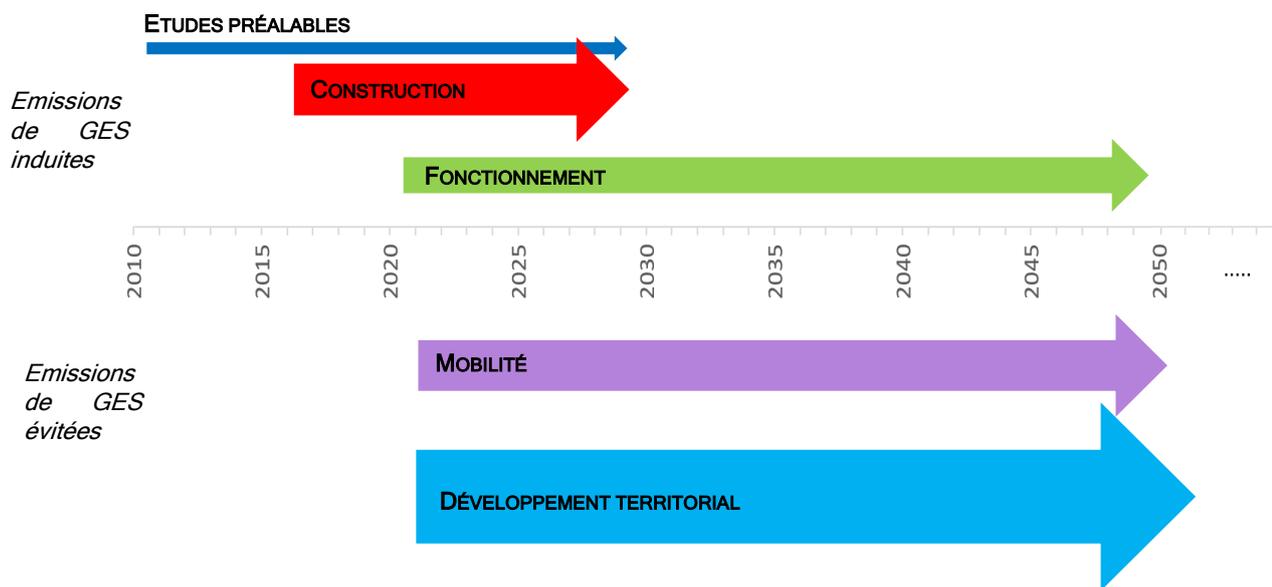


Figure 3 : Principales catégories de postes d'émissions en fonction des différentes phases de réalisation du projet (source : STRATEC 2018)

3.4. Première approche de 2012 et mise à jour de 2018

Une première évaluation des émissions de GES induites et évitées par le projet du Grand Paris Express a été réalisée en 2012 dans le cadre de l'étude d'impact du projet. Cette évaluation se basait sur deux scénarios distincts : un scénario d'hypothèses dites « basses » et un scénario d'hypothèses dites « hautes ». Les hypothèses auxquelles faisaient référence ces scénarios concernent essentiellement les populations et emplois à venir (avec et sans projet du Grand Paris Express).

Les résultats présentés dans l'étude d'impact confirmaient l'influence importante du Grand Paris Express sur les émissions de GES régionales avec une réduction de 27 millions de t_{éq}CO₂ à l'horizon 2050 selon les hypothèses basses et 33 millions de t_{éq}CO₂ selon les hypothèses hautes.

Depuis lors, le projet a été approfondi, chaque tronçon et gare faisant l'objet d'études particulières. Le calendrier de mise en service a également été précisé en fonction de l'avancement des différents travaux. Dans ce cadre, il est utile de mettre à jour le bilan des émissions de gaz à effet de serre en fonction des nouvelles données disponibles, ce qui a été entrepris dans le courant de l'année 2018. Cette mise à jour était également l'occasion de récolter les feedbacks reçus des utilisateurs de l'outil (notamment des MOE), de les analyser et de corriger ou d'améliorer l'outil en fonction des remarques formulées.

Dans le cadre de la mise à jour 2018, il a également été retenu de travailler sur deux scénarios d'hypothèses, appelés A et B. A la différence des scénarios précédemment utilisés qui n'étaient fonction que des prédictions d'évolution de la population et des emplois, il a cette fois-ci été décidé de faire varier les scénarios selon différentes hypothèses qui concernent tant les facteurs d'émissions que les effets du Grand Paris Express. En effet, il faut noter que l'élaboration d'un bilan d'émissions de GES est un exercice intrinsèquement basé sur de très nombreuses hypothèses (notamment concernant les impacts du Grand Paris Express et les facteurs d'émissions) qui contiennent toutes un certain biais possible. Il est donc intéressant d'approcher ce biais par l'introduction d'hypothèses variables et de travailler ainsi par fourchettes de valeurs plutôt que sur base d'un chiffre unique. Le scénario A, partie basse de la fourchette,

retient des hypothèses minorantes tandis que le scénario B, partie haute de la fourchette, retient des hypothèses probablement plus réalistes, en restant prudent et en ne considérant que les impacts du Grand Paris Express communément reconnus et quantifiés. Les études réalisées par la Société du Grand Paris montrent en effet que le Grand Paris Express devrait également induire de nombreux effets indirects notamment sur les changements de comportements de mobilité et sur la façon de se loger et de travailler. Ces modifications de comportement à long terme n'ont pas encore été modélisées et ne sont donc pas prises en compte dans les bilans, alors que leur traduction chiffrée en termes d'économies de GES peut s'avérer considérable dans le long terme.

4. CONCEPTS DE BASE ET METHODOLOGIE

4.1. Etudes et travaux préalables à la construction

4.1.1. Concepts

La réalisation de projets majeurs d'infrastructures de transport requiert de **nombreuses études et travaux préparatoires**. Citons notamment les études de conception, les études environnementales et socio-économiques, les débats et enquêtes publics, les études géotechniques, etc. L'initiation et le suivi du projet nécessitent également un important travail de gouvernance. Ces activités génèrent des émissions diverses liés aux déplacements domicile-lieu de travail des employés, à la consommation énergétique des bâtiments dans lesquels sont réalisés ces études, à l'utilisation de consommables bureautiques et de papier, à l'amortissement du matériel utilisé pour les travaux, aux voyages et déplacements spéciaux, et à l'amortissement des bâtiments.

Dans le cadre du projet du Grand Paris Express, il s'agit notamment des activités de la Société du Grand Paris mais également des études techniques qui ont été réalisées par toute une série de bureaux indépendants.

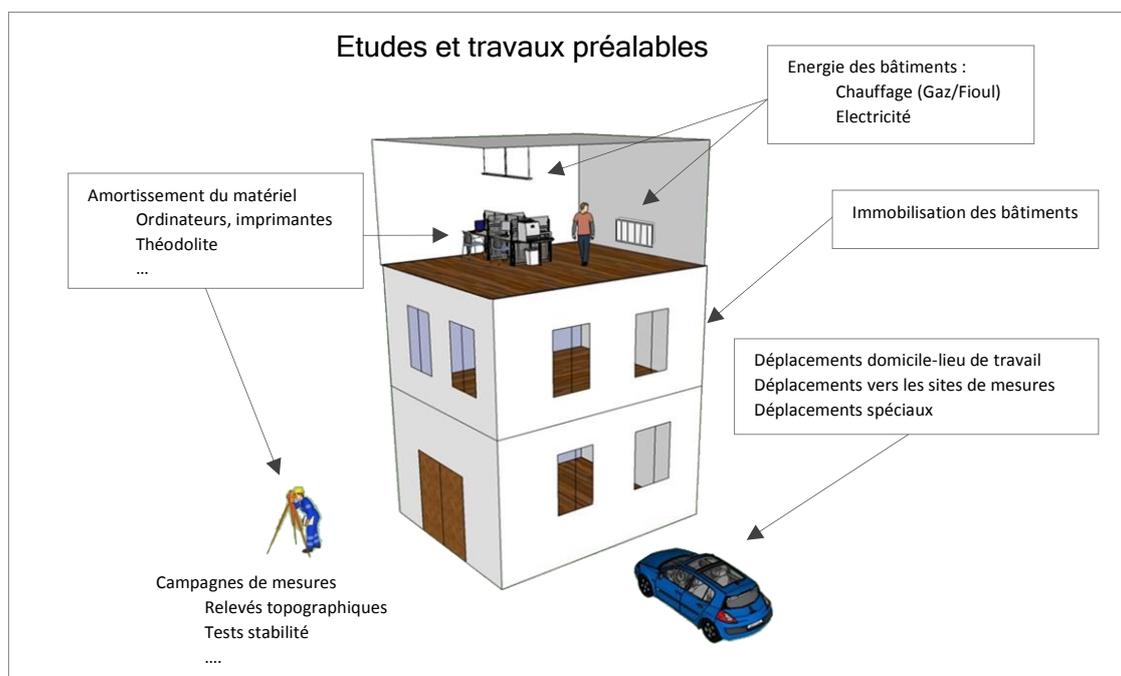


Figure 4 : Représentation des postes d'émissions lors de la phase d'études et de travaux préalables. Source : STRATEC (11-2018)

La majorité des études et travaux préparatoires induits par le projet sont indispensables à sa réalisation tant du point de vue de sa faisabilité (il n'est pas possible de construire une infrastructure de transport sans en avoir des plans détaillés) que du point de vue du respect de la législation (les différentes études d'impacts, et les débats et enquêtes publiques sont obligatoires pour l'obtention des permis de construire l'infrastructure). Les émissions induites par les études et travaux préalables sont donc relativement fixes et il n'est possible de les réduire que de manière limitée grâce à des mesures d'accompagnement.

4.1.2. Méthodologie de calcul

Note : pour tous les détails de la méthodologie nous renvoyons le lecteur vers le rapport d'étude complet d'élaboration de la méthodologie CarbOptimum, annexé intégralement au dossier de DUP de la ligne 15 Sud, 2012, §3.3, page 90)).

Les nombreuses études et travaux préparatoires à la construction de l'infrastructure représentent, au total, plusieurs pourcents du budget total de la mise en place de l'infrastructure et doivent être pris en compte dans le bilan des GES.

Les études et travaux préparatoires étant multiples et variés, il est difficile de réaliser un bilan précis des émissions de GES de chacun d'entre eux. Néanmoins, afin de pouvoir les évaluer à différents niveaux de précision allant d'une évaluation plus précise d'une étude spécifique réalisée jusqu'à une approche tout à fait globale de l'ensemble des études et travaux préalables, trois niveaux d'analyse ont été intégrés dans l'outil CarbOptimum :

- 1 - études et travaux dont les émissions de GES sont connues : dans le cas où les bureaux en charge des études et travaux préalables sont en mesure de communiquer les émissions de GES qu'ils produisent (les entreprises d'une certaine taille ont généralement déjà procédé à une analyse détaillée de leurs activités au travers du Bilan Carbone), les émissions sont alors simplement insérées telles quelles dans le bilan du projet.
- 2 - études et travaux dont les activités précises sont connues mais pas les émissions : les émissions sont alors calculées précisément pour chacun des postes identifiés précédemment (déplacements domicile-lieu de travail des employés, consommation énergétique des bâtiments (chauffage et électricité), intrants et consommables bureautiques, amortissement du matériel utilisé, voyages et déplacements spéciaux, amortissement des bâtiments. Une revue de la littérature a été réalisée pour rechercher les facteurs d'émissions à retenir pour chacun de ces postes.
- 3 - études et travaux dont les émissions de GES et les activités précisées ne sont pas connues : Les émissions sont alors évaluées sur base du coût des études et travaux en utilisant un facteur d'émissions général pour les études et services prestés par les entreprises. Il est alors possible, sur base des budgets alloués aux études et travaux préalables, de déduire globalement les émissions de GES équivalentes.

Etant donné la diversité des études préalables à la construction du Grand Paris Express et de la multitude d'intervenants, c'est la méthode de niveau 3, basée sur les budgets alloués aux études préalables qui a principalement été utilisée pour le calcul des émissions liées au projet de métro.

Plusieurs facteurs d'émissions pour services tertiaires disponibles dans la littérature ont été analysés lors de l'élaboration de l'outil CarbOptimum dont ceux proposés par l'ADEME² et la méthode Defra³. Ces

² Guide des facteurs d'émissions V6.1, ADEME, 2010.

³ Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting, 1€=0.86£.

Ce document est la propriété de la Société du Grand Paris. Toute diffusion ou reproduction intégrale ou partielle est autorisée pour et dans la limite des besoins découlant des prestations ou missions du marché conclu avec le titulaire destinataire.

facteurs d'émissions ont été comparés à des évaluations spécifiques pour finalement retenir un facteur d'émission de 68 grammes eqCO_2 par euro dépensé.

Les facteurs d'émissions proposés actuellement dans la Base Carbone ont par ailleurs été revus à la hausse et sont de 110g eqCO_2 par euro pour les services de conseil et de 170g eqCO_2 par euro pour les services d'ingénierie et de maintenance technique des bâtiments (Base carbone, mai 2019).

Par conséquent, dans la mise à jour du bilan en 2018 il a ainsi été considéré un scénario A basé sur un facteur d'émission de 110g eqCO_2 par euro dépensé et un scénario B basé sur un facteur d'émission de 68g eqCO_2 par euro dépensé.

Etant donné les améliorations constantes de ces services en termes d'efficacité énergétique, il a par ailleurs été considéré une diminution annuelle de 1% de ces émissions.

4.2. Construction de l'infrastructure

4.2.1. Concepts

La construction de l'infrastructure de métro implique principalement des émissions de GES liées aux chantiers des ouvrages d'art (tunnels, viaducs, gares, etc.), y compris le transport et la mise en œuvre des matériaux de construction.

L'analyse a différencié les émissions liées aux consommations énergétiques sur les chantiers, à l'amortissement des engins de chantier, à la fabrication des matériaux utilisés (énergie nécessaire à la production et émissions/absorptions des procédés), au transport des matériaux et des déblais et aux déplacements des travailleurs.

Consommation énergétique sur les chantiers et amortissement des engins

La consommation d'énergie sur les chantiers comprend la consommation d'électricité approvisionnée depuis le réseau, la combustion de différents carburants (fioul pour les engins et groupes électrogènes ; butane et propane pour des chariots, utilisation d'enrobés ou éclairage, etc.).

Les émissions induites par les consommations énergétiques, correspondent non seulement à celles émises sur site mais aussi à celles induites par la production et l'approvisionnement de l'énergie.

La fabrication des engins de chantiers requiert également la consommation d'énergie et de matériaux qui représentent des émissions de GES. Elles sont amorties sur la durée de vie des engins.

Fabrication des matériaux utilisés (énergie consommée et émissions/absorptions des procédés)

La construction d'une infrastructure ferroviaire et des bâtiments associés nécessite de grandes quantités de bétons, de graves, de métaux, etc. La production de ces matériaux génère des émissions de GES liées, d'une part à l'énergie utilisée pour la production (extraction, broyage, chaleur, etc.) qui dépend des moyens mis en œuvre, et d'autre part aux dégazages des ressources exploitées.

Ce poste concerne tant les matériaux mis en œuvre pour produire les infrastructures principales (tunnels et gares) que ceux nécessaires pour la construction du matériel roulant et des bâtiments d'accueil du public ou techniques.

Concernant l'énergie de production, les moyens mis en œuvre pour produire un matériau nécessitent de l'énergie (dite « grise »). Les émissions associées sont généralement ramenées par unité produite : un m^3

de béton, un kilo d'acier, etc. Notons que certains matériaux tels que l'acier peuvent être recyclés ce qui influence nécessairement les émissions induites.

Les émissions/absorptions liées aux procédés concernent principalement le dégazage des ressources exploitées dans le cas de la production de chaux (CaO) ou de ciment. Le chauffage du calcaire (CaCO₃) entraîne en effet un dégazage de CO₂ à une température avoisinant 600°C selon la réaction : CaCO₃ → CaO + CO₂. Le CO₂ relâché dans l'atmosphère étant issu du minerai, il constitue une émission supplémentaire nette (carbone d'origine minérale par opposition à celui d'origine organique pouvant s'inscrire dans un cycle photosynthèse/oxydation).

Transport des matériaux, matériels et déblais

Le transport de matériaux et matériels concerne plusieurs segments :

- L'approvisionnement depuis le lieu de production (matériau) ou d'entreposage (matériels) jusqu'au chantier ;
- Le transport interne éventuel lié au chantier : déplacement d'un site à l'autre du chantier (déblais-remblais, transport de matériels, etc.) ;
- L'expédition depuis le chantier vers les lieux de gestion de déchets ou d'entreposage des matériels.

A nouveau, les émissions comptabilisées correspondent non seulement à la combustion de carburant qui se traduit par des émissions sur le chantier (gaz d'échappements) mais aussi aux moyens mis en œuvre pour extraire, raffiner et transporter le carburant ou l'énergie.

Lorsque le transport de matériaux est important, il est également nécessaire de tenir compte de l'usure des véhicules de transport. Il est alors possible d'évaluer l'impact lié à la fabrication des véhicules au prorata de l'usure correspondant à l'usage qui en est fait.

Transport des travailleurs

Les personnes travaillant sur le chantier s'y rendent et en repartent quotidiennement. Des trajets plus longs peuvent également avoir lieu pour les personnes habitant loin et se rendant dans la région du chantier pour des périodes classiquement hebdomadaires.

Certaines personnes interviennent également ponctuellement autour du chantier (contrôles, conduite de tâches, résolution de blocages, etc.). Les déplacements associés étant davantage ponctuels, ils sont généralement moins optimisés (nombre de personnes par voiture, etc.).

4.2.2. Méthodologie de calcul

Plusieurs outils ont été analysés et évalués quant à leur potentiel d'adaptation pour le calcul des émissions de GES liées à la construction du Grand Paris Express : l'outil Oméga TP, le référentiel GHG Protocol/Initiative Protocoles GES, l'outil GHG Indicator, l'outil Bilan Carbone et le calculateur LGV RFF-SNCF-ADEME. En conclusion de cette analyse, aucun de ces outils n'a été jugé comme suffisamment complet et circonstancié pour le calcul des émissions de construction du Grand Paris Express.

L'outil CarbOptimum a donc été élaboré pour permettre une approche plus complète et adaptée à la construction d'une infrastructure ferroviaire et aux données disponibles.

A nouveau, l'outil a été conçu de manière à pouvoir travailler de manière globale sur des informations générales (par exemple le nombre de kilomètres de tunnel et le nombre de gares) pouvant être

progressivement affiné grâce à la remontée d'informations complémentaires lors des phases de projet et de mise en œuvre.

Dans un premier temps **les facteurs d'émissions liés à l'utilisation des principaux matériaux** (béton, métaux, etc.) qui sont utilisés pour la plupart de ces postes sont décrits ci-dessous. Les paragraphes suivants détaillent ensuite, pour chaque poste, le type de données à introduire dans l'outil pour la réalisation du bilan.

Pour chaque ligne les émissions sont calculées, lorsque cela est pertinent, pour les postes suivants :

- **L'organisation générale du chantier**
- **Les ouvrages souterrains** (tunnels par tunnelier, les tranchées couvertes, les tranchées ouvertes)
- **les ouvrages d'art aériens**
- **les sections de surface**
- **les puits de ventilation**
- **les équipements ferroviaires**
- **les bâtiments et gares**
- **la fabrication des rames**
- **le transport des matériaux**

Notons que l'outil CarbOptimum a été utilisé pour évaluer les émissions de GES liées à la construction du métro au stade d'avant-projet puis il a été transmis et complété de manière plus précise par les MOE des différentes lignes. Ce travail a permis de faire remonter une série d'informations nouvelles et de précisions par rapport aux valeurs reprises par défaut notamment. Ces informations ont ainsi permis lors de la mise à jour 2018 d'affiner la méthodologie d'évaluation des émissions liées à la construction.

4.2.2.1. Facteurs d'émissions liés aux matériaux

Le chapitre ci-après détaille les sources et justifications des facteurs d'émissions retenus dans le calculateur. La définition de chaque facteur d'émission s'est basée sur le recoupement entre plusieurs sources d'informations de renommée scientifique internationale.

Acier

En 2012, un facteur d'émission de 2,2kg eqCO_2 par kg d'acier utilisé avait été retenu sur base d'un benchmark de publications internationales (principalement Bilan Carbone[®], EcoInvent 2.0, Norgate et al.⁴, ICE-Université de Bath). Ce facteur d'émission correspondait à la valeur préconisée par l'ADEME au travers de la méthodologie Bilan Carbone[®] qui était généralement plus élevée que les autres valeurs proposées dans la littérature (démarche prudente).

Depuis lors, la valeur préconisée par l'ADEME dans la Base Carbone a été revue à la baisse. En effet, la Fédération Professionnelle des Entreprises du Recyclage (FEDEREC)⁵ a publié un bilan environnemental du recyclage en 2017, en se basant sur la méthode d'analyse de cycle de vie pour les filières de recyclage fortement représentées sur le marché français. Parmi les filières analysées, les émissions de GES liées à la fabrication de l'acier ont été analysées à partir de matière première « vierge » et « renouvelable ». Les résultats par kg d'acier collectés donnent un facteur d'émission de 2,2 kg eqCO_2 / kg pour l'acier issu de la matière primaire, et 0,938 kg eqCO_2 / kg pour l'acier recyclé (incertitude sur ces facteurs d'émission

⁴ "Assessing the environmental impact of metal production processes", T.E. Norgate*, S. Jahanshahi, W.J. Rankin, 2006.

⁵ FEDEREC. Evaluation environnementale du recyclage en France selon la méthodologie de l'analyse de cycle de vie - Rapport final. Mars 2017.

estimée à 10%). Le taux moyen de recyclé dans l'acier produit étant de 47% sur le marché français (source : Eco-Emballages), un facteur d'émission moyen de **1,6 kg éqCO₂ / kg pour l'acier** a été retenu lors de la mise à jour 2018.

Ciments, bétons et mortiers

Un béton est composé de ciment (clinker et produits d'ajouts), de sable, de grave (granulat) et d'eau avec éventuellement une matrice de ferrailage en acier. Les qualités mécaniques du béton dépendent du dosage respectif de chacun des composants, et en premier lieu du ciment. Des adjuvants peuvent également être employés.

Les facteurs d'émissions obtenus pour le ciment (Portland : Type I) sont relativement cohérents selon les différentes sources consultées au niveau international (de 0,77 à 0,99 kg éqCO₂ / kg selon la base d'analyse de cycle de vie Ecolnvent 2.0, selon Infociment, selon la méthode Bilan Carbone®/Base INIES et selon base de l'Université de Bath, en partenariat avec Carbone Trust®).

Les valeurs rencontrées pour les bétons diffèrent nettement plus, de 209 kg éqCO₂/m³ pour un béton avec un ciment de type II (base de données INIES) à et 362 pour un béton C40/50 (université de Bath, en partenariat avec Carbon Trust).

Il convient également de distinguer les différents types de bétons et leurs caractéristiques. La classification CXX/YY exprime la résistance du béton en N/mm² (XX : pour déterminer la sécurité structurale ; YY : résistance minimale constatée sur un cube 15/15 à 28 jours de séchage).

L'ADEME préconise les valeurs suivantes pour les ciments et les bétons :

- Ciment :
 - Ciment portland (Type I) : **0,866 kg éqCO₂ / kg** en accord avec l'ACV de l'ATIL (Association Technique de l'Industrie des Liants hydrauliques)⁶ sur laquelle une revue critique a été réalisée en 2011 ;
 - Ciment de type II à X% de Clinker : 0,866 x X% / 95%. Par défaut, 80% de clinker pour un type II, soit **0,729 kg éqCO₂ / kg** ;
- Béton :
 - 220 kg éqCO₂ / m³ pour un béton C25/30 (Lafarge : Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques), en tenant compte d'une densité de 2,5 tonnes/m³ de béton.

En maintenant constant les ratios avancés par l'université de Bath en partenariat avec Carbon Trust pour les différents types de béton, les valeurs suivantes ont été retenues lors de la mise à jour 2018 : **195 kg éqCO₂/m³** pour un béton C16/20, **209** pour un béton C20/25, **220** pour un béton C25/30, **234** pour un béton C28/35, **257** pour un béton C32/40, **294** pour un béton C40/50 et **325** pour un béton C50/60.

Si la composition des bétons est connue, l'outil CarbOptimum permet de calculer automatiquement les émissions. Si le type de béton n'est pas précisé, du béton C32/40 est retenu par défaut pour le béton des murs et des dalles supérieures des tranchées couvertes et des sections souterraines, ce qui a par ailleurs été validé par le MOE de la L18. Par ailleurs, du béton de type C25/30 est retenu par défaut pour les équipements ferroviaires, ce qui a été validé par le MOE de la L15 Ouest. Enfin, du béton de type C40/50 est finalement retenu pour les voussoirs, après recommandations des MOE des L15 Ouest, L15, L17 et L18.

⁶ Module d'information environnementale de l'ATILH édité en juin 2011.

Béton armé

Pour le béton armé, il a été tenu compte d'un acier à faible technicité dont le facteur d'émission est inférieur à l'acier standard. Sur base des facteurs d'émission issus de l'étude LGV Rhin-Rhône et ceux de l'université de Bath, il a été choisi de raisonner en volume de béton plutôt qu'en masse et en linéarisant. En tenant compte de la différence de densité entre un béton et un béton armé et d'un taux de recyclage de 60% généralement observé pour le béton armé, il convient d'ajouter **145 kg éqCO₂ / m³** de béton **pour chaque 100 kg** de ferrailage par m³ de béton.

La construction de l'infrastructure se déroulant sur une période relativement courte, les améliorations technologiques qui pourraient augmenter l'efficacité énergétique des travaux ne devraient pas influencer les émissions de plus de quelques pourcents. Cette variation étant largement inférieure au degré d'incertitude sur les facteurs d'émissions de la construction, les facteurs d'émissions ont été maintenus constants au cours du temps.

4.2.2.2. Organisation générale du chantier

Les consommations énergétiques liées à l'organisation des chantiers concernent principalement les déplacements des travailleurs ainsi que l'électricité issue des groupes électrogènes et du réseau notamment pour les bases-vies.

Déplacements des personnes

Le paramètre d'entrée principal est la durée du chantier et le nombre moyen d'employés (pour en déduire le nombre d'hommes.semaines).

La prise en compte des émissions liées au chantier est automatisée dans le CarbOptimum. L'utilisateur peut y rentrer le nombre de semaines du chantier et le nombre d'employés, mais dans le cas où ceux-ci ne sont pas connus, des valeurs sont proposées par défaut. Celles-ci sont calculées sur la base du linéaire (de tunnel, tranchée couverte et ouverte, viaduc et sections de surface) pour les différentes lignes, ou sur la base des superficies de bâtiments de surface ou souterrains pour les centres d'exploitation et de maintenance.

Les émissions associées au transport des personnes travaillant sur le chantier sont déterminées à partir : de la part des travailleurs en grands déplacements, de la part modale de la voiture particulière pour les déplacements domicile-travail et les grands déplacements hebdomadaires, des distances parcourues pour les déplacements domicile-travail et les grands déplacements hebdomadaires ainsi que du taux d'occupation moyen des voitures particulières.

Ces paramètres permettent de définir un facteur d'émissions global lié aux déplacements par personne et par jour, puis de calculer les émissions du poste « déplacements des personnes » en le multipliant par le nombre de personnes travaillant sur les chantiers et la durée des chantiers. Le tableau ci-dessous détaille les valeurs retenues par défaut pour ces différents paramètres.

Tableau 1 : Hypothèses concernant les déplacements de personnes

	Paramètres		Valeur par défaut
	Déplacements des personnes	Domicile Travail	Part de la voiture	75 %
Taux d'occupation des voitures			1,1
Distance moyenne au chantier			20 km
Nombre d'AR par semaine			10
Grands déplacements		Part des travailleurs en grands déplacements	20 %
		Part de la voiture pour le retour hebdomadaire	50%
		Taux d'occupation des voitures Retour hebdomadaire	1,1
		Distance moyenne Retour hebdomadaire	400 km
		Nombre d'AR par semaine	1

Le marché de l'emploi en Ile-de-France est a priori suffisamment étoffé pour que la grande majorité des personnes travaillant sur le chantier du métro puissent venir de la Région. C'est pourquoi la part des travailleurs en grands déplacements a été définie à une valeur assez basse de 20 %, mais une distance domicile-travail plutôt élevée de 20 km (elle est de 14,7 km en moyenne au niveau national). Par ailleurs, la valeur de la part de la voiture particulière pour le domicile-travail correspond au chiffre de l'Enquête Nationale Transport Déplacements 2008 (ENTD 2008) pour les travailleurs habitant en Grande Couronne. Le taux d'occupation des voitures à 1,1 est la valeur de référence (ADEME) pour les trajets pour motif travail.

Enfin, étant donné l'offre ferroviaire en Région Parisienne, il a été considéré que la moitié uniquement des personnes effectuant des grands déplacements retourne chez eux en fin de semaine en voiture. La distance moyenne de ce retour, 400 km, permet d'englober les grands marchés d'emplois hors Ile-de-France.

Il a également été retenu comme hypothèse que les personnes n'utilisant pas leur voiture pour leurs déplacements utilisent le RER ou le métro pour le Domicile-Travail et le train pour les Grands Déplacements. Tous les travailleurs (y compris les grands déplacés) ont par ailleurs été considérés comme faisant 10 allers-retours par semaine entre leur domicile (ou le lieu d'hébergement) et le lieu de travail.

Les facteurs d'émissions des moyens de transport utilisés sont ceux de Bilan Carbone® : 256 g $\text{eqCO}_2/\text{véh.km}$ pour la voiture particulière (moyenne France), 25 g $\text{eqCO}_2/\text{pass.km}$ pour le train (moyenne France), et 5,7 g $\text{eqCO}_2/\text{pass.km}$ pour le métro/RER.

Avec les hypothèses retenues, le travailleur moyen parcourt chaque semaine 210 km en voiture, 50 km en RER ou métro et 80 km en train. Il en résulte un facteur d'émissions global du transport de personnes de 11,2 kg eqCO_2 par personne et par jour travaillé de chantier.

Base vie

Le poste Base-vie concerne les émissions associées à la consommation énergétique dans la base-vie nécessaire au chantier. Selon la réglementation, pour un chantier comme celui du métro du Grand Paris, les employés doivent bénéficier d'un local avec armoires d'une surface supérieure à 1,25 m^2 /personne et d'un local repas d'une surface supérieure à 1,5 m^2 /personne. En prenant en compte les sanitaires et les postes secours, on peut considérer une surface en abri de chantier de 3 m^2 par personne.

Par ailleurs, selon Bilan Carbone[®], la consommation annuelle moyenne des bâtiments chauffés à l'électricité est de 283 kWh/m² pour les bureaux et de 254 kWh/m² pour les cafés/hôtels/restaurants.

Etant donné qu'un abri de chantier ne dispose pas de tous les équipements d'un local classique mais est a priori plus consommateur en chauffage (moindre isolation), nous retenons la valeur de 250 kWh/m². On obtient ainsi une consommation d'électricité de 750 kWh par travailleur par an.

4.2.2.3. Ouvrages d'art souterrains (tunnels, tranchées couvertes et tranchées ouvertes)

Les sections souterraines du métro du Grand Paris Express seront en très grande majorité réalisées par tunneliers. L'outil CarbOptimum a néanmoins été conçu pour pouvoir également prendre en compte l'utilisation de techniques différentes en particulier celles de la tranchée couverte (ouverture de la tranchée depuis la surface, couverture et remblaiement) et de la tranchée ouverte.

Ce poste comprend l'estimation des quantités de matériaux nécessaires prises en compte dans le bilan des émissions de GES selon les facteurs d'émission présentés au point précédent ainsi que les consommations énergétiques des tunneliers et des engins de chantier. Elle inclut également les matériaux nécessaires au soutènement des équipements ferroviaires (voussoirs, murs, dalles et radier béton réalisé en fond de tunnel ou de tranchée).

Les schémas ci-dessous présentent les éléments des tunnels et tranchées :

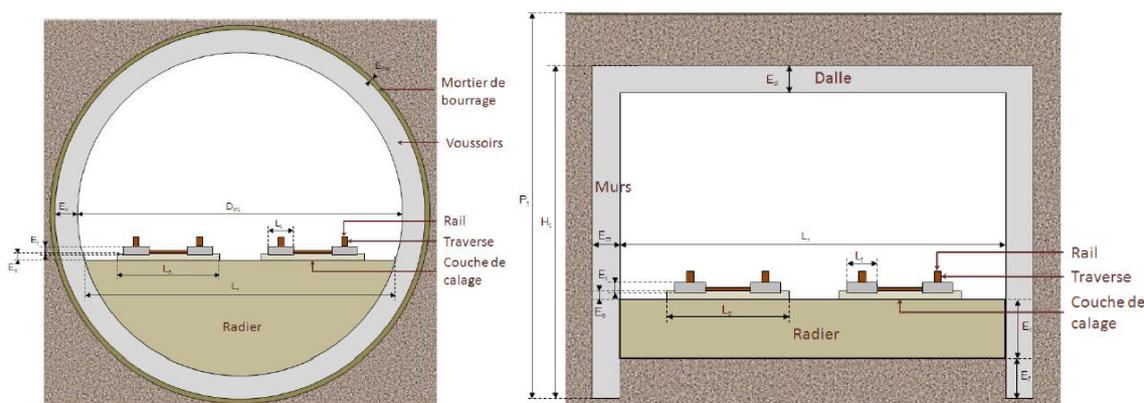


Figure 5 : Schéma d'une vue en coupe et dimensions prises en compte dans l'outil CarbOptimum pour les tunnels (à gauche) et pour les tranchées couvertes (à droite) (source : STRATEC, Méthodologie de calculs des émissions, rapport de phase 2, 2012)

Le diamètre intérieur des tunnels du métro du Grand Paris devrait être généralement compris entre 8 et 9 mètres. Le diamètre intérieur repris par défaut dans l'outil est de **8,2 m** pour un tunnel de métro monotube.

Les valeurs par défaut reprises pour les tranchées couvertes sont **10 m** de profondeur, **7 m** de hauteur, **7,4 m** de largeur du radier, **0,4 m** d'épaisseur des murs, **0,8 m** d'épaisseur de la dalle supérieure, et **1,5 m** d'épaisseur de la couche de fond. L'estimation des émissions liées à la construction des tranchées ouvertes reprend un paramétrage semblable aux tranchées couvertes, à l'exception de l'absence de dalle supérieure et d'un volume de déblais et remblais équivalent par hypothèse à la moitié de celui d'une tranchée couverte.

Le volume de voussoirs est déterminé à partir du diamètre intérieur des tunnels et de l'épaisseur des voussoirs. Sur base des retours d'expériences issus de la littérature, la valeur retenue par défaut est une

épaisseur de 40 cm pour les voussoirs. Cette valeur a été validée lors de la consultation des MOE en 2018 (repris à 0,4 pour la L16 et réestimé à 0,38 pour la L17 N).

En ce qui concerne le radier, il remplit le fond du tunnel ou de la tranchée de façon à obtenir une plateforme (largeur fixée à 7,4 mètres par défaut dans l'outil). Pour le calcul, un béton C25/30 avec 100 kg de ferrailles par m³ ce qui représente alors un facteur d'émission de **0,365 t éqCO₂/m³** de radier.

La coupe d'un tunnelier n'étant pas nette, un mortier de bourrage doit être injecté entre le sol et les voussoirs pour combler l'espace vide et éviter tout tassement de terrain ou mouvement des voussoirs. Par hypothèse, il a été considéré une injection de mortier uniforme de **20 cm tout autour des voussoirs**. La composition de ce mortier de bourrage est très variable et dépend du sol rencontré. Cependant, le facteur d'émissions varie peu en fonction de la composition. Par défaut le facteur d'émissions retenu est égal à **0,375 t éqCO₂/m³** pour le mortier de bourrage.

La consommation énergétique associée aux percements des tunnels et creusement des tranchées est évaluée à partir des volumes excavés pour les tunnels, des volumes déblayés et remblayés pour les tranchées, des consommations unitaires des engins de chantiers et des tunneliers par m³ déplacés. Le déplacement de ces matériaux de chantier à chantier ou vers des centres de stockage est pris en compte dans le poste Fret.

Pour les consommations unitaires, des ratios par défaut ont été retenus :

- **1 litre de fioul par m³** déblayé ou remblayé (chiffre retenu dans le cadre du bilan carbone de la LGV Rhin-Rhône). Ce ratio de consommation est désigné dans l'outil CarbOptimum comme la performance énergétique de la pelle mécanique pour le creusement et le remblaiement. Cette performance a été validée par le MOE de la L18 ;
- Pour les tunnels spécifiquement : **20 kWh par m³** excavé, valeur médiane des consommations des différents tunneliers que nous avons analysés, et du même ordre de grandeur que celle du tunnelier qui a creusé le Duplex A86 dans le sous-sol francilien (18 kWh par m³), donc dans des conditions qui devraient s'approcher de celles rencontrées dans le cas du métro du Grand Paris.

Les volumes excavés ou déblayés dépendent principalement de la profondeur des ouvrages et de leurs dimensions extérieures. Après transport (poste Fret), ces matériaux peuvent être à nouveau pelletés pour remblayer ou pour être stockés. Nous considérons que **50 % des matériaux déplacés sont pelletés** après transport.

***Note :** Ces valeurs correspondent respectivement au gabarit d'un tunnel pour métro monotube ou d'une tranchée double voie. Dans les endroits où un tunnel bitube est envisagé, les valeurs du diamètre, de l'épaisseur des voussoirs et de la largeur de la plateforme ont été adaptés.*

4.2.2.4. Ouvrages d'art aériens

Peu utilisés dans le cadre du Grand Paris Express, les facteurs d'émissions relatifs à la construction d'ouvrages d'art aériens qui ont été retenus sont :

- Viaduc bi-poutre métallique, pile béton, tablier béton : **23 000 t éqCO₂/km** (2 voies),
- Viaduc pile acier à remplissage béton, tablier béton : **24 000 t éqCO₂ /km** (2 voies),
- Pont rail (2 voies) : **350 t éqCO₂/Unité**,
- Pont route : **420 t éqCO₂/Unité**,

- Saut de moutons : **2 570 t_{éq}CO₂/Unité**.

4.2.2.5. Sections de surface

Le facteur d'émissions associé à la construction de voies ferroviaires en surface comprend un poste lié à la consommation énergétique du terrassement et un poste relatif aux matériaux (chaux utilisée pour le traitement des sols essentiellement).

Nous prenons comme hypothèse de base un déblayage/remblayage moyen de 6 mètres d'épaisseur par mètre linéaire pour une plateforme de 8 mètres de large, soit 48 m³ par mètre linéaire de plateforme. Le transport des matériaux entre site ou vers des centres de stockages est pris en compte dans le poste d'émissions Fret. Le volume déblayé ou remblayé retenu par défaut est donc de **48 000 m³** par kilomètre de plateforme (2 voies), ce qui correspond à raison d'un litre de fioul par m³ à une consommation énergétique de **48 000 litres de fioul**.

Ces valeurs sont retenues après analyse du volume de matériaux déplacés pour la constitution d'un kilomètre de plateforme en surface, l'outil réalisé par Réseau Ferré de France, l'ADEME et la SNCF dans le cadre de la LGV Rhin-Rhône, en choisissant des valeurs inférieures étant donné qu'un projet de métro nécessite des zones de déblai ou de remblai a priori moins importantes qu'une ligne à grande vitesse.

La constitution d'une plateforme de surface nécessite par ailleurs un traitement des matériaux terrassés (de 20 à 30 %) au liant hydraulique constitué en partie de chaux (entre 2 et 4% d'après l'outil bilan carbone de la LGV Rhin-Rhône), chaux dont le facteur d'émission est élevé (1,1 kgCO₂/kg). En considérant qu'un m³ de matériau a une masse de 1,8 tonne, un traitement avec un taux de chaux à 2 % nécessite 36 kg de chaux, ce qui correspond à **40 kg éqCO₂ par m³** de matériau traité à 2%. Ce pourcentage massique a été confirmé par les MOE des L17 et L18. Sur la base de 48 000 m³ déblayé ou remblayé par km, avec 25 % des volumes traités, le traitement à la chaux implique l'émission de **475 t éqCO₂ pour un kilomètre de plateforme terrassée**.

Dans les sections en surface, l'implantation du métro entraînera un changement d'usage des sols à terme (passage d'un écosystème forestier ou prairie à une surface artificialisée), la quantité de carbone présente dans la végétation et dans le sol se trouve modifiée. Le facteur d'émission de déstockage retenu est de 383,7 t éqCO₂ / ha (biomasse + sol). Les surfaces concernées dans le cadre de la construction de l'infrastructure étant relativement limitées, on ne tiendra pas compte dans cette partie de la suppression du potentiel d'exploitation de ces surfaces naturelles à des fins de production d'énergies vertes. Nous nous baserons sur une emprise de 8 m de largeur pour une section de deux voies (4 m pour une voie unique). Sur cette base, nous obtenons un facteur moyen de changement d'usage des sols de 383.7 x 1000 x 8 / 10000 = **307 t éqCO₂ / km** pour deux voies en surface (**154 t éqCO₂ / km** pour une voie).

4.2.2.6. Puits de ventilation

Les émissions liées à la construction des puits d'une ligne peuvent être calculées à partir du nombre de puits et d'un paramétrage par défaut. Les valeurs par défaut sont reprises des suggestions du MOE de la ligne 15 Est : 21 m de hauteur intérieure finale, 15 m de largeur intérieure finale, 0,8 m d'épaisseur de la dalle supérieure et 1 m d'épaisseur de radier.

4.2.2.7. Equipements ferroviaires

Comme pour les autres postes, l'outil intègre des valeurs par défaut pour les équipements ferroviaires sur la base du linéaire comptabilisé pour les tunnels, les tranchées, les ouvrages d'art qui peuvent être précisées si nécessaire. Les équipements ferroviaires ne relevant pas de la compétence de la MOE Infrastructure, peu d'informations sont remontées après l'utilisation de l'outil CarOptimum par les MOE.

Les facteurs d'émissions ont donc peu évolué lors de la mise à jour 2018. Ils avaient été définis dans l'outil CarOptimum à partir de l'analyse de facteurs d'émissions de plusieurs études comme suivant :

- **Voie sur ballast** : 32,3 t éqCO_2 par kilomètre de voie simple ;
- **Voie sur dalle béton** : couche de calage de 2,8 mètres de large pour chacune des voies et 20 cm d'épaisseur, constituée de béton C25/30 à 100 kg de ferrailage par m^3 ;
- **Traverses** : 76,7 t éqCO_2 pour chaque kilomètre de voie ferrée construit ;
- **Système de fixation du rail** : 8,5 kg éqCO_2 par système de fixation, soit 17 kg éqCO_2 pour les deux systèmes de fixation d'une traverse, ou encore 28,3 kg $\text{éqCO}_2/\text{ml}$ pour une voie à raison d'une traverse tous les 60 cm ;
- **Rail** : 264 t $\text{éqCO}_2/\text{km}$ pour une seule voie, pour deux rails et un facteur d'émissions de l'acier de 2,2 kg éqCO_2 par kg d'acier et à partir d'une masse standard d'un rail de 60 kg au mètre linéaire., on obtient un facteur d'émission des rails ;
- **Pistes de roulement** : 400 kg $\text{éqCO}_2/\text{ml}$ pour une voie, soit pour deux pistes de roulement, hors traverses et pièces de fixation, à partir du facteur d'émissions générique défini pour l'acier, soit 2 20 0 $\text{kgCO}_2/\text{e}/\text{t}$;
- **Troisième rail et barres de guidage** : 204 t $\text{éqCO}_2/\text{km}$ pour 2 barres de guidage d'une seule voie (ou 102 t $\text{éqCO}_2/\text{km}$ pour un seul troisième rail d'une seule voie), à partir du facteur d'émissions générique défini pour l'acier ;
- **Caténaires** : 39,1 kg éqCO_2 par mètre linéaire de caténaire rigide ;
- **Câblage courants forts et courants faibles** : 9,91 t éqCO_2 par km de voies ferrées.

Par ailleurs, les **appareils de voie** désignent l'ensemble des dispositifs de branchement entre les voies (ou aiguillages), traverses (ou croisements), traverses à jonction simple ou double ainsi que les taquets d'arrêt, taquets dérailleurs et appareils de dilatation. Les taquets et appareils de dilatation n'entraînent pas de suppléments significatifs sur les masses de matériels installés et ne sont donc pas pris en compte. Les branchements et les différents types de traversée entraînent la mise en œuvre supplémentaire d'aiguilles, de cœur de croisement, de contre-rails... sur des traverses renforcées et plus larges. Schématiquement, cela correspond à un doublement des équipements mis en œuvre pour les voies (traverses, dispositifs de fixation, rails). Nous compterons une **double longueur du linéaire des appareils de voies** (soit la prise en compte du mètre de chaque voie, bien que non indépendante) pour en tenir compte.

4.2.2.8. Gares et bâtiments

Il existe plusieurs types de gares : aériennes, souterraines et de surface. CarOptimum permet d'entrer les valeurs relatives aux différents types de gares en tenant compte des recommandations suivantes :

- **Gares aériennes** : le linéaire des sections de surface est augmenté pour intégrer le viaduc. Les superficies des gares aériennes sont à intégrer avec celles des gares de surface ;
- **Gares souterraines** : Les gares souterraines avec une partie émergente en surface sont considérées comme gares souterraines uniquement pour leurs parties souterraines ;
- **Gares de surface** : Les émergences en surface des gares souterraines ont été considérées comme des bâtiments en surface (et non comme des parties supérieures de bâtiments souterrains).

Après analyse de différentes sources internationales (guide de l'ADEME et du CSTB sur le contenu carbone des bâtiments et facteurs d'émissions de bâtiments à structure béton divers), les valeurs suivantes ont été retenues :

- Pour les bâtiments à structure béton d'une hauteur sous plafond standard (inférieure à 3,5 m), la valeur retenue est de **500 kg éqCO₂/m²** de surface de plancher ;
- Pour les bâtiments comportant des hauteurs sous plafond supérieures à 3,5 m, le facteur d'émission retenu est égal à **167 kg éqCO₂/m³** ;
- Pour les bâtiments à structure métallique, un facteur d'émission de **180 kg éqCO₂/m²** de surface de plancher pour les hauteurs sous plafond inférieures à 3,5m et **60 kg éq CO₂/m³** au-delà.

Les bâtiments souterrains réalisés en tranchée couverte intègrent de manière supplémentaire l'énergie consommée pour le déblai et remblai des matériaux.

Les quais réalisés dans le cadre de gares souterraines sont à considérer dans les surfaces prises en compte dans la surface de plancher. Les matériaux (bétons) étant similaires à ceux de la structure du bâtiment, on considérera en premier ordre que l'habillage intérieur restreint des gares compense le surplus de matériaux lié aux contraintes physiques et aux volumes des quais.

Lorsqu'ils sont réalisés en extérieur, les quais sont à intégrer de manière supplémentaire. En considérant l'étude Bilan Carbone de la LGV Rhin-Rhône, un double quai (de part et d'autre des voies de circulation) mesurant chacun 5,5m x 120m aura un impact de **150 t éqCO₂** pour les matériaux de réhausse, leur traitement et mise en œuvre, le revêtement de quai et les bordures.

4.2.2.9. Fabrication des rames

Les émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication des rames dépendent principalement de la masse des rames choisies et des matériaux les constituant.

L'analyse des types de rames envisageables montre que la plupart sont composées d'un alliage d'aluminium comme constituant principal, et que la masse d'une rame est proportionnelle à sa longueur. Le métro du Grand Paris Express devrait bénéficier de rames de grande longueur, de l'ordre de 120 mètres ce qui équivaldrait à une masse d'environ 187 tonnes par rame.

Si l'aluminium est le constituant principal d'une rame, un très grand nombre d'autres matériaux, inconnus aujourd'hui, seront mis en œuvre. Le poste est donc simplifié en prenant comme hypothèse que l'ensemble de la rame est constitué d'aluminium.

Le facteur d'émissions de l'aluminium étant, dans les hypothèses retenues, de 6,1 t éqCO₂/t, le facteur d'émission total retenu est de **1 140 téqCO₂ par rame**.

4.2.2.10. Transport des matériaux

Le transport de matériaux et matériels peut être réalisé par différents modes de transport (maritime, fluvial, ferroviaire, routier ou aérien). L'approche la plus précise consiste à se baser sur la consommation énergétique (litre de carburant, kWh électrique, etc.) mais des ratios permettent d'estimer la consommation à partir des distances parcourues (et des taux de chargement pour les moyens routiers).

Cependant, les chargements sont bien souvent mutualisés, nécessitant de prendre en compte cette consommation énergétique au prorata du chargement. Cette règle de répartition a été définie en fonction de la distance parcourue d'une part (plus le matériau voyage sur une longue distance, plus l'impact associé sera important), et en fonction de la masse transportée d'autre part (plus la quantité de matériaux transportés est grande, plus l'impact associé sera important). Au lieu de se baser sur une distance parcourue, le calcul se base alors sur un flux logistique exprimé en tonne.km. Ce flux logistique est calculé par le produit de la masse transportée par la distance sur laquelle elle est transportée : p.ex. un voussoir de 4 tonnes transporté sur 200 km aura un flux logistique de 800 t.km.

Les facteurs d'émissions associés (issus du Bilan Carbone et confirmés par le GHG-Protocol) sont les suivants :

- **Transport maritime** (vraquiers) : **3,2 g éqCO₂/t.km**
- **Train français** (moyenne thermique et électrique) : **17,5 g éqCO₂/t.km**
- **Train européen** (moyenne thermique et électrique) : **22,6 g éqCO₂/t.km**
- **Transport fluvial** (barges et péniches de capacité 1000t) : **40 g éqCO₂/t.km**
- **Semi-remorque sur trajets nationaux et internationaux**, (aller à 80% de la charge utile (20t), retour optimisé selon moyenne française (20% à vide)) : **81 g éqCO₂/t.km**
- **Semi-remorque sur trajets locaux** (aller à 80% de la charge utile (20t), retour à vide) : **118 g éqCO₂/t.km**

Lorsque les distances parcourues pour évacuer les déblais ou acheminer des matériaux ne sont pas connues, l'outil CarbOptimum permet de prendre des distances par défaut. Ces valeurs sont les suivantes :

Tableau 2 : Distances moyennes parcourues pour l'évacuation des déblais ou l'acheminement des matériaux lorsque les valeurs exactes ne sont pas connues (valeurs reprises par défaut).

	Déblais	Voussoirs	Mortier	Radier	Béton armé	Traverses et rails
km en poids-lourd local	50	39.36	39.36	39.36	39.36	0
km en poids-lourd national	0	185	0	20	30	500

Lorsque les distances de provenance des matériaux sont connues, il convient de les prendre en compte. Dans l'outil CarbOptimum, des distances moyennes ont été estimées pour les différentes lignes afin de respecter la répartition de l'évacuation des déblais entre les modes de transport, communiquée par la SGP pour chacune des lignes du Grand Paris Express.

4.2.3. Sensibilité et scénarios

Comme décrit ci-dessus, les émissions liées à la construction proviennent d'une multitude d'éléments (matériaux utilisés, utilisation de machines, déplacements des ouvriers, etc.) pour lesquels il existe toujours un biais possible tant en ce qui concerne la quantification du poste qu'en ce qui concerne le facteur d'émission associé. La multitude d'éléments pris en compte rend donc difficile la définition de scénarios en faisant varier chacun des impacts identifiés ou en faisant varier chacun des facteurs d'émissions retenus.

Néanmoins, la multitude d'éléments intervenants et donc de biais pouvant être positifs comme négatifs assure au final une certaine constance des résultats globaux, les biais opposés s'annulant entre-eux.

Dans le cadre de l'étude d'impact, plusieurs configurations du métro (variantes) ont par exemple été analysées. Le bilan des émissions de GES avait alors montré que les différentes configurations avaient peu d'effet sur les émissions globales liées à la construction (+/- 0,4%). La mise à jour 2018 montre également que les ajustements de différents paramètres n'affectent que de manière limitée les résultats issus du bilan (+ 1,25%). Sur base de ce constat, il paraît cohérent de considérer dans la mise à jour du bilan en 2018 un scénario A correspondant à la valeur moyenne +2% et un scénario B correspondant à la valeur moyenne -2%.

4.3. Fonctionnement

4.3.1. Concepts

De nombreux flux de gaz à effet de serre seront liés au fonctionnement de l'infrastructure du Grand Paris Express. Il s'agit principalement de la **consommation d'énergie et de tous les intrants liés au fonctionnement des trains et des gares.**

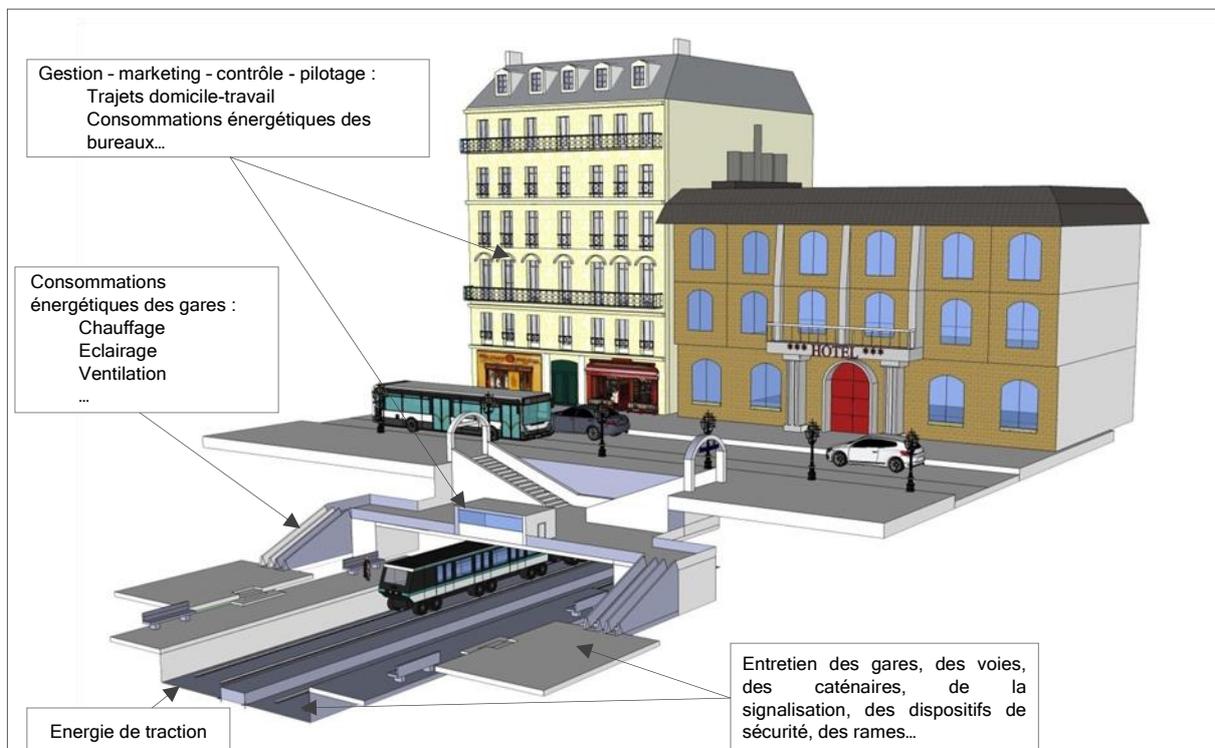


Figure 6 : Représentation des postes d'émissions induites par le fonctionnement du métro - Source : STRATEC, 2011

Plus précisément, les composantes en jeu sont :

- L'énergie de traction, nécessaire au mouvement des trains :
Les rames de transport de voyageurs sont mues en recourant à l'électricité. Les différentes fonctions à bord sont assurées par cette même énergie, parfois transformée (air comprimé pour le freinage, chaleur ou froid pour le confort thermique, etc.).
- La consommation en énergie des bâtiments :
Les gares (éclairage, chauffage-climatisation, ventilation naturelle, etc.), les bâtiments d'accueil du public, de gestion et techniques (atelier de maintenance, etc.) consomment de l'électricité et éventuellement des combustibles.
- Les émissions induites par toutes les activités de gestion, de marketing, de contrôle, de pilotage, etc.
Ces émissions concernent la plupart des postes mentionnés dans les études préalables à la construction de l'infrastructure, c'est-à-dire : les trajets domicile-travail des employés (agents de conduite, agents de maintenance, régulateurs, etc.), les consommations énergétiques des bureaux, l'amortissement du matériel et de l'immobilier.
- Les émissions liées à l'entretien et renouvellement de l'infrastructure :
L'infrastructure ferroviaire, les bâtiments et le matériel roulant demandent un entretien continu tout au long de leur durée de vie avec des consommations de pièces de remplacement, de produits d'entretien, etc. Des opérations plus importantes de rénovation ou de renouvellement sont parfois aussi nécessaires.

Les caractéristiques de l'ouvrage qui influencent les émissions liées au fonctionnement sont donc principalement :

- Le nombre de gares et leur configuration architecturale (volume, type de bâtiment, profondeur de l'ouvrage, isolation, etc.) ;
- La configuration technique du futur métro (vitesse commerciale, technologie de roulement, etc.) en ce qui concerne l'énergie de traction nécessaire à son fonctionnement ;
- Le type et l'origine des énergies utilisées.

4.3.2. Méthodologie de calcul

4.3.2.1. L'énergie de traction nécessaire au mouvement des métros

La consommation énergétique des métros est un poste important du bilan des émissions de GES. En effet, bien que l'énergie électrique représente des émissions de GES relativement faibles, les quantités d'électricité nécessaires au déplacement des rames de métro à une fréquence très élevée seront importantes.

L'évaluation précise de la consommation attendue nécessite de connaître les technologies qui seront utilisées. Si l'utilisateur connaît précisément la consommation électrique attendue, l'outil CarbOptimum offre la possibilité de l'intégrer directement.

Dans le cadre du Grand Paris Express, il était attendu que les spécificités technologiques du métro ne soient pas connues dès les premières phases de conception. L'outil CarbOptimum est donc conçu également pour permettre d'estimer la consommation énergétique et les émissions qui en découlent sur

base des voiture.km parcourus par an sur les différentes lignes. L'utilisateur peut facultativement préciser la technologie de roulement (sur pneu ou sur fer) ainsi que l'utilisation ou non de technologies avancées pour la réduction de la consommation énergétique (récupération de l'énergie au freinage, etc.).

Sur base des données disponibles sur les consommations des métros, une consommation de base de 2,38 kWh/wagon.km a été retenue pour un wagon de 112 places. Cette consommation est majorée ou minorée en cas de rame plus grande ou plus petite.

Dans l'outil et toujours sur base de la littérature disponible, il a été choisi de **minorer** cette consommation de **15%** en cas d'utilisation d'un **système de roulement sur fer** et de **25%** lorsque des **technologies avancées** de limitation des consommations énergétiques (notamment la récupération de l'énergie au freinage) sont utilisées.

Les consommations électriques des différentes lignes ont été estimées sur base du nombre de rame.km par ligne, du nombre de wagons par rame, de la capacité des wagons, du système de roulement (fer/pneu) et de la mise en œuvre de technologies avancées pour réduire les consommations. Les valeurs retenues sont présentées au tableau ci-après.

Tableau 3 : Hypothèses de fonctionnement et émissions globales 2024-2050 (source : SGP)

Ligne	Nombre de wagon.km/an (en millions)	Nombre de places offertes par wagon	Réduction système de roulement sur fer	Réduction système technologique avancé	KWh/wagon.km
14	84	119	Non	Oui	2,53
15	129	166	Oui	Oui	2,25
16/17	33,9	166	Oui	Oui	2,25
18	18,93	116	Oui	Oui	1,57

Les consommations énergétiques nécessaires au mouvement des métros sont ensuite traduites en émissions de GES grâce au facteur d'émission de l'électricité.

Dans le bilan de 2012, ce facteur d'émissions avait été défini sur base des données de l'ADEME à 65,2g éqCO₂ /kWh en 2020 en diminution au cours du temps jusque 54,4g éqCO₂ en 2050. Ce facteur d'émission était prudent puisque les nouvelles estimations établies par l'ADEME du mix moyen de l'électricité en 2018 sont de 57,1g éqCO₂ /kWh (Base Carbone, mai 2019). Par ailleurs, les nouveaux travaux qui différencient les émissions liées à la consommation de l'électricité selon les usages, font état d'un facteur de 38,6g éqCO₂ /kWh pour le transport en 2018 (Base Carbone, mai 2019), soit une valeur 44% moins élevée que celle utilisée dans l'outil.

Par conséquent, il a été considéré dans la mise à jour du bilan en 2018 un scénario A basé sur un facteur d'émission de 57,1g éqCO₂ /kWh en 2018 diminuant à 47,6 en 2050 et un scénario B basé sur un facteur d'émissions de 38,6g éqCO₂ /kWh en 2018 diminuant à 32,2 en 2050.

4.3.2.2. Consommation en énergie des gares et des bâtiments techniques

L'outil CarbOptimum a été conçu pour évaluer les émissions de GES liées à la consommation énergétique des gares, des bâtiments d'accueil du public et des bâtiments techniques (maintenance) soit sur la base des consommations estimées des différentes énergies (électricité, gaz, fioul) soit sur la base des surfaces des bâtiments lorsque les consommations ne sont pas connues. L'outil permet également de tenir compte de la climatisation, le cas échéant.

Globalement, les consommations énergétiques prévisionnelles gares, des bâtiments d'accueil du public et des bâtiments techniques (maintenance) n'étant pas connues avec précision ni en 2012 ni lors de la mise à jour 2018, les émissions de GES ont été évaluées sur base des surfaces dédiées à ces espaces. Les consommations moyennes retenues en 2012 étaient calculées sur la base des valeurs moyennes du secteur tertiaire évalué à 126kwh/m²/an pour l'électricité (hors chauffage et l'eau chaude sanitaire) et 167 kwh/m²/an pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. A nouveau, ces facteurs étaient prudents puisqu'ils se basaient sur une analyse des consommations moyennes des bâtiments avant la généralisation de l'usage de l'éclairage LED et sans tenir compte des nouvelles normes d'isolation des bâtiments. Il est ainsi raisonnable de penser que les gares du Grand Paris Express pourront consommer près de deux fois moins d'énergie que la moyenne des bâtiments existants⁷.

Par conséquent, il a été considéré dans la mise à jour du bilan en 2018 un scénario A basé sur une réduction de ces consommations de 25% et un scénario B basé sur des consommations 50% moins élevées. Les facteurs d'émissions retenus et leur évolution au cours du temps sont repris dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4 : Facteurs d'émissions de consommation énergétique des bâtiments

Kg éq CO ₂ /m ² .an par année	Horizon Scénario	2020		2030		2040		2050	
		A	B	A	B	A	B	A	B
Consommation d'électricité (hors chauffage)		5,3	2,4	5,0	2,3	4,8	2,1	4,5	2,0
Consommation de gaz naturel (chauffage et ECS)		29,9	20,0	29,8	19,9	29,7	19,7	29,5	19,7

En ce qui concerne le chauffage des gares, seules les surfaces des bâtiments aériens ont été considérées. Les gares souterraines sont en effet généralement gardées à température grâce à l'énergie du sous-sol. Pour les centres d'exploitation et de maintenance, il a été considéré que **25%** des surfaces aériennes et souterraines étaient chauffées, et non la totalité.

4.3.2.3. Activités de gestion, de marketing, de contrôle, de pilotage, etc.

Les émissions liées aux activités de gestion et de pilotage de l'infrastructure peuvent être traitées dans l'outil CarbOptimum comme celles liées aux études et travaux préalables, c'est-à-dire selon les activités précises ou sur base des budgets alloués.

Etant donné que les activités précises ne sont pas encore connues à ce stade, les émissions liées à ce poste ont été évaluées en 2012 comme en 2018 sur la base des budgets alloués.

Les facteurs d'émissions retenus sont les mêmes que décrits précédemment : **110g éqCO₂ par euro pour le scénario A** et **68g éqCO₂ par euro pour le scénario B** pour 2018. Etant donné les améliorations constantes de ces services en termes d'efficacité énergétique, il a par ailleurs été considéré une diminution annuelle de 1% de ces émissions.

Les émissions liées à l'entretien et à la gestion ont été évaluées sur base des budgets prévisionnels pour ces activités qui s'élèvent à environ **507,8 M€/an** pour l'ensemble des lignes, en euros constants 2015. Ce budget est réparti entre les différentes lignes comme le montre le tableau ci-après, au prorata du linéaire. Ces sommes correspondent aux coûts annuels d'exploitation et de maintenance pour l'exploitation, la maintenance du matériel roulant voyageurs et la maintenance des infrastructures et des systèmes.

⁷ Les LED mettent en lumière les économies d'énergie, <https://www.ratp.fr/decouvrir/coulisses/modernisation-du-reseau/les-led-mettent-en-lumiere-les-economies-denergie>

L'énergie de traction, l'énergie nécessaire au fonctionnement des gares, et les provisions pour renouvellement de l'infrastructure, du système et du matériel roulant ne sont pas prises en compte dans ces montants et sont comptabilisées dans les autres postes de l'onglet fonctionnement.

Tableau 5 : Coûts annuels d'exploitation/maintenance (en millions d'euros constants 2015), hors traction et hors énergie des gares, par ligne (source : communications SGP 2018)

	L14	L15	L16/17	L18
Coûts annuels d'exploitation / maintenance (M€), hors traction et hors énergie gares	79,7	267,4	103,4	57,30

4.3.2.4. Renouvellement de l'infrastructure

Une infrastructure de transport telle que celle du Grand Paris Express aura une durée de vie très longue que l'on peut considérer comme égale ou supérieure à 100 ans. Cependant, pour maintenir l'infrastructure dans un état optimal de fonctionnement, un renouvellement de certains équipements ferroviaires (rails, caténaires, etc.) et des opérations de rénovation des bâtiments (gares, locaux techniques, etc.) devront être réalisées.

Le renouvellement ponctuel de gros matériel et les opérations lourdes de rénovation sont comptabilisés de manière proportionnelle à celles calculées dans la partie construction.

Dans le bilan de 2012, une **durée de vie de 35 ans pour les équipements ferroviaires et les bâtiments** (hors usage du sol) avait été retenue. C'est une hypothèse prudente basée sur les pièces les plus intensivement sollicitées tandis que d'autres éléments plus structurels ont une durée de vie souvent supérieure à 50 ans. Dans la mise à jour de 2018, le scénario A a donc repris l'hypothèse de durée de vie de 35 ans tandis que le scénario B s'est basé sur une durée de vie de 40 ans.

Etant donné les améliorations constantes en termes d'efficacité énergétique pour la production des matériaux de construction, il a par ailleurs été considéré une diminution annuelle de 1% de ces émissions.

Les émissions de renouvellement sont par ailleurs comptabilisées par ligne sur base d'un montant annuel progressif au fur et à mesure de la mise en service.

EVOLUTION DES FACTEURS D'EMISSIONS RELATIFS AU FONCTIONNEMENT

Les consommations énergétiques du matériel roulant et des bâtiments sont fonction des technologies mises en place lors de la mise en service et ne sont donc que peu susceptibles d'évoluer au cours du temps (tout le moins dans les 20 à 30 premières années). Elles ont donc généralement été maintenues constantes au cours du temps. Par contre, les émissions de GES liées aux énergies consommées évolueront certainement dans le futur. Les facteurs d'émission des énergies varient donc au cours du temps à l'image de l'électricité dont le facteur d'émission de 57,1g éqCO₂ /kWh (scénario A) ou 38,6g éqCO₂ /kWh (scénario B) en 2020 diminue progressivement au cours du temps jusque 47,6g éqCO₂ (scénario A) ou 32,2g éqCO₂ (scénario B) en 2050.

Etant donné les améliorations constantes en termes d'efficacité énergétique des activités de gestion, de contrôle, de pilotage, ou d'entretien, il a par ailleurs été considéré une diminution annuelle de 1% des facteurs d'émission retenus.

4.4. Mobilité

4.4.1. Concepts

Le projet du réseau de transport du Grand Paris Express vise à améliorer la mobilité en Ile-de-France, notamment en induisant un **report modal de la route vers les transports en commun**. Ce report modal devrait permettre une réduction de l'utilisation de la voiture et donc des émissions qui en découlent. En effet, comme en témoigne le graphique ci-dessous, les émissions par kilomètre parcouru sont très différentes selon les modes de transport :

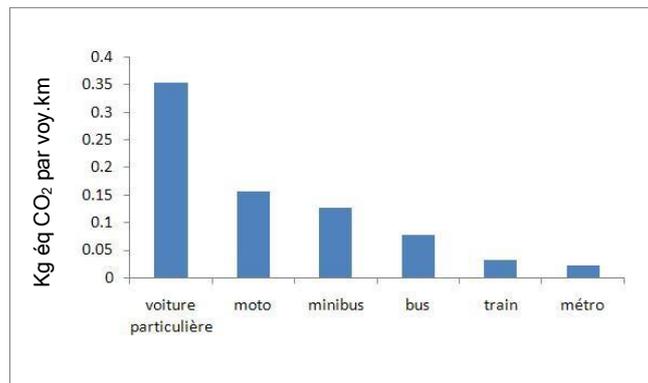


Figure 7 : Emissions moyennes en kg éq CO₂ induites par des déplacements en fonction du mode de transport (voit. part. 1 personne en centre-ville, moto >125cm³, minibus 4 personnes, bus avec en moyenne de 21 personnes, train). Données extraites du modèle Bilan Carbone® de l'ADEME, 2012.

Les études préalables ont montré que les transports publics, bien que très sollicités dans les déplacements radiaux de et vers Paris, restaient peu utilisés dans les relations inter-couronnes. L'absence de liaisons de transports en commun en rocade impose en effet pour les liaisons internes aux Petite et Grande Couronnes un passage par Paris en utilisant les axes radiaux structurants largement saturés, ce qui décourage certains usagers.

En proposant des nouvelles lignes en rocade, le projet du Grand Paris Express entraîne des changements importants sur l'usage des modes pour les déplacements au sein de la région. L'offre nouvelle apportée par le projet améliore le maillage du réseau et permet de mieux relier les différentes zones de périphérie sans passer par Paris Intra-muros. La compétitivité des transports publics s'en voit augmentée, ce qui se traduit par du report modal localisé de la voiture vers les transports en commun, en particulier sur ces relations de périphérie à périphérie.

Par ailleurs, le projet du Grand Paris Express induira également de nombreux changements urbanistiques et de développement territorial. La structure urbaine étant intimement liée avec la mobilité des habitants, le nouveau métro induira aussi des effets indirects sur la mobilité et les émissions qui y sont liées. A titre d'exemple, la densification du bâti et l'augmentation de la mixité permettent de réduire les distances moyennes parcourues par les habitants.

La mise en service du métro entraîne ainsi une réduction générale du trafic routier en Ile-de-France et une diminution de la congestion. En termes d'émissions de GES, cela se traduit en deux aspects importants :

- La **diminution des distances parcourues par les voitures** correspond à une réduction des émissions de gaz à effet de serre dues à la consommation de carburant et à l'usure des véhicules ;

- La diminution de la congestion induit une **augmentation de la vitesse moyenne des véhicules (légers et poids lourds) sur le réseau routier** ce qui peut induire selon les situations particulières une augmentation ou une diminution des émissions de GES. A Paris, le trafic étant généralement congestionné, une accélération du trafic générera la plupart du temps une diminution des consommations.

4.4.2. Méthodologie de calcul

L'outil CarbOptimum a été conçu pour calculer les émissions de GES sur base de l'utilisation des différents modes de transport. Il est également possible de préciser les impacts éventuels sur les consommations de carburant.

Les valeurs introduites dans l'outil ont été extraites des simulations de trafic réalisées par la DRIEA grâce au modèle de type à « 4 étapes », dénommé MODUS.

4.4.2.1. Distances parcourues

L'estimation du facteur d'émission lié à l'utilisation de la voiture particulière a fait l'objet d'un long développement pour tenir compte non seulement des émissions liées à la consommation de carburant mais également de l'usure des véhicules. Par ailleurs, les facteurs d'émissions disponibles dans la littérature ont dû être améliorés pour tenir compte :

- de l'amélioration progressive des techniques industrielles qui permettent de réduire les émissions liées à la fabrication des véhicules et de réduire les consommations moyennes en carburant
- de l'insertion progressive de biocarburants dans les carburants traditionnels
- de l'introduction des véhicules électriques dans le parc automobile.

Selon toutes les hypothèses retenues lors de l'élaboration de la méthodologie, les facteurs d'émissions par véhicule kilomètre et selon le type de carburant ont été considérés comme évoluant de la sorte :

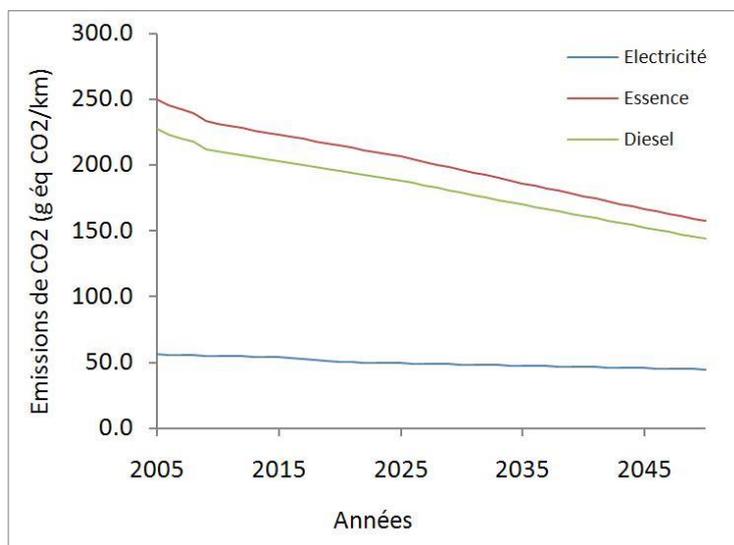


Figure 8 : Facteurs d'émissions d'utilisation de véhicules particuliers et évolution au cours du temps. Stratec 2011

En tenant compte de perspectives d'évolution du parc automobile de 19% essence, 67 % diesel et 14% électrique en 2025 et de 16% essence, 59% diesel et 25% électrique à partir de 2035, les facteurs d'émissions généraux retenus pour l'utilisation de véhicules particuliers sont repris dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6 : Facteurs d'émissions globaux d'utilisation des véhicules particuliers.

Années	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Emissions moyennes pour l'utilisation des VP (g CO ₂ /km)	188.5	168.0	153.8	140.4	134.0	127.7	121.5

Les valeurs préconisées actuellement dans la Base Carbone (253g éqCO₂/km en 2018) confirment que les hypothèses retenues dans le bilan de 2012 étaient prudentes.

Un exercice similaire a été réalisé pour les émissions liées à l'utilisation des deux roues motorisés et des poids-lourds mais les facteurs d'émissions n'influencent que très peu le bilan du Grand Paris Express. Les facteurs ne sont donc pas repris ici mais nous renvoyons le lecteur intéressé au rapport méthodologique complet annexé au dossier de DUP de la ligne 15 Sud.

Les impacts de la mise en œuvre du Grand-Paris Express sur le report modal et sur l'utilisation de la voiture ont été largement débattus. Les impacts ont été approchés de différentes manières, souvent sur la base des modélisations MODUS réalisées par la DRIEA.

Dans le cadre des études socio-économiques et environnementales, les impacts du GPE sur le trafic routier ont notamment été évalués selon les scénarios à :

Tableau 7 : impacts du GPE sur le trafic routier selon différents scénarios et horizons de temps (source : modélisation MODUS, DRIEA)

Scénarios	Diminution des véh.km parcourus en millions de véh.km	
	2025	2035
S1	-	-2524
S2	-	-2307
Scénario bas	-1555	-1010
Scénario haut	-1595	-1082

Pour rappel, les scénarios S1 et S2 correspondent à des hypothèses basse et haute sur la croissance induite de l'emploi, confirmées par les derniers résultats des recherches effectuées sur le sujet.

Les impacts sur le trafic varient donc assez largement selon les scénarios envisagés et surtout les hypothèses de modélisation retenues. Il faut noter par ailleurs que les études qui ont suivi sur le modèle de trafic utilisé suggèrent que les effets ont été sous-évalués (notamment à cause de la non prise en compte de la congestion routière et du stationnement). Ainsi, l'étude sur l'« état de l'art et préconisations pratiques d'amélioration des modèles de trafic utilisés récemment pour produire les prévisions des effets du projet du Grand Paris Express » (H. Duchâteau et M. Gaudry, 2014) évalue la sous-estimation du trafic dans une fourchette comprise entre 38 et 93%.

Globalement, il a donc été considéré comme hypothèse de réduction du trafic dans le scénario A, la moyenne des résultats des scénarios bas 2025, haut 2025, S1 2035 et S2 2035 qui s'élève donc à -1988

millions de véh.km en moins par an. Le scénario B est quant à lui basé sur une majoration de 65,5% (intermédiaire entre les 38 et 93%) du scénario A (-3290 millions de véh.km en moins par an).

Les diminutions de trafic ont été considérées comme évoluant au cours du temps au prorata de la longueur des lignes du GPE mises en service.

4.4.2.2. Consommation de carburants

Les résultats issus du modèle MODUS ont montré que la mise en service du Grand Paris Express aura également un impact sur les vitesses moyennes pratiquées sur le réseau routier. Comme l'illustre la figure suivante, cette variation des vitesses peut avoir une incidence sur la consommation moyenne par kilomètre parcouru.

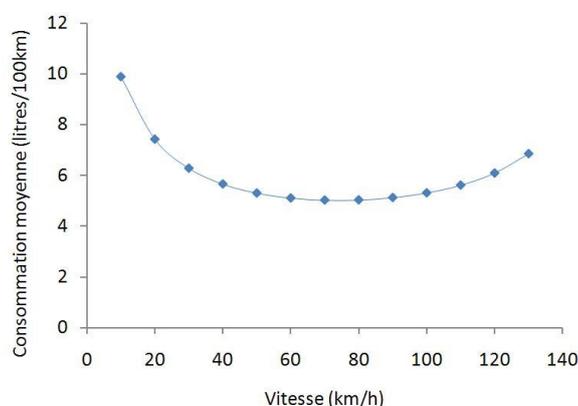


Figure 9 : Relation entre la consommation de carburant des véhicules particuliers et leur vitesse calculée grâce au modèle COPERT 4 et selon les hypothèses de l'étude environnementale stratégique du Grand Paris (Biotope, Stratec, Burgeap 2010).

Les résultats issus du modèle MODUS permettent également de déduire les vitesses moyennes de parcours sur les différents axes du réseau et d'estimer, grâce au modèle COPERT IV, les consommations moyennes en situation de référence et en situation de projet en tenant compte des effets de congestion. Ces variations des consommations moyennes de carburant peuvent alors être introduites dans l'outil CarbOptimum afin d'en déduire les conséquences sur les émissions de GES.

Dans le cadre du bilan 2018, une diminution des consommations de -0,53% à l'échelle de l'Ile-de-France a été reprise dans le scénario A. Le scénario B se base lui sur une hypothèse plus optimiste de -0,87%.

4.5. Développement territorial

4.5.1. Concepts

Pour accueillir les accroissements de population et d'emploi futurs et répondre au phénomène progressif de desserrement des ménages, le parc bâti francilien devra nécessairement évoluer pour accroître l'offre en logements et en bâtiments tertiaires.

Or, le taux de croissance du parc est aujourd'hui relativement faible dans les centres d'agglomérations où l'espace disponible est une denrée rare. C'est pourquoi on peut s'attendre, en l'absence de mesures restrictives d'usage rendues possibles grâce à l'arrivée du GPE, à un report plus important des besoins de nouvelles constructions vers les franges urbaines périphériques et à une consommation progressive des espaces ruraux de seconde couronne et des régions limitrophes au profit d'un paysage d'habitat pavillonnaire.

Ce phénomène d'étalement urbain est aujourd'hui connu pour engendrer de multiples externalités négatives. L'étalement urbain est en effet synonyme (i) d'une augmentation de la consommation des espaces agricoles et naturels et d'une pression sur les écosystèmes et la biodiversité, (ii) d'une augmentation des distances parcourues et des émissions de gaz à effet de serre dues aux migrations alternantes en voiture et (iii) d'une modification de la morphologie et de la localisation du bâti.

La localisation des constructions nouvelles dans la région (logements et bureaux), dont chacun reconnaît la nécessité, aura des effets environnementaux et sociaux très différents selon les distances d'implantation par rapport aux nœuds du réseau de transport en commun et à la densification des constructions.

Le projet du réseau de transport public du Grand Paris représente donc une opportunité unique de densification associée à une plus grande attractivité d'espaces situés à l'intérieur du cœur d'agglomération, induisant ainsi une urbanisation nouvelle, plus attractive et plus durable, tenant compte des contraintes au niveau énergétique et des engagements au niveau des réductions d'émissions de CO₂.



Figure 10 : Etalement urbain (gauche) et forme de densification qualitative (droite) (source : Google Maps nov. 2018)

Cette densification des zones urbaines de l'Île de France est une conséquence majeure et directe de la mise en service du Grand Paris Express. Elle est montrée par les nombreuses études et simulations effectuées pour apprécier l'impact de la réalisation du Grand Paris Express, et elle se comprend d'ailleurs facilement quand on sait que l'amélioration de l'accessibilité est un facteur central de l'attractivité des territoires et donc de la localisation des habitants et des emplois. Elle se produira à l'échelle de l'ensemble de la région, et ses effets locaux dépendront bien évidemment des stratégies urbaines des acteurs de l'urbanisme. Dans certains cas, si les politiques d'accompagnement ne sont pas au rendez-vous, la

densification locale sera plus faible dans un premier temps, et, à l’opposé, elle sera d’autant plus forte localement que les actions d’aménagement local pourront en accentuer les effets. Le lien entre développement local et gare n’est pas mécanique mais dans l’ensemble le phénomène de densification sera fort, se concentrant là où les accompagnements locaux sauront le mieux anticiper et tirer parti de l’opportunité que représenteront des territoires mieux desservis, et surtout, dans l’ensemble, l’étalement urbain sera plus faible que si l’infrastructure du Grand Paris Express n’était pas mise en service. Le GPE est donc à l’évidence un levier majeur du meilleur contrôle de l’artificialisation des sols associé en général à la croissance urbaine.

La mise en œuvre du réseau de transport public du Grand Paris est une condition pour le succès d’un aménagement du territoire favorisant la densification de l’habitat et des activités autour des futures gares, parallèlement à d’autres mesures d’accompagnement supplémentaires. **Les mesures d’accompagnement ont pour objectif de diminuer les émissions de CO₂ non négligeables via les mécanismes suivants :**

- **Au niveau de la forme urbaine du bâti**, en densifiant le bâti résidentiel et tertiaire qui induit des besoins notamment en voiries et réseaux divers ;
- **Au niveau des performances énergétiques du bâtiment**, en encourageant les opérations de rénovation et de construction/démolition à travers l’urbanisation liée au projet. Ce renouvellement du parc bâti donne lieu à des bâtiments énergétiquement plus performants. Ces gains sont à même de compenser largement les coûts énergétiques induits par la construction de nouveaux bâtiments ;
- **Au niveau des effets induits de l’usage du sol sur la mobilité des franciliens**, en induisant un raccourcissement des trajets terminaux et un report modal vers les transports en commun, grâce à la stratégie d’aménagement incorporant densité et mixité urbaine autour de nouveaux nœuds d’une infrastructure de transport en commun d’envergure.

4.5.2. Méthodologie

La méthodologie CarbOptimum se base sur une série d’informations territoriales qui sont extraites des diverses études spécifiques aux incidences du nouveau métro, en particulier des modèles dits « Land Use Transport Interaction » utilisés par la Société du Grand Paris. L’outil permet alors d’évaluer les émissions de GES induites ou évitées par les impacts du Grand Paris Express.

Les postes considérés dans l’outil et nécessitant l’introduction de données de base aux calculs sont notamment : la construction, la démolition-reconstruction et la rénovation de bâtiments résidentiels et tertiaires ainsi que le changement d’affectation des espaces ruraux et les opérations de viabilisation des zones urbanisées. Outre les émissions de GES induites par ces travaux, l’outil permet d’évaluer les incidences consécutives de ces opérations sur les consommations de chauffage des bâtiments résidentiels et tertiaires, sur les opérations de maintenance et de rénovation des voiries et sur l’exploitation des services publics dans les zones urbanisées. Ces différents postes sont expliqués ci-après.

4.5.2.1. Construction des bâtiments résidentiels et tertiaires

La construction de bâtiments résidentiels et tertiaires dans les quartiers nouvellement desservis par le Grand Paris Express ou dont l’accessibilité est améliorée grâce à l’arrivée du Grand Paris Express, nécessitera, à l’image de la construction du métro lui-même, la fabrication et l’acheminement de matériaux

de construction divers ainsi que la consommation d'énergie pour la tenue des chantier (déplacements domicile-travail des ouvriers, utilisation d'engin de chantier, etc.). **La construction de nouveaux bâtiments représente donc des émissions de GES non négligeables** à prendre en compte dans le bilan.

L'outil CarbOptimum permet d'évaluer ces émissions **sur base des surfaces nouvellement construites et de la typologie des bâtiments**.

Une approche globale « par les surfaces » a donc été adoptée, c'est-à-dire qu'un facteur d'émission a été défini pour chaque type de bâtiment (résidentiel individuel, résidentiel collectif ou tertiaire) et tenant compte des évolutions réglementaires, telles que les Réglementations Thermiques 2012 et 2020 (la construction d'un bâtiment plus efficace au niveau énergétique engendre généralement des émissions supplémentaires liées aux technologies plus avancées et aux isolants plus épais mis en œuvre).

Sur base des données disponibles dans la littérature⁸, les facteurs d'émissions retenus à partir de 2020 sont par exemple de 333 kg eqCO₂ pour la construction d'un m² de logement individuel, 193 kg eqCO₂ pour la construction d'un m² de logement collectif et 249 kg eqCO₂ pour la construction d'un m² de de bâtiment tertiaire (bureaux, commerce). Ces facteurs d'émissions comprennent les émissions générées par la production, le transport sur le chantier et la mise en œuvre des différents produits composant le bâtiment (structure, enveloppe, partition, revêtement).

4.5.2.2. Démolition - reconstruction des bâtiments résidentiels et tertiaires

Comme pour la construction, la démolition de bâtiments anciens et leur remplacement par de nouvelles constructions plus efficaces au niveau énergétique engendre des émissions de GES.

L'outil CarbOptimum permet d'évaluer ces émissions sur base des mêmes facteurs d'émissions que ceux liés à la construction mais en y ajoutant un **supplément lié à la démolition et à l'évacuation des déchets** (gravats, ferraille, etc.).

La même approche globale par les surfaces a donc été adoptée. Pour la partie démolition, une valeur commune a été utilisée que ce soit pour les surfaces résidentielles ou pour les surfaces et tertiaires détruites. Elle est de 20,0 kg eqCO₂ par m² démoli⁹.

Il n'a pas été considéré de réduction éventuelle des émissions liées à la reconstruction par rapport à une construction neuve (récupération des fondations ou autre). Les facteurs sont donc les mêmes que ceux présentés ci-dessus.

4.5.2.3. Rénovation des bâtiments résidentiels et tertiaires

La rénovation des bâtiments permet généralement de conserver tout ou partie de la structure du bâtiment mais nécessite tout de même la mise en œuvre de nouveaux matériaux (isolation, châssis, systèmes de chauffage, etc.) qui implique des émissions de gaz à effet de serre.

A nouveau, la méthodologie se base sur les surfaces **résidentielles et tertiaires rénovées grâce à des facteurs d'émissions par m² rénové selon le type de bâtiment**. Les facteurs d'émissions retenus sont par

⁸ En particulier le « Bilan Carbone appliqué au bâtiment, Guide Méthodologique, ADEME, CSTB, 2010 », et Peuportier, B., Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context, Energy and Building, 2001

⁹ Sur base de Life cycle CO₂ emission reduction predictions for japan's housing sector towards 2030, M. DEJIMA, Graduate school of engineering, Utsunomiya University, Japan et Suzuki, M. & Oka, T. 1998. Estimation of the life cycle energy consumption and CO₂ emissions of office buildings in Japan. Elsevier Science and Energy Buildings

exemple de 124kg eqCO₂/m² de logement rénové et de 214kg eqCO₂/m² de bâtiment tertiaire rénové à partir de 2020¹⁰.

4.5.2.4. Changement d'affectation des secteurs ruraux

A contrario de la démolition-reconstruction et de la rénovation, la construction de nouveaux logements ou de bâtiments tertiaires sur des zones encore non bâties (friches, espaces agricoles ou forêts) induit l'artificialisation de certains sols ce qui conduit généralement à un déstockage de la matière organique l'année d'urbanisation puis à un manque à gagner lié à la non production d'énergie renouvelable les années suivantes.

L'outil CarbOptimum permet de tenir compte de ces émissions à partir de la différence annuelle d'hectares ruraux consommés par l'urbanisation entre un scénario avec et un scénario sans projet.

Pour l'année d'urbanisation du terrain un facteur d'émissions CO₂ induites de 561t eqCO₂ pour un hectare de forêt et 295t eqCO₂ pour un hectare de terre cultivée ont été retenus¹¹. Ceux-ci correspondent à la quantité de CO₂ libérée suite au déstockage de la matière organique contenue dans le sol et dans la végétation de la surface qui est urbanisé (voir figure ci-dessous).

Contenu en carbone des forêts et terres cultivées par hectare

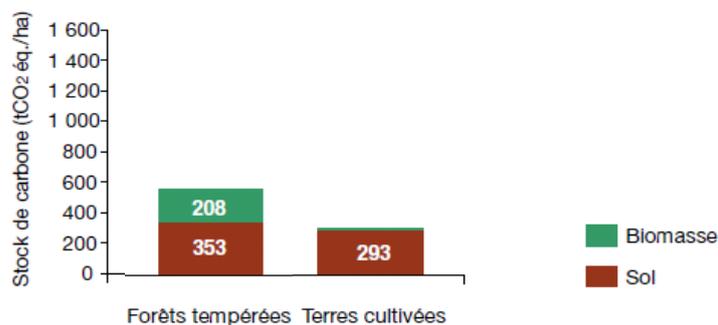


Figure 11 : Stocks de carbone contenus dans la biomasse et le sol selon le type d'occupation du territoire (Source : GIEC, 2000)

Pour les années suivant l'urbanisation du terrain, il convient de prendre en compte les émissions annuelles qui ne pourront être évitées grâce à l'utilisation de ces surfaces pour produire de l'énergie renouvelable (biocarburants et biocombustibles). A cette fin, des facteurs d'émissions de 2.38t eqCO₂ évitées par hectare de surfaces forestières et de 1.82t eqCO₂ par hectare de terre cultivée ont été retenus¹².

¹⁰ La définition des facteurs d'émissions se base principalement sur les résultats du projet RAPPE (Rénovation Architecturale Patrimoniale et Performance Energétique) et du logiciel CO²CON (2008, ECOSPHERE).

¹¹ Sur base des travaux du GIEC de 2000 concernant les Stocks de carbone contenus dans la biomasse et le sol selon le type d'occupation du territoire.

¹² Evaluation par Stratec sur base d'une combinaison de documents dont le Guide des facteurs d'émissions v6.1, ADEME, 2010, les études de l'ADEME sur le bois-énergie, Biocarburants 2010 : Quelles utilisations des terres en France, 2007, Office National Interprofessionnel des Grandes Cultures (ONIGG) et l'Inventaire Forestier National. Voir pièce G - annexe 1 de l'étude d'impact du Grand Paris Express, 2012 pour plus d'informations).

4.5.2.5. Opérations de viabilisation des zones urbanisées

L'urbanisation de zones non construites (friches, espaces agricoles ou forêts) nécessite également la viabilisation de ces zones, c'est-à-dire la construction de voiries et de réseaux (électricité, télécommunications, distribution d'eau potable, évacuation des eaux usées, etc.). Ces travaux représentent également des émissions de GES non négligeables à prendre en compte dans le bilan.

L'outil CarbOptimum travaille à partir des surfaces à urbaniser et se base donc sur un **facteur commun à tous les types de route, fonction uniquement du kilométrage de voirie. Le facteur d'émission a été défini sur base d'un profil « générique » de route** considéré comme représentatif des nouvelles voiries qui seront construites dans les zones d'urbanisation diffuse. Il correspond à une route de ville bitumineuse de 8 mètres de large en moyenne, et prévue pour un trafic faible de camions. Le facteur d'émissions retenu est alors de 570t éqCO₂ par kilomètre de voirie en 2020¹³.

4.5.2.6. Consommations de chauffage des bâtiments résidentiels et tertiaires

La contrepartie des investissements liés à la démolition-reconstruction et à la rénovation des bâtiments peu efficaces au niveau énergétique est un gain par la suite sur les consommations de chauffage et donc une réduction des émissions de GES annuelles.

L'outil CarbOptimum permet de tenir compte de ces impacts induits sur la consommation de chauffage du parc bâti année après année à partir du parc bâti francilien et de son évolution au cours du temps, en appliquant un facteur d'émission par tranche d'âge du bâti résidentiel et tertiaire.

Les valeurs de ces émissions varient selon :

- L'évolution des consommations annuelles de chauffage pour le neuf et le réhabilité ;
- L'évolution du mix énergétique pour le chauffage ;
- L'évolution des facteurs d'émissions des énergies de chauffage.

Les valeurs retenues en 2020 sont présentées dans le tableau suivant¹⁴.

Tableau 8 : facteurs d'émissions liées au chauffage des logements et de bâtiments tertiaires de différents âges et types en 2020. En kg éqCO₂ / par m² et par an

Type de logement	Individuel	Collectif
avant 1949	35.8	35.8
entre 1949 et 1974	32.7	32.7
entre 1975 et 1981	16.3	16.3
entre 1982 et 1998	15.2	15.2
entre 1999 et 2005	12.7	12.7

Date du bâtiment tertiaire	Construit	Rénové
avant 2005	42.6	42.6
entre 2006 et 2012	28.0	28.0
entre 2012 et 2020	8.8	23.1
à partir de 2020	0.0	15.0

¹³ Guide d'utilisation de l'outil Bilan Carbone Territoire, ADEME, juin 2010 et Halleux J.-M, Lambotte J.-M. et Bruck L., 2008, "Etalement urbain et services collectifs : les surcoûts d'infrastructures liés à l'eau", Revue d'Economie Régionale et Urbaine, n°1, pp.21-42, p.28

¹⁴ Facteurs issus de calculs Stratec basés sur différents documents en particulier « L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques », IAURIF, 2010, les normes Cep max de la réglementation thermique, « Projection tendancielle de la consommation d'énergie des logements », M.Girault, F.Lecouvey, CEREN, 2001, « Habitat Facteur 4, Etude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050, Les cahiers du club d'ingénierie prospective énergie et environnement, numéro 20, novembre 2010

entre 2006 et 2013	15.2	11.0
construit entre 2013 et 2020	4.8	3.5
rénové entre 2013 et 2020	12.7	9.1
construit entre 2020 et 2035	0.0	0.0
rénové entre 2020 et 2035	8.3	6.0

4.5.2.7. Opérations de maintenance et de rénovation des voiries, l'exploitation des services publics dans les zones urbanisées

Outre les émissions liées à leur construction, les nouvelles voiries et les nouveaux réseaux doivent être entretenus au cours du temps ce qui implique également des émissions de GES. Ces nouvelles voiries doivent également être desservies par certains services publics (ramassage des déchets, distribution du courrier) qui engendrent également des émissions.

Ces émissions sont évaluées à partir du nombre de kilomètres de voiries et réseaux créés pour viabiliser les zones nouvellement urbanisées. Le facteur d'émissions retenu est de 33,6t éqCO₂ par km de voirie et par an¹⁵.

4.5.2.8. Hypothèses retenues comme données d'entrée

L'évaluation des émissions de GES liées aux impacts sur le développement du territoire nécessite au préalable de quantifier les indicateurs d'évolution du bâti et de l'urbanisation des surfaces au sol détaillés ci-avant.

L'outil CarbOptimum évalue notamment les incidences sur les consommations de chauffage des logements et bâtiments tertiaires en reconstituant un bâti complet selon différentes tranches d'âges de construction-rénovation entre les années 2005 et 2035. Au-delà de 2035, il est considéré, par prudence, que le bâti n'évolue plus.

Le bâti 2005 a été repris des études précédentes tandis que son évolution au cours du temps a été revue selon les résultats issus des études LUTI menées par la Société du Grand Paris.

Pour les besoins du calculateur, les évolutions de populations et d'emplois issus des études LUTI pour la période 2006-2030 ont été extrapolées entre 2005 et 2035. Les évolutions de population et d'emploi retenues au cours du temps ont été basées sur le scénario de référence (sans Grand Paris Express) et le scénario S1 (avec Grand Paris) considéré aujourd'hui comme une hypothèse basse de l'appréciation de l'impact du GPE. Les perspectives d'évolution de la population et des emplois retenues sont alors les suivantes :

Tableau 9 : perspectives d'évolution de la population et des emplois entre 2015 et 2035.

Scénario	Zone	Population		Emploi			
		2005	Evolution 2005-2035		2005	Evolution 2005-2035	
			Référence (sans GPE)	S1		Référence (sans GPE)	S1
Paris intra-muros		2.178.807	+77.025	+ 72.281	+ 1.738.962	+ 60.543	+ 68.835

¹⁵ Stratec, 2012, sur base de Les surcoûts des services publics collectifs liés à la périurbanisation : les réseaux d'infrastructures et les services de desserte, L. Brück, SEGEFA, mars 2000 et des facteurs d'émissions présentés dans la partie « Mobilité des individus »

Cœur d'agglomération	5.469.328	+ 618.096	+ 918.742	+ 2.570.200	+ 455.235	+ 731.736
Ile-de-France hors cœur d'agglomération	3.828.080	+ 990.726	+ 766.860	+ 1.175.543	+ 340.473	+ 199.429
Total	11.476.214	+ 1.685.847	+ 1.757.884	5.484.705	+ 856.250	+ 1.000.000

Les augmentations de surfaces résidentielles et tertiaires pour accueillir les nouveaux habitants et emplois ont été calculés à partir de ces données à raisons de 30,2m² par habitant à Paris et en cœur d'agglomération et 34,4m² par habitant hors cœur d'agglomération¹⁶. Les augmentations de surfaces tertiaires ont-elles été calculées sur base d'un ratio de 20,0m² par emploi à Paris et en cœur d'agglomération et 22,8m² par emploi hors cœur d'agglomération¹⁷.

Tableau 10 : Evolution des surfaces résidentielles et tertiaires selon les classes d'âge entre 2005 et 2035 en référence (sans Grand Paris Express) (source : estimations Stratec, 2018).

Zone	Evolution des surfaces résidentielles 2005-2035 (m ²)		Evolution des surfaces tertiaires 2005-2035 (m ²)	
	Sans Grand Paris Express	Avec Grand Paris Express (S1)	Sans Grand Paris Express	Avec Grand Paris Express (S1)
Paris Intramuros	+ 2 322 148	+ 2 182 898	+ 1 210 850	+ 1 376 700
Cœur d'agglomération (hors Paris IM)	+ 18 666 492	+ 27 746 012	+ 9 104 700	+ 14 634 725
Hors cœur d'agglomération	+ 34 080 982	+ 26 379 993	+ 7 762 773	+ 4 546 975
Hors Ile-de-France¹⁸		- 2 478 074		- 3 277 500
Total	+ 55 073 622	+ 53 830 829	+ 18 078 323	+ 17 280 901

Il a par ailleurs été considéré en référence que les logements étaient rénovés ou démolis-reconstruits tous les 40 ans (à raison de 70% rénovés et 30% démolis-reconstruits) et que les surfaces tertiaires étaient quant-à-elles rénovées ou démolies-reconstruites tous les 30 ans (à raison de 70% rénovés et 30% démolis-reconstruits également).

Outre les diminutions de surfaces à construire pour accueillir les nouvelles populations et les nouveaux emplois dues à une localisation préférentielle en cœur d'agglomération où l'utilisation de l'espace est plus efficace, il a également été considéré un effet d'accélération des démolitions-reconstructions et des rénovations en cas de mise en œuvre du Grand Paris Express. Les hypothèses retenues sont une augmentation de 15% des démolitions-reconstructions et rénovations en cœur d'agglomération dans le scénario A et une augmentation de 20% des démolitions-reconstructions et rénovations en cœur d'agglomération dans le scénario B.

Le parc bâti résultant dans ces trois scénarios à l'horizon 2035 sont repris dans les tableaux ci-dessous et mis en regard du parc bâti du scénario de référence.

¹⁶ Sur base des données de l'enquête logement 2013 de l'Insee.

¹⁷ Estimation Stratec par comparaison des ratios issus de l'enquête logement.

¹⁸ Les hypothèses de calculs retenues pour évaluer les impacts hors Ile-de-France liés au déplacement de population et d'emploi sont les mêmes que celles utilisées hors du cœur d'agglomération (34,4m² par habitant et 22,8m² par emploi)

Tableau 11 : Répartition des surfaces résidentielles et tertiaires en Ile-de-France selon les classes d'âge en 2035 selon les scénarios de référence, A ou B.

Tranches d'âge	Surfaces résidentielles (m ²)			
	2005	Référence 2035	Scénario A 2035	Scénario B 2035
< 1949	109 863 103	0	0	0
[1949-1974]	126 780 380	0	0	0
[1975-1981]	35 042 099	12 879 872	127 312	0
[1982-1998]	59 378 343	59 378 343	59.378.343	55.254.802
[1999-2005]	14 010 355	14 010 355	14.010.355	14.010.355
[2006-2013[	-	73 238 511	73.238.511	73.238.511
[2013-2020[	-	73 238 511	75.623.317	76.803.397
[2020-2035]	-	167 402 310	176.941.535	181.663.857
Total	345 074 280	400 147 902	401.383.183	401.383.183

Tranches d'âge	Surfaces tertiaires (m ²)			
	2005	Référence 2035	Scénario A 2035	Scénario B 2035
Avant 2005	192 795 120	0	0	0
[2006-2012[	-	42 174 689	26.785.585	21.655.883
[2012-2020[	-	56 232 918	59.151.254	60.832.695
[2020-2035]	-	112 465 836	124.139.181	130.864.942
Total	192 795 120	210 873 443	214.593.559	214.593.559

Finalement, toujours concernant le parc bâti, il a également été considéré une augmentation de 5 points de pourcentage de la part de logements collectifs construits (par rapport aux logements individuels) dans les 2 scénarios de projet par rapport au scénario de référence.

En ce qui concerne les surfaces rurales consommées pour l'urbanisation nouvelle, **l'étude d'impact** avait évalué les effets de la mise en œuvre du Grand Pris Express à **-16.683 ha d'espaces ruraux épargnés de l'urbanisation selon le scénario bas et -20.810 ha selon le scénario haut.**

Ces résultats étaient issus d'une méthodologie d'analyse complexe basée sur les augmentations moyennes des coefficients d'occupation du sol (COS) prévues dans un périmètre de 500 et 2000m autour des gares de l'Ile-de-France en fonction de l'amélioration de l'accessibilité de ces gares suite à l'arrivée du Grand Paris Express.

En bref, la démarche s'appuie sur l'utilisation d'un Système d'Information Géographique pour évaluer l'augmentation potentielle du COS moyen des différentes zones de l'Ile-de-France suite à l'arrivée du Grand Paris Express. Pour ce faire, l'analyse se base d'une part sur la présence de différents types d'arrêts de transports en commun structurant (métro, de RER, de Transilien et de Tramway) dans un périmètre de 500 et 2000 mètres et sur la couche du « mode d'occupation du sol » (MOS) qui précise l'usage de toutes les parcelles du territoire de l'Ile-de-France.

Pour chaque arrêt de transport en commun, l'analyse a ensuite évalué les gains d'accessibilité engendrés par la mise en œuvre du Grand Paris sur base des résultats du modèle régional de transport MODUS. En fonction de la diminution des temps de parcours vers différents pôles importants d'Ile-de-France, ce critère

a été ventilé en 3 catégories : gains considérés comme négligeables, gains d'accessibilité moyens et gains d'accessibilité élevés.

Pour chacun des 47 types d'occupation du sol précisés dans le MOS, une augmentation potentielle du COS des constructions futures a alors été défini en fonction de la présence ou non des différents types d'arrêts de transport en commun à moins de 500 ou 2000 mètres à vol d'oiseau et de l'amélioration de l'accessibilité grâce à l'arrivée du Grand Paris Express.

Cet exercice a permis alors de définir un COS moyen futur par secteur (le découpage d'analyse a été arbitrairement défini au niveau communal) avec ou sans le Grand Paris Express. En couplant cela avec les augmentations de population et emploi prévues à l'horizon 2035 il a alors été possible d'en déduire la diminution potentielle des hectares consommés pour l'urbanisation nouvelle.

Pour plus de détails sur cette méthodologie d'analyse, il convient de se référer à l'étude d'impact du schéma d'ensemble du réseau de transport du Grand Paris Express (2012).

En repartant de la même méthodologie mais en utilisant les données de populations et d'emplois issues des études LUTI réalisées par la Société du Grand Paris les surfaces épargnées sont alors évaluées à - **17.370 ha** entre le scénario S1 et le scénario de référence (sans GPE).

Une autre méthode d'évaluation plus simple a été utilisée de manière à vérifier la cohérence des résultats et à définir des scénarios différents. Cette méthode considère une consommation d'espace évaluée sur base du nombre d'habitants et d'emploi par m² de surface urbanisée à des fins résidentielles ou d'activités génératrices d'emploi.

Les surfaces urbanisées à destination de l'habitat ou d'activités génératrices d'emploi ont été calculées sur base de l'inventaire numérique de l'occupation du sol en Île-de-France (Mode d'occupation du sol de 2008 ou MOS) (habitat : somme des superficies bâties attribuées à l'habitat individuel, à l'habitat collectif et aux autres types d'habitats. activités socio-économiques : somme des superficies attribuées aux activités économiques et industrielles, entrepôts logistiques, commerces, bureaux, sport (construit), équipements d'enseignement, équipements de santé, équipements culturels, touristiques et de loisirs, autres équipements. Les superficies ainsi calculées ont été multipliées par 2 pour tenir compte de l'artificialisation accessoire telle que celle nécessaire aux voiries).

Outre la relocalisation des habitants et des emplois, il a été considéré que les superficies nécessaires à l'installation des nouveaux habitants et des nouveaux emplois seront réduites dans le cœur d'agglomération (effet de densification suite à l'amélioration de l'accessibilité) et resteront inchangées dans Paris intramuros et hors du cœur d'agglomération. Ainsi, les superficies nécessaires à l'installation des nouveaux habitants et des nouveaux emplois ont été considérées comme réduites de 40% dans le cœur d'agglomération et inchangées dans Paris intramuros et hors cœur d'agglomération. La diminution des surfaces rurales consommées s'élève alors à **-9034 ha**.

La différence des résultats entre les deux méthodes provient d'une part de la prise en compte d'objectifs de densification plus volontaristes dans le cas de la méthodologie détaillée par rapport à celles retenues dans la méthodologie simplifiée et d'autre part sur le fait que la méthodologie détaillée considère les impacts du métro y compris hors du cœur d'agglomération, dans les zones qui ne sont pas desservies directement par le GPE mais qui profiteront tout de même d'une amélioration de leur accessibilité grâce à l'amélioration des connections en transports en commun.

Dans ce sens, la méthodologie simplifiée est plus prudente et a été considéré comme le scénario A de la mise à jour du bilan. La méthodologie détaillée à quant-à-elle été considérée comme le scénario B.

Les différentiels de superficies épargnées (en hectares) selon les scénarios sont repris dans le tableau suivant :

Tableau 12 : Détail des superficies consommées ou épargnées (en hectares) selon les scénarios (source : STRATEC, 2018).

	Population		Emploi	
	Scénario A	Scénario B	Scénario A	Scénario B
Cœur d'agglomération - Paris IM	-18	-46	+17	+53
Cœur d'agglomération - Autres	-1 202	-6 708	-208	-3 548
IdF hors cœur d'agglomération	-2 270	-3 444	-2 288	-1 260
Hors IdF	-733	-1 037	-2 332	-1 380
Total évolution hectares	-4 223	-11 235	-4 811	-6 135
Total P+E selon les scénarios	Scénario A : -9 034 ha Scénario B : -17 370 ha			

En termes de consommations des espaces et de constructions de voiries et réseaux divers (VRD) cela correspond à :

Tableau 13 : surfaces épargnées de l'urbanisation et voiries et réseaux non construits grâce au Grand Paris Express et selon les différents scénarios d'évolution de la population et des emplois.

	Scénario A	Scénario B
Ha épargnés	-9.034	-17.370
Dont Forêts (ha)	-181	-347
Dont terres agricoles ou friches (ha)	-8.853	-17.023
VRD épargnés (km)	-2.006	-3856

Il faut finalement noter que tous les calculs sont basés sur une période de 30 ans définie arbitrairement entre 2005-2035. Or, dans les faits, les effets sur le développement territorial n'ont eu globalement lieu qu'à partir du moment où la certitude de voir le projet mis en œuvre a permis de rassurer les investisseurs immobiliers, soit environ les années proches de 2015. Par convention, les impacts du développement territorial sur le bilan des émissions de GES ont donc été appliqués entre 2015 et 2045 plutôt qu'entre 2005 et 2035. Au total cela ne change pas les résultats sur 30 ans mais ça décale dans le temps les gains engendrés par le projet.

4.6. Conclusions

L'outil CarbOptimum a été développé spécifiquement pour répondre aux enjeux très importants du Grand Paris Express en termes d'émissions de GES. Il propose une méthodologie innovante qui ne se base pas sur des facteurs d'émissions figés à un temps t mais qui évoluent au cours du temps en fonction des avancées technologiques attendues.

Bien que la méthodologie ait fait l'objet d'un travail de développement conséquent, il est important de rappeler que l'élaboration d'un bilan d'émissions de GES d'une grande infrastructure de transport reste un exercice complexe qui permet d'alimenter les réflexions sur les émissions de GES et les mesures permettant de les réduire mais qui ne prétend pas apporter une cartographie exacte de l'ensemble des flux de GES induits ou évités, et ceci pour diverses raisons.

D'une part, les facteurs d'émissions comportent tous un certain taux d'incertitude. Les flux de gaz à effet de serre sont multiples et complexes. Lors de la construction, ils correspondent par exemple aux consommations énergétiques nécessaires aux chantiers mais aussi aux déplacements des ouvriers ainsi qu'aux consommations énergétiques nécessaires à la fabrication et au transport des matériaux. Leur définition est donc un exercice complexe qui mérite une attention particulière. C'est dans cette optique que l'outil CarbOptimum[®] a été développé. La comparaison de différentes sources internationales a permis de réduire le taux d'incertitude des facteurs d'émissions au maximum. Il reste néanmoins important de noter qu'un facteur d'émissions correspond plus à un ordre de grandeur qu'à une quantification exacte des flux de gaz à effet de serre.

D'autre part, le calcul des émissions est basé sur les données d'activité qui peuvent être plus ou moins précises. Le calculateur a été développé afin de pouvoir s'adapter aux différents niveaux de précision des données d'entrée et a donc permis de s'adapter aux données disponibles à ce stade de l'étude. De plus, le calculateur est un outil intégré qui permet de visualiser rapidement l'impact d'une variation des données d'entrée sur le résultat final. Ainsi, il a été possible de tester un grand nombre de possibilités afin d'identifier les paramètres les plus influents.

De manière générale, que ce soit dans la définition des facteurs d'émissions que dans le calcul des émissions, une approche conservatrice a été adoptée. Malgré cela, l'analyse des impacts a montré le potentiel important de l'infrastructure à réduire les émissions de gaz à effet de serre, particulièrement au niveau du développement territorial. Cette approche a donc permis d'identifier les véritables enjeux d'un tel projet vis-à-vis des émissions de gaz à effet de serre malgré les limites inhérentes à un bilan des émissions.

5. EMISSIONS DE GES DU PROJET DU GRAND PARIS EXPRESS PAR POSTE

Un premier bilan carbone du projet a été réalisé en 2012 sur la base des premières études de définition du GPE. Etant donné les évolutions progressives du projet, notamment au niveau du périmètre et des techniques de construction, le bilan a été actualisé en 2018. Cette révision tient compte :

- Des lignes et gares finalement retenues comme constituants du GPE et des linéaires exacts ;
- Des avis et feedback des maîtres d'œuvres consultés pour différents chantiers ;
- Des ajustements en matière de conception et de techniques de construction ;
- Des nouvelles estimations de budget relatives aux études préalables et à l'entretien et la gestion de l'infrastructure ;
- Des nouvelles hypothèses de fonctionnement (fréquence des trains, nombre de rames, nombre de gares, etc.),
- De l'affinement des estimations des impacts du GPE, notamment en termes de populations et emplois nouveaux.

Les résultats de la mise à jour de l'outil sont présentés ci-après. A titre de comparaison, les résultats obtenus en 2012 sont également rappelés à la fin de chaque poste d'émissions pour mieux appréhender les changements entre ces deux versions du bilan.

5.1. Constituants du GPE

Comme décrit précédemment dans l'évolution du projet du GPE, le réseau concerné a été modifié au cours du temps. Entre 2012 et 2018, les lignes du réseau prises en compte dans le bilan des émissions de GES induites et évitées grâce au Grand Paris Express ont évolué :

- En 2012, la ligne rouge en rocade et vers l'Aéroport Charles-de-Gaulle avait été prise en compte dans son intégralité. Cela n'a pas changé en 2018 bien qu'elle ait été découpée entre les actuelles lignes 15 Ouest (Pont de Sèvres - Saint-Denis-Pleyel), 15 Sud (Pont de Sèvres Noisy-Champs), 16 (Noisy-Champs - Saint-Denis Pleyel) et 17 (Saint-Denis-Pleyel - Le Mesnil-Amelot).
- Il en va de même pour la ligne bleue ou ligne 14 prise en compte en 2012 comme en 2018 entre Saint-Denis-Pleyel et Mairie de Saint Ouen au Nord et entre Olympiades et l'Aéroport d'Orly au Sud.
- En 2012, la ligne verte (renommée par la suite L18) était par contre prise en compte depuis l'Aéroport d'Orly jusque Nanterre La Folie. Elle n'est actuellement plus prise en compte que jusque Versailles-Chantiers, la partie restante (Versailles-Chantiers-Nanterre la Folie) ne disposant pas encore de calendrier de mise en œuvre précis.
- La ligne orange n'était pas prise en compte dans le réseau du Grand Paris en 2012. Elle l'est maintenant entre Saint-Denis-Pleyel et Champigny Centre sous le nom de ligne 15 Est.

Le réseau comptait ainsi 57 gares en 2012 et en compte 68 en 2018.

5.2. Etudes et travaux préalables

Parmi les budgets des études et travaux préalables, il faut compter les dépenses propres à la SGP ainsi que les budgets alloués à l'ensemble des études relatives au Grand Paris Express, attribués à de nombreux bureaux indépendants par marchés publics (études de conception et de maîtrise d'œuvre, études environnementales, services juridiques, etc.).

Les estimations les plus à jour des budgets alloués aux différentes études et à la gouvernance ont permis d'évaluer les émissions en tonnes équivalent CO₂. Ces émissions sont distribuées sur la période 2010-2030 puisqu'une activité de pilotage subsistera jusqu'à la mise en service totale en 2030.

Le budget des études et travaux préalables est estimé à environ 3,85 milliards d'euros (soit environ 10% du budget global de la construction).

Les émissions correspondantes ont été étalées dans le temps selon la répartition suivante :

- 1% en 2011, 4% en 2012, 5% en 2013 ;
- 9% en 2014, 12% en 2015, 19% en 2016, 23% en 2017, 8% en 2018, 6% en 2019, 3% en 2020 ; Ces années représentent les années de pleine activité concernant la collecte des données de sites, la réalisation des dossiers réglementaires et les études préalables (maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage, etc.), plus conséquentes car nécessitant plus de moyens tant humains que matériels (relevés topographiques, carottage du sol, etc.).
- 1% chaque année de 2021 à 2030.

Sur base des hypothèses retenues ci-dessus et des facteurs d'émissions détaillés précédemment, les émissions de GES ont ainsi été estimées à environ **419.935 téqCO₂** selon le scénario A pour toute la période concernée (2011-2030). Le scénario B donne lui des émissions à hauteur de **259.596 téqCO₂**.

Comparaison avec les résultats de 2012

Lors de la première version bilan élaborée en 2012, le budget des études préalables était réparti entre 2010 et 2024 pour un montant global de 2,2 milliards d'euros. En 2018, le budget global a été réestimé à 3,8 milliards d'euros et a été réparti sur une période plus large, entre 2011 et 2030. Comme détaillé ci-avant, les facteurs d'émissions ont par ailleurs été revus à la hausse.

Suite aux précisions quant aux dépenses notamment expliquées par l'élargissement du réseau pris en compte et la réévaluation du budget global de construction et à l'ajustement des facteurs d'émissions, les émissions de CO₂ associées aux études préalables ont augmenté sensiblement de 146.600 téq CO₂ dans le bilan de 2012 à 419.935 téqCO₂ ou 259.596 téqCO₂ maintenant, soit une hausse de 190 ou 80%.

5.3. Construction

Lors de la mise à jour 2018 du bilan, les émissions de CO₂ ont été calculées plus précisément par ouvrage en distinguant notamment : les lignes 14, 5 Ouest, 15 Est, 15 Sud, 16 (y compris tronçon commun avec la ligne 17), 17 et 18 ainsi que les différents centres d'exploitation et de maintenance (Vitry, Aulnay, Rosny-Bois-Perrier, Palaiseau, Morangis, Champigny) (raccordements à la ligne associée, équipements ferroviaires et volumes bâtis).

Les grandes options retenues sont notamment :

- Le métro souterrain est pour la plupart constitué d'un tunnel comportant deux voies ferrées et d'environ 10 m de diamètre externe entièrement en béton. Sur la ligne 17 Nord, la partie tunnel est monovoie et est doublée. Le diamètre externe passe à environ 7 m.
- Le métro aérien est quant à lui constitué d'un viaduc reposant sur des piles de 12 m de haut au maximum (3,5 km de la ligne 17 Nord et 12,4 km de la ligne 18).

Pour rappel, la quantification des émissions de GES de la construction prend en compte :

- Les émissions de GES liées à l'énergie consommée par les différents outils mis en œuvre pour le creusement des tunnels, l'évacuation des déblais et la mise en place des remblais, en considérant trois modes de transport (routière, fluviale, ferroviaire) et une distance moyenne d'évacuation ;
- Les émissions de GES dues à la fabrication des matériaux consommés pour les différents ouvrages construits : les bétons et les ciments en part prépondérante, mais également les métaux et les autres matériaux (ou ensemble de matériaux) ;
- Les émissions de GES liées au fret des matériaux consommés et des déblais ;
- Les émissions de GES liées à l'organisation du chantier sont comptabilisées de manière transversale à travers les postes de dépenses énergétiques, de déplacements et de construction des infrastructures de base.

Les facteurs d'émissions les plus impactant sont les longueurs de voie et les superficies des gares construites.

Au total, la phase de construction génère environ **4.811.082 t éqCO₂** (soit environ 23.230 t éqCO₂ par km de double voie) selon le scénario A. Le scénario B donne quant-à-lui des émissions à hauteur de **4.618.100 t éqCO₂** (soit environ 22.299 t éqCO₂ par km de double voie).

La répartition de ces émissions entre les différents types d'ouvrages et matériaux selon le scénario A sont illustrés dans le tableau et le graphique ci-dessous.

Ces tableaux et figures montrent que les émissions liées à la construction sont principalement dues aux matériaux mis en œuvre. Parmi ces matériaux, le poste le plus prépondérant est celui dû aux bétons et ciments qui présentent la particularité d'avoir un procédé de fabrication émissif (en plus des quantités mises en œuvre).

Consciente de l'importance du béton dans le bilan des émissions de GES, la SGP évalue actuellement les solutions permettant de réduire l'emprunte carbone du béton utilisé notamment au travers de l'utilisation potentielle de béton fibré.

Ramenées au km de voie double réalisée, les émissions de la construction d'un tunnel par tunnelier sont environ deux fois plus importantes que celles de la réalisation d'une tranchée couverte. Cela s'explique en très grande partie par l'emploi de matériaux : la construction par tunnelier met en œuvre une quantité très supérieure de béton ou de ciment (notamment pour le radier) que la construction en tranchée couverte.

Tableau 14 : Emissions globales liées à la construction par catégorie, scénario A (source : CarbOptimum, 2018)

	Tunnels par tunnelier	Tranchées couvertes	Tranchées ouvertes	Ouvrages d'art aériens	Sections de surface	Equipements ferroviaires	Bâtiments, quais et voirie	Organisation du chantier	Puits
Km de dble voie	161	4	8	16	17	207			
tCO₂e									
Energie, déblais et remblais	31.980	1.947	2.849	0	3.410	0	29.617	1.421	6.338
Bétons, ciments	1.797.393	28.350	60.869	0	0	114.128	0	0	45.883
Métaux	0	0	0	0	0	572.541	0	0	0
Autres matériaux	0	0	0	377.969	0	740	1.255.177	0	0
Transport et fret	246.594	5.997	6.760	0	0	16.082	68.548	95.858	24.865
Changement usage des sols	0	0	0	0	0	0	15.766	0	0
TOTAL	2.075.967	36.293	70.478	377.969	3.410	703.491	1.369.108	97.279	77.087
					4.811.082				
Par km de dble voie	12.890	8.710	8.647	23.409	199	3.397			
					23.230				

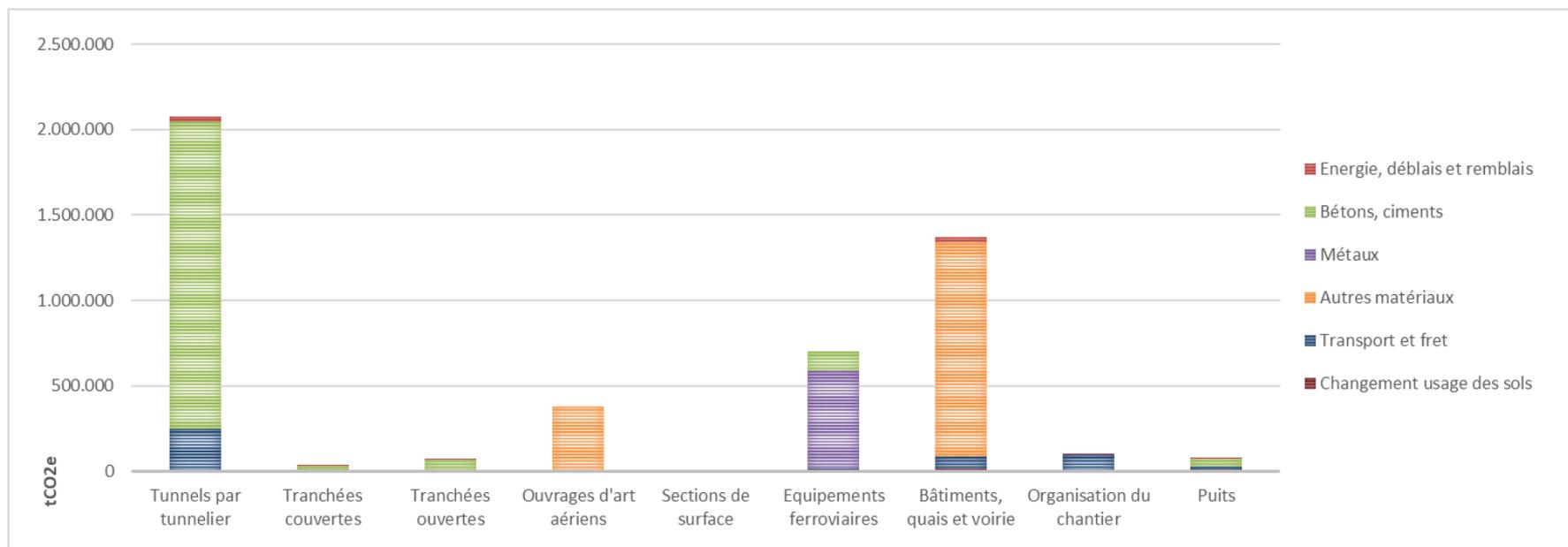


Figure 12 : Emissions globales liées à la construction par catégorie, scénario A (source : CarbOptimum, 2018)

La répartition de ces émissions entre les lignes et les ouvrages est illustrée dans la figure suivante :

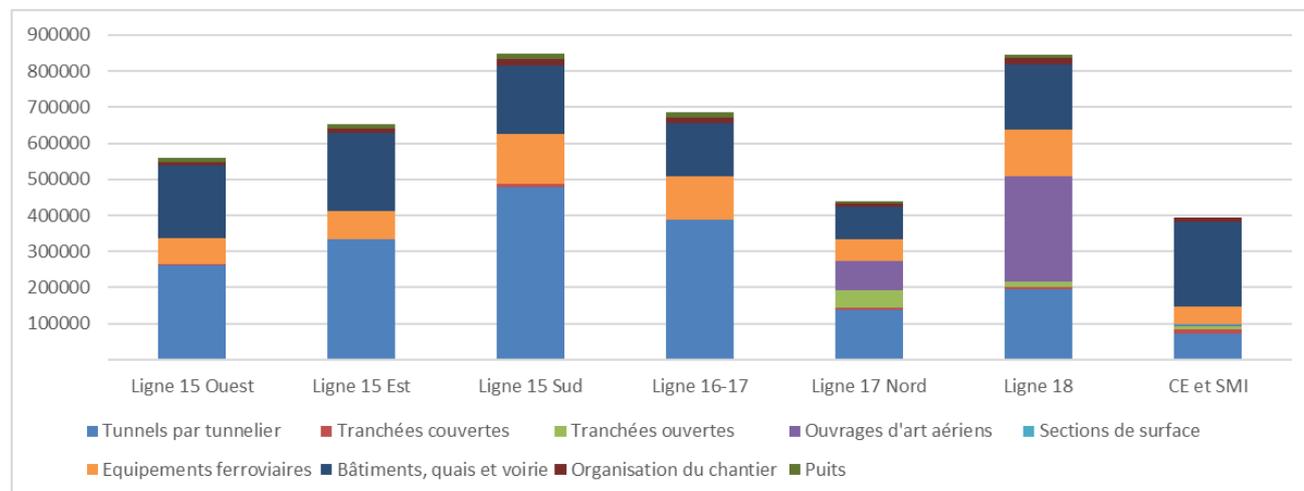


Figure 13 : répartition des émissions liées à la construction du GPE entre les différentes lignes et les différents ouvrages, scénario A (Source : CarbOptimum 2018)

Comparaison avec les premiers résultats en 2012

La mise à jour du CarbOptimum a impliqué plusieurs réestimations de variables d'entrée ainsi que certaines améliorations de l'outil. Les principaux changements concernent la révision du linéaire en tunnels, tranchées couvertes, tranchées ouvertes, viaducs et sections de surface, (impactant également les émissions liées aux équipements ferroviaires), la prise en compte de l'ensemble des ouvrages annexes souterrains (puits), la hausse du nombre de gares et la révision des surfaces et volumes pour les bâtiments, quais et voiries ainsi que la réestimation de la durée de chantier et du personnel mobilisé.

Par ailleurs, les facteurs d'émission du ciment et du ferrailage pour le béton armé ont été revus à la baisse. Ces modifications ne modifient pas de manière importante les premiers résultats obtenus mais diminuent tout de même les émissions de GES liées au béton armé.

Le tableau ci-après reprend les résultats des émissions de GES liées à la construction pour le bilan 2018 en perspective avec les résultats du bilan 2012.

Tableau 15 : Répartition des émissions de CO₂ entre les différentes catégories, respectivement pour l'ensemble des lignes, pour l'ensemble des centres d'exploitation et de maintenance, pour l'ensemble du Grand Paris Express (lignes et CE) lors de la mise à jour du CarbOptimum 2018, en comparaison avec la version de 2012, en tonnes équivalent CO₂

Unité : tCO ₂ e	Mise à jour CarbOptimum 2018, scénario A			CarbOptimum 2012
	Lignes	Centres d'exploitation	GLOBAL	GLOBAL
Tunnels par tunnelier (monotube bivoie ou bitube monovoie)	2.005.575	70.392	2.075.967	2.660.000
Tranchées couvertes et ouvertes	85.514	21.258	106.772	114.000
Ouvrages d'art aériens (viaduc, ponts et sauts de moutons)	373.371	4.598	377.969	500.000
Ouvrages d'art annexes souterrains (puits)	77.087	0	77.087	0
Sections de surface	1.864	1.545	3.410	0
Equipements ferroviaires	653.481	50.010	703.491	370.000
Bâtiments, quais et voirie	1.134.245	234.863	1.369.108	403.000
Organisation du chantier (déplacements des employés et énergie de base de la vie sur le chantier).	86.579	10.700	97.279	25.600
TOTAL	4.417.717	393.365	4.811.082	4.080.000

Au total, les émissions liées à la construction passent donc de 4.080.000 t_{éq}CO₂ dans le bilan 2012 à 4.811.082 t_{éq}CO₂ selon le scénario A et 4.618.100 t_{éq}CO₂ selon le scénario B, soit une **augmentation de 18 ou 13%** selon les scénarios.

Il faut cependant noter que la majorité de cette augmentation est liée à l'augmentation du linéaire pris en compte dans le bilan. Les deux tableaux ci-après juxtaposent à cet effet les km de double voie considérés par catégorie d'ouvrages, respectivement pour les versions du bilan 2012 et 2018.

Tableau 16 : Linéaire en km de double voie considéré par catégorie d'ouvrages respectivement pour les versions du bilan 2012 et 2018 (source : STRATEC 2012 et 2018)

Km de double voie	Tunnels par tunnelier	Tranchées couvertes	Tranchées ouvertes	Ouvrages d'art aériens	Sections de surface	Equipements ferroviaires
2012	147	12	0	22	0	181
2018	161	4	8	16	17	207
dont lignes	156	3	7	16	9	192
dont CE	5	2	1	0	8	15

Ramenées aux km de double voie construite, les émissions passent donc de 22.500 t_{éq}CO₂ par km dans le bilan 2012 à 23.230 t_{éq}CO₂ selon le scénario A et 22.299 t_{éq}CO₂ selon le scénario B, soit une augmentation ou une diminution de +3% ou -1% selon les différents scénarios.

Tableau 17 : Emissions liées à la construction par catégorie lors de la première version du bilan des émissions de GES (source : CarbOptimum, 2012)

		Tunnels par tunnelier	Tranchées couvertes	Ouvrages d'art aériens	Sections de surface	Equipements ferroviaires	Bâtiments, quais et voirie	Organisation du chantier
Km de double voie		147	12	22	0	181		
tégCO ₂	Energie, déblais et remblais	29 400	5 510	0	0	0	23 300	424
	Bétons, ciments	2 390 000	90 200	0	0	124 000	0	0
	Métaux	0	0	0	0	238 000	0	0
	Autres matériaux	0	0	500 000	0	0	312 000	0
	Transport et fret	248 000	18 600	0	0	8 850	67 700	25 100
	Changement usage des sols	0	0	0	0	0	521	0
	TOTAL	2 660 000	114 000	500 000	0	370 000	403 000	25 600
	Par km de dble voie (181)	4 080 000							22 500

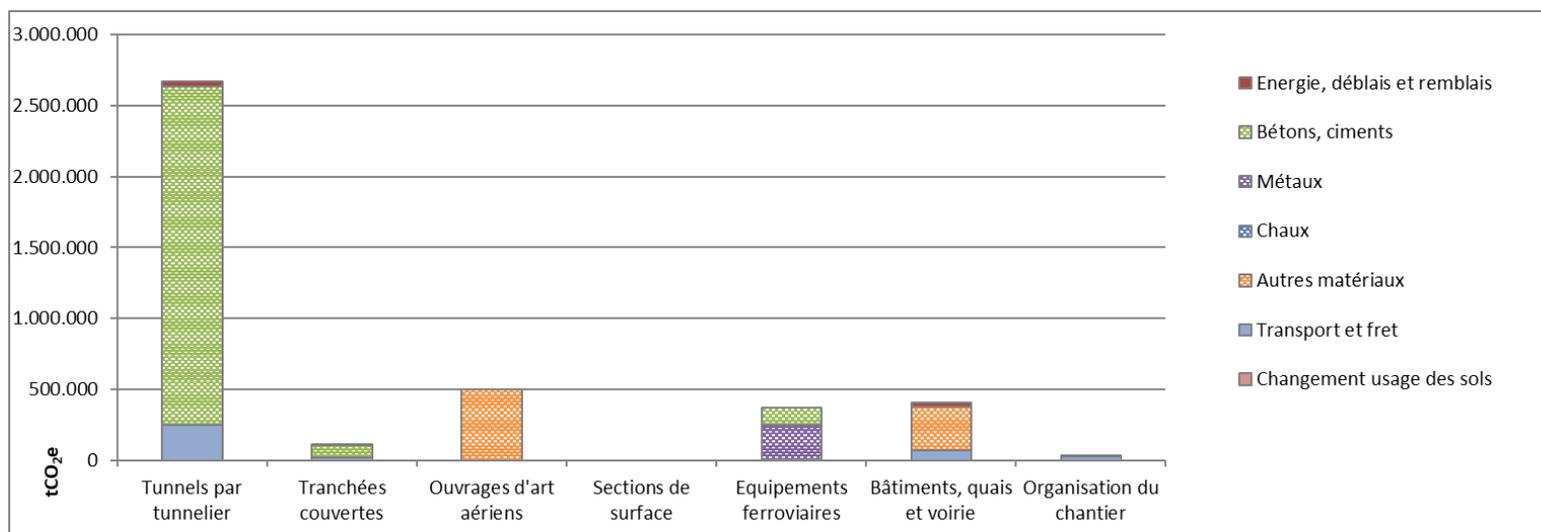


Figure 14 : Emissions liées à la construction par catégorie lors de la première version du bilan des émissions de GES (source : CarbOptimum, 2012)

5.4. Fonctionnement

Les émissions annuelles liées à l'**énergie de traction** des différentes lignes sont calculées à partir des hypothèses de trafic présentées précédemment pour un total de 265.830.000 rame.km par an pour l'ensemble des lignes. Les émissions liées à l'énergie de traction sont ainsi estimées au total à environ **696.091 téqCO₂** dans le scénario A entre 2021 et 2050. Le scénario B donne lui **470.562 téqCO₂** entre 2021 et 2050.

La **consommation en énergie des gares et bâtiments techniques** génère environ **113.720 téqCO₂** entre 2021 et 2050 (réparties en respectivement 75.013 t éqCO₂ pour les gares et 38.708 t éqCO₂ pour les centres d'exploitation et de maintenance) selon le scénario A. Les scénarios B évalue quant-à-lui ces émissions à respectivement 71.038 téqCO₂.

Les émissions liées à l'**entretien et à la gestion** représentent une part importante des émissions liées au fonctionnement de l'infrastructure s'élevant au total pour l'ensemble des lignes à **1.115.295 téqCO₂** entre 2021 et 2050 selon le scénario A. Le budget est réparti au fur et à mesure de l'ouverture progressive de l'infrastructure complète, proportionnellement au linéaire ouvert. Selon le scénario B, ces émissions sont réduites à **689.455 téqCO₂**.

Les émissions de **renouvellement pour les équipements ferroviaires et pour les bâtiments** sont estimées à environ **1 185 223 t éqCO₂ par** entre 2021 et 2050 selon le scénario A et **996.401 téqCO₂** selon le scénario B.

Les **émissions globales de CO₂ liées à l'ensemble du fonctionnement de l'infrastructure** sont ainsi estimées à **3.110.329 t éqCO₂**, pour l'énergie de traction du métro, l'énergie des bâtiments (gares, locaux techniques, en électricité et chauffage), le renouvellement et les activités de gestion et d'entretien selon le scénario A. Selon le scénario B, ces émissions sont réduites à **2.227.456 téqCO₂**.

La répartition des émissions liées au fonctionnement entre les différents postes et selon le scénario A est représentée dans le graphique suivant :

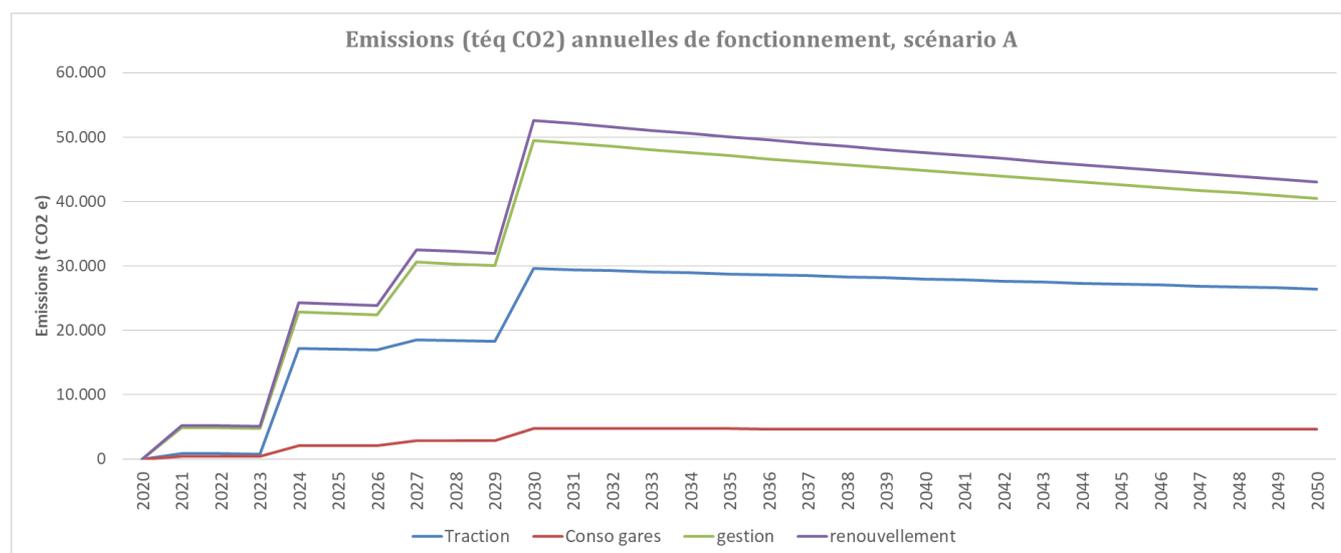


Figure 15 : Emissions de fonctionnement (t éq CO₂) annuelles globalement pour les différentes lignes du Grand Paris et pour les centres d'exploitation et de maintenance, scénario A (source : CarbOptimum 2018)

Il apparaît donc que le poste le plus important du fonctionnement concerne les activités de gestion, de pilotage et d'entretien, suivies de près des dépenses liées aux renouvellements à prévoir pour

l'infrastructure. L'énergie de traction et la consommation énergétique des gares et bâtiments techniques viennent ensuite dans des proportions moindres.

Comparaison avec les premiers résultats en 2012

Les hypothèses de fonctionnement ont été revues sur base des nouvelles données transmises par la Société du Grand Paris : nombre de rame.km par ligne, nombre de places offertes par voiture et kWh par voiture.km, budgets liés aux activités de gestion, de marketing, de pilotage et d'entretien. Les émissions liées à la consommation énergétique des gares et bâtiments techniques ainsi que les émissions liées au renouvellement du matériel et opérations lourdes de rénovation ont été calculées sur base des nouvelles estimations de surfaces bâties et sur la révision du linéaire des équipements ferroviaires. Les facteurs d'émissions ont également été revus et déclinés selon 2 scénarios.

Les émissions réestimées à travers la mise à jour du bilan en 2018 sont moins élevées que les émissions estimées en 2012 (3.204.700 t éqCO₂). Ainsi, **le scénario A évalue les émissions liées au fonctionnement du métro de 2020 à 2050 à 3.110.329 t éqCO₂** en baisse de 3% et le scénario B évalue les émissions à 2.227.456 t éqCO₂ en baisse de 30%.

Plus précisément, les **émissions liées à l'énergie de traction** pour l'ensemble des lignes sont estimées dans le bilan 2018 à environ 696.091 t éqCO₂ au total entre 2021 et 2050. Ces émissions sont plus faibles que celles estimées en 2012 (1.071.748 t éqCO₂ entre 2021 et 2050), suite aux révisions des fréquences des trains, des dates de mise en service, de la capacité des rames (en 2012, il été considéré une capacité de 250 personnes par voitures pour les L14 et L15, et 112 pour les lignes 16-17 et 18) et du facteur d'émission de l'énergie électrique.

La consommation en énergie des gares et bâtiments techniques génère environ 113.720 t éqCO₂ au total entre 2021 et 2050 dans la version 2018, selon le scénario A. Ces émissions sont nettement plus faibles que celles estimées dans la version 2012 (323.891 t éqCO₂ entre 2021 et 2050) suite à la révision des surfaces chauffées et des consommations moyennes des bâtiments. Pour les centres d'exploitation et de maintenance, le chauffage des bâtiments a été considéré pour 25% des surfaces aériennes et souterraines seulement.

Les émissions liées à l'entretien et à la gestion ont été réévaluées en 2018 sur base des budgets prévisionnels pour ces activités à environ 508 M€/an pour l'ensemble des lignes, contre 600 M€/an repris dans la version 2012 et avec une révision des facteurs d'émissions. Dans le cas du scénario A, cela donne des émissions de 1.115.295 téq CO₂ au total entre 2021 et 2050, contre 1.323.096 téq CO₂ en 2012.

Enfin, les émissions de rénovation pour les équipements ferroviaires et pour les bâtiments ont été évaluées en 2018 selon le scénario A à 1.185.223 téqCO₂ entre 2021 et 2050 contre 485.965 téqCO₂ en 2012, soit plus de deux fois plus élevées. Cette augmentation est liée aux augmentations des surfaces des gares et de l'augmentation du linéaire de voies pris en compte dans le bilan.

5.5. Mobilité

Les résultats issus du modèle multimodal MODUS et les analyses qui ont suivi montrent qu'il est difficile de quantifier précisément les incidences du métro du Grand Paris sur le trafic de véhicules motorisés en Ile-de-France. Il en résulte la définition d'hypothèses relativement différentes selon les scénarios envisagés dans le bilan 2018 en comparaison avec le bilan 2012. Par contre, les facteurs d'émissions retenus en 2012 ont été vérifiés et ont été conservés car ils restaient pertinents.

Le graphe suivant représente les émissions évitées grâce au projet au cours du temps. Ils mettent en évidence la distinction entre les émissions liées aux distances parcourues et les émissions liées aux vitesses des véhicules.

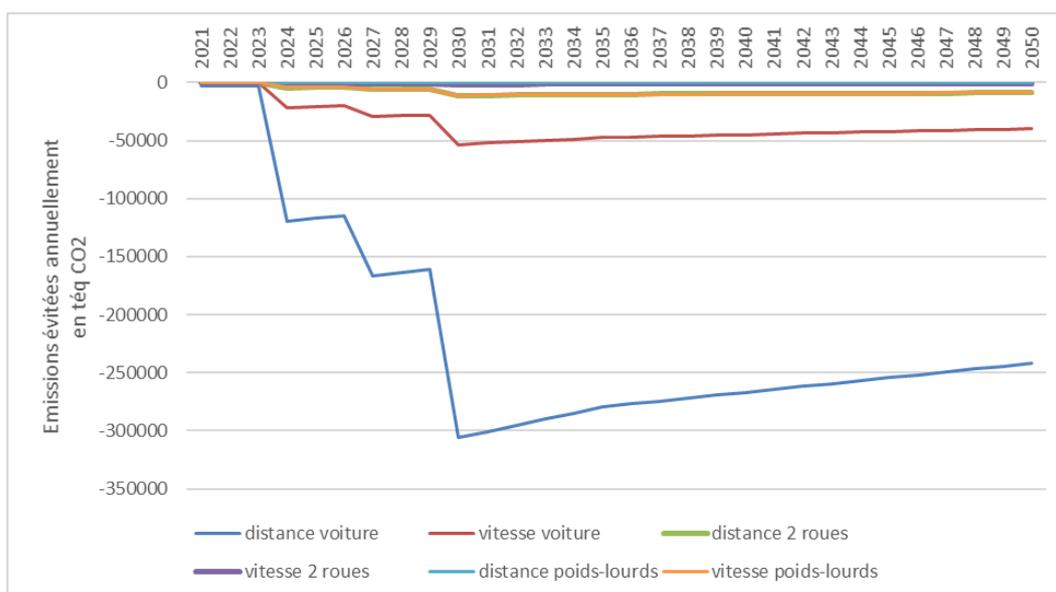


Figure 16 : Emissions évitées annuellement (téc CO₂) grâce aux impacts du GPE sur trafic routier, scénario A (source : CarbOptimum 2018)

Selon le scénario A, ce sont près de 400.000 ttecCO₂ économisées par an dès le réseau entièrement mis en service (-382.193 ttecCO₂ en 2030). Entre 2021 et 2050 ce sont ainsi **8.078.899 ttecCO₂** économisées grâce à la diminution du trafic routier et à l'amélioration des conditions de circulation.

Le scénario B évalue quant-à-lui ces émissions évitées entre 2021 et 2050 à 13.298.166 ttecCO₂.

Comparaison avec les premiers résultats en 2012

Le bilan 2012 des émissions évitées grâce au trafic routier étaient de **-7.030.199 ttec CO₂** selon les hypothèses basses et **-7.429.728 ttecCO₂** selon les hypothèses hautes. Les émissions évitées grâce au métro dans la mise à jour de 2018 sont donc de 9 à 15% plus élevées selon le scénario A et 79 à 89% plus élevées selon le scénario B.

Outre la variabilité dans les hypothèses retenues en termes de véhicule.kilomètres parcourus et de consommations de carburant, les différences d'émissions s'expliquent également par la mise à jour des dates de mise en service des différentes lignes du Grand Paris Express.

5.6. Développement territorial

Au total entre 2015 et 2050, les émissions évitées grâce aux effets induits du Grand Paris Express sur le développement territorial sont évaluées à **-14.501.943 t_{éq}CO₂** selon le scénario A et **-22.381.051 t_{éq}CO₂** selon le scénario B.

Les émissions liées aux effets induits sur le développement territorial selon le scénario A sont représentées de manière cumulative sur le graphique suivant :

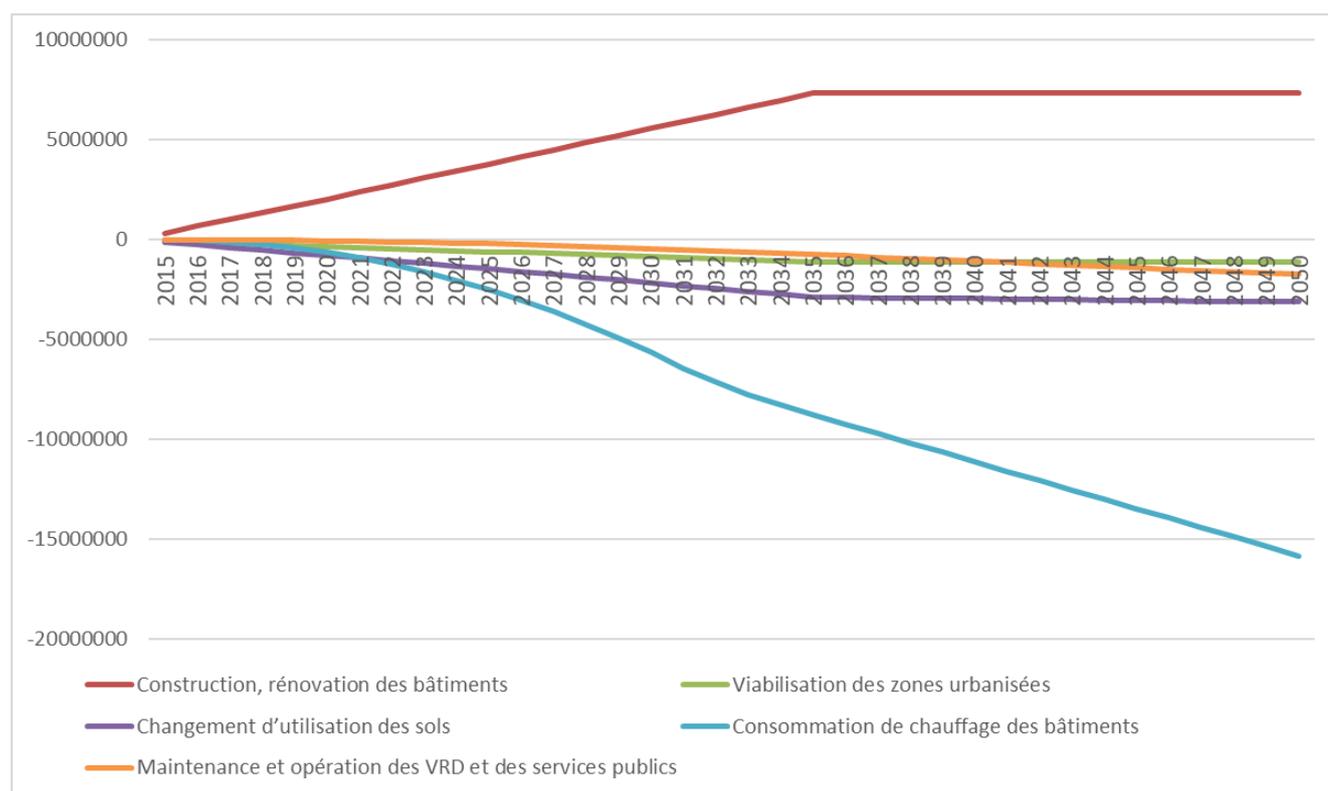


Figure 17 : Emissions de GES liées au développement territorial cumulées au cours du temps en t_{éq}CO₂, scénario A (source : CarbOptimum 2018)

Les graphiques des scénarios prudents et optimistes présentent la même allure générale bien que l'amplitude soit modifiée.

Comparaison avec les premiers résultats en 2012

Si les impacts du développement territorial sur les émissions de GES restent très importants, ils sont néanmoins largement réduits par rapport au bilan de 2012 qui prévoyait -26,700 millions de t éqCO₂ dans le scénario bas et -33,500 millions de t éqCO₂ dans le scénario haut. Cela représente une diminution des émissions évitées de 16 à 57% selon les scénarios.

Cela est notamment dû aux hypothèses retenues concernant les effets induits du Grand Paris Express sur la localisation des populations et des emplois, sur l'occupation du sol et sur la densification du bâti et qui sont plus prudentes dans la mise à jour de 2018 par rapport à celles retenues en 2012.

6. BILAN GLOBAL DES EMISSIONS DE GES LIEES AU PROJET DU GRAND PARIS EXPRESS

Le bilan général des émissions de GES induites et évitées par le Grand Paris Express est obtenu en sommant les émissions relatives aux différents postes précédemment explicités : études préalables, construction, fonctionnement de l'infrastructure, mobilité et développement territorial.

Les résultats du bilan aux horizons 2050 et 2070 et selon les scénarios envisagés sont repris dans le tableau ci-dessous :

Tableau 18 : Résultats du bilan aux horizons 2050 et 2070 selon les scénarios en millions de t_{éq}CO₂

Cumul des émissions en 10 ⁶ de t _{éq} CO ₂	Horizon de temps	
	2050	2070
Scénario		
Scénario A	-14,2	-27,4
Scénario B	-28,6	-51,3

Les émissions cumulées année par année selon les différents postes pour les scénarios A et B sont représentées dans les graphiques ci-dessous :

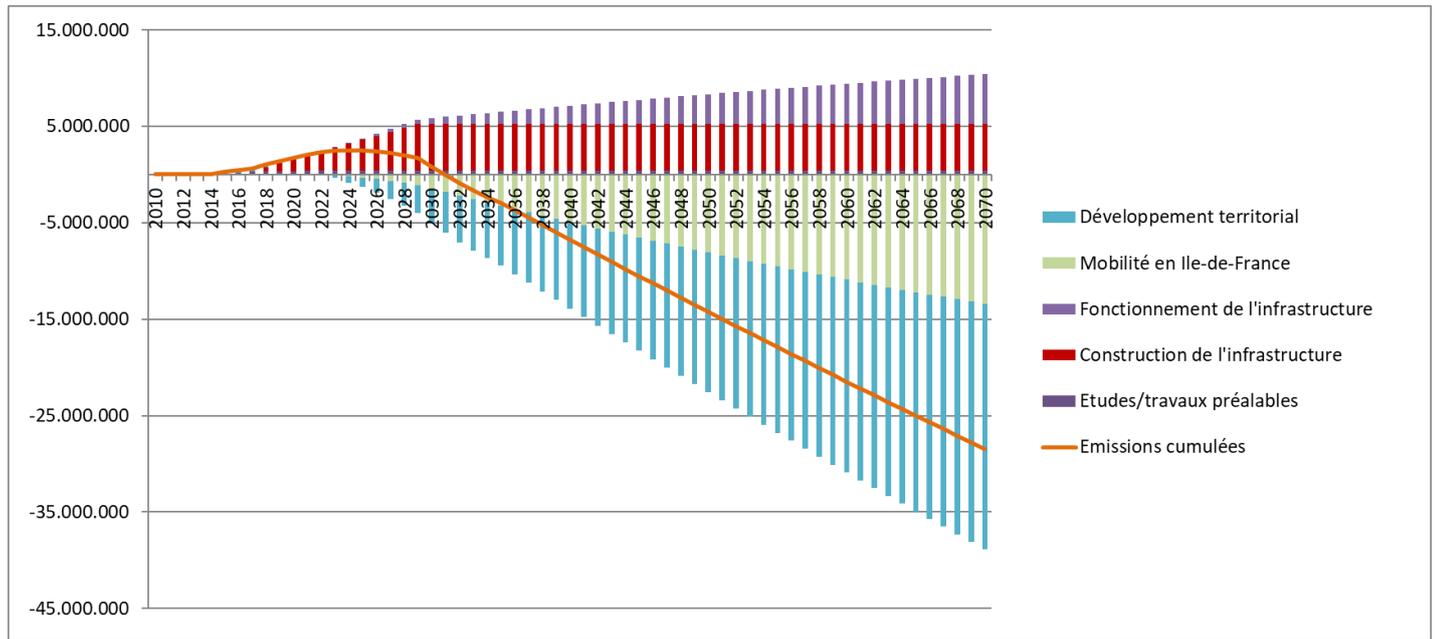


Figure 18 : bilan des émissions de GES liées au projet du Grand Paris Express au cours du temps et selon le scénario A, en tégCO₂ (source : CarbOptimum 2018)

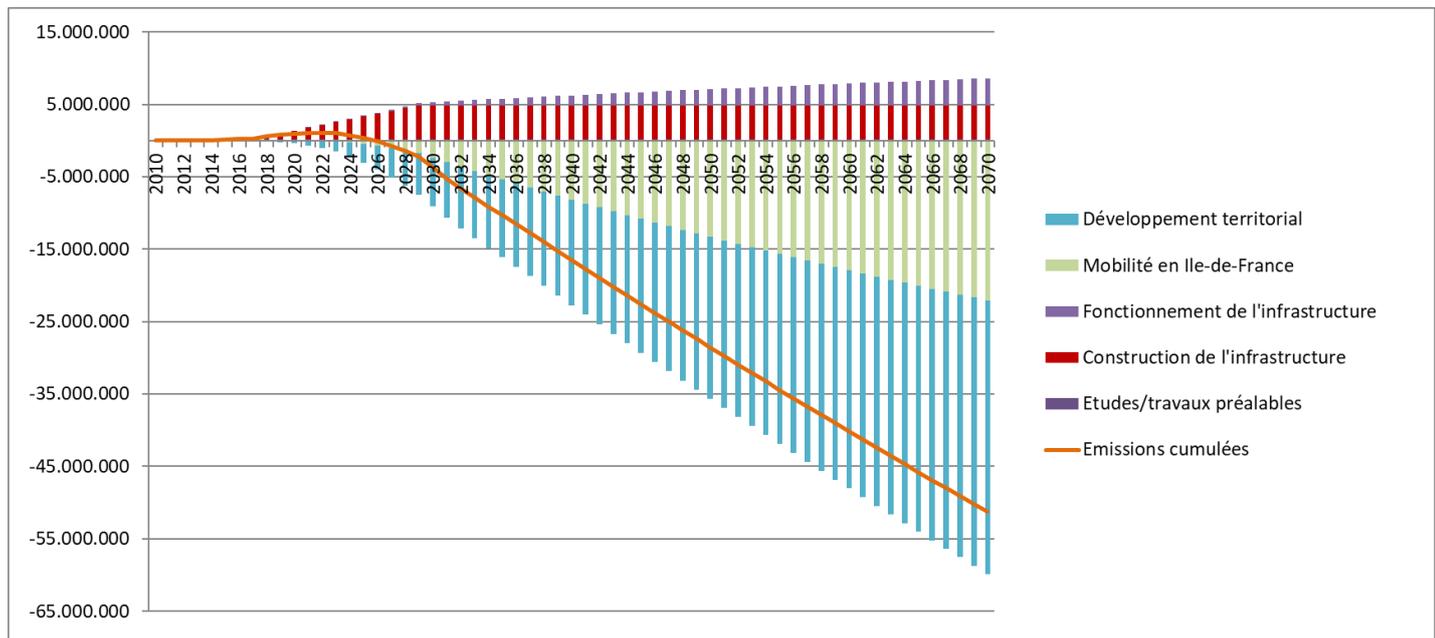


Figure 19 : bilan des émissions de GES liées au projet du Grand Paris Express au cours du temps et selon le scénario B, en tégCO₂ (source : CarbOptimum 2018)

Comme attendu, la première phase du projet induit plus d'émissions de GES qu'elle ne permet d'en éviter. A partir de 2025 dans le cas du scénario A et à partir de 2022 dans le cas du scénario B, la tendance s'inverse et les émissions évitées compensent alors peu à peu les émissions induites grâce au développement territorial et aux émissions évitées par le trafic routier.

Ces graphiques montrent que l'investissement d'émissions de GES consenti lors de la construction est important et qu'il faut un certain temps pour que les diminutions d'émissions liées à la mobilité et au développement plus durable du territoire ne les compensent. Néanmoins, le bilan des émissions de GES devient positif à partir de 2031 dans le cas du scénario A et 2026 dans le cas du scénario B. A partir de là, les gains annuels rendent le bilan du projet de plus en plus positif.

Ainsi, entre 2030 et 2070, soit lorsque l'infrastructure est en plein fonctionnement, le projet permet d'éviter environ 754 465 téqCO₂ par an selon le scénario A et 1 225 801 téqCO₂ par an selon le scénario B. Cette réduction est à comparer avec les émissions annuelles de la Région Ile-de-France estimées à 40,5 millions de téqCO₂ par an¹⁹ soit une diminution comprise entre -1,8% et -3,0%.

Que ce soit dans le bilan 2010-2050 ou 2010-2070, ce sont les émissions évitées grâce à une urbanisation plus dense et un bâti plus efficace du point de vue énergétique qui sont prédominantes comme illustré également dans les figures suivantes.

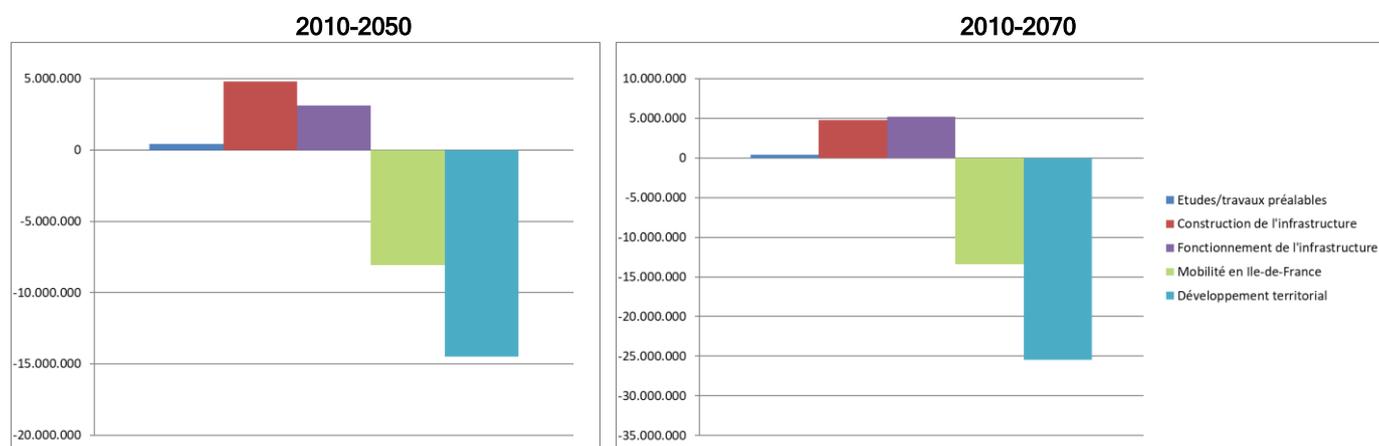


Figure 20 : Somme des émissions 2010-2050 et 2010-2070 par poste selon le scénario A, en téqCO₂.

Les émissions consenties au départ étant fixes et la durée de vie attendue de l'infrastructure étant de plus de 100 ans, la prédominance du développement territorial et dans une moindre mesure de la mobilité dans le bilan ne fait que s'amplifier au-delà de 2050, rendant le bilan très positif sur la durée de vie de l'infrastructure.

De manière générale, quel que soit le scénario, le bilan est positif à l'horizon 2050 soit seulement 20 ans après la mise en service de l'ensemble des lignes du Grand Paris Express. Ce sont ainsi **14,2 millions de téqCO₂** évitées selon le scénario A et **28,6 millions de téqCO₂** selon le scénario B. En 2070, soit 40 ans après la mise en service de l'ensemble des lignes, les émissions évitées s'élèvent alors à **27,4 millions de téqCO₂** évitées selon le scénario A et **51,3 millions de téqCO₂** selon le scénario B.

Les résultats démontrent donc l'utilité du projet en termes de mobilité et de développement territorial plus durables en Ile-de-France, qui permettent une réduction sensible des émissions de GES.

Les résultats soulignent également l'importance de mettre en place des mesures d'accompagnement permettant d'assurer un développement intégré de la ville entre les transports et l'aménagement du territoire.

Globalement, le projet de métro du Grand Paris devrait donc permettre de réduire de manière très significative les émissions de gaz à effet de serre et participer dans ce sens à atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre définis dans le Grenelle de l'environnement et dans la Stratégie Nationale Bas Carbone.

¹⁹ <https://www.airparif.asso.fr/etat-air/air-et-climat-bilan-emissions#ges>

Comparaison avec les premiers résultats en 2012

Les bilans de 2012 présentent une allure similaire avec une prédominance des émissions liées au développement territorial puis de celles liées à la mobilité en Ile-de-France :

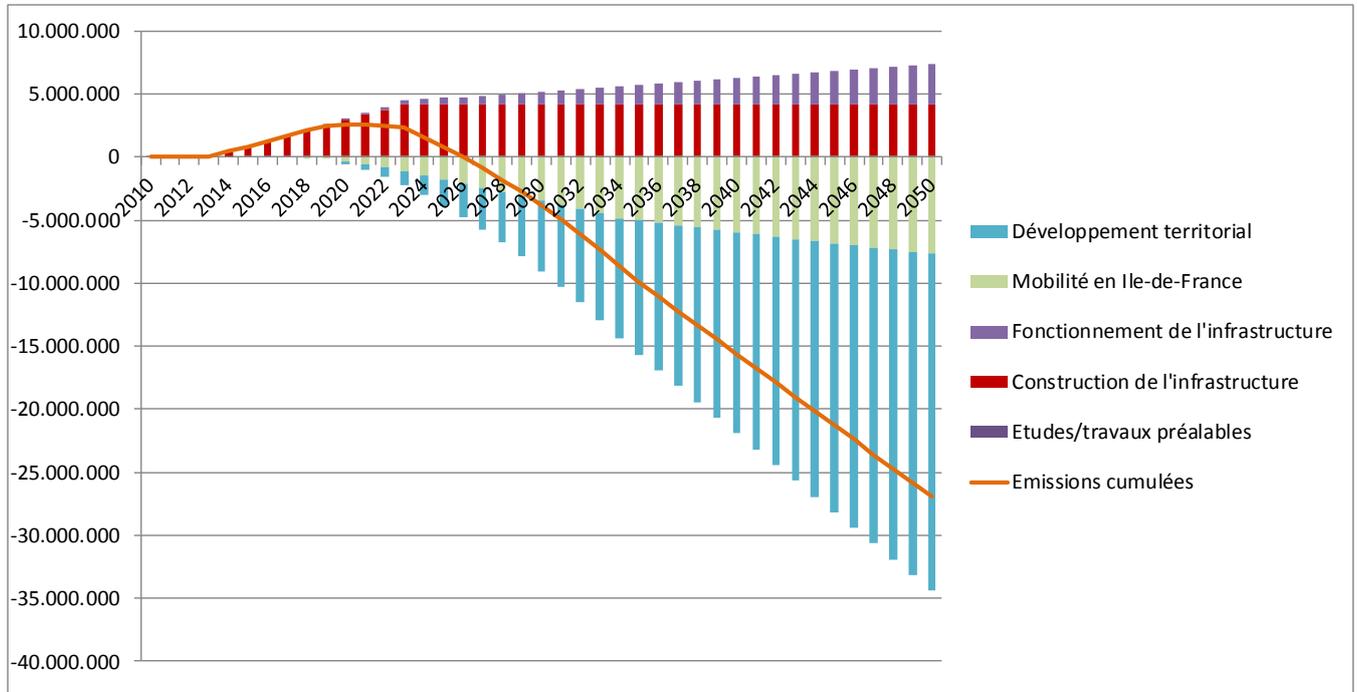


Figure 21 : Bilan des émissions du réseau de métro automatique du Grand Paris Express (tég CO₂) (source : CarbOptimum 2012, hypothèses basses)

L'échelle de représentation était néanmoins différente puisqu'elle démarrait en 2005 et se terminait en 2050 alors que dans la mise à jour la fourchette 2010-2070 a été préférée.

La comparaison des différents postes à l'horizon 2050 présente également une allure similaire :

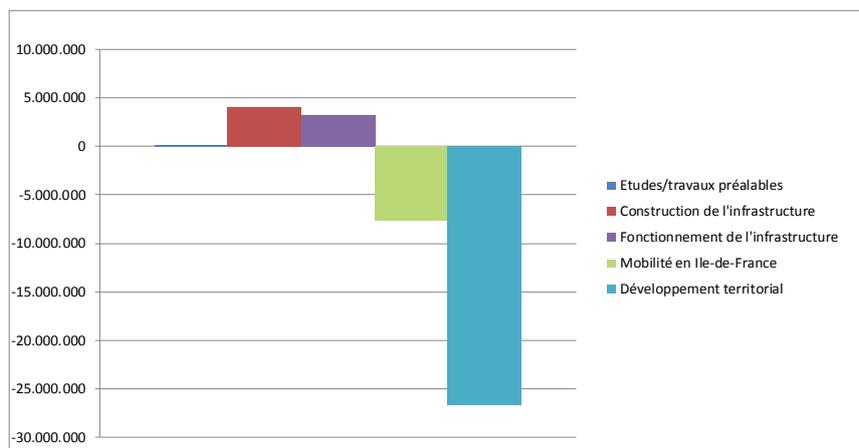


Figure 22 : Comparaison des thématiques à 2050 (tég CO₂), hypothèses basses (source : CarbOptimum 2012)

Le tableau suivant reprend les valeurs des différents postes d'émissions dans les versions de 2012 et de 2018 selon les différents scénarios envisagés.

Tableau 19 : Emissions de GES en téqCO₂ par poste pour les différents scénarios selon les bilans de 2012 ou 2018

Emissions induites (+) ou évitées (-) en Téq CO ₂	2012		2018	
	hypothèses basses	hypothèses hautes	Scénario A	Scénario B
Etudes et travaux préalables	146 600	146 600	419 935	259 596
Construction de l'infrastructure	4 076 658	4 076 658	4 811 082	4 618 100
Fonctionnement de l'infrastructure	3 204 700	3 204 700	3 110 329	2 227 456
Mobilité en Ile-de-France	-7 665 803	-7 429 728	-8 078 899	-13 298 166
Développement territorial	-26 712 309	-33 476 053	-14 501 943	-22 381 051
Total 2010-2050	-26 950 154	-33 477 823	-14 239 497	-28 574 064

Comme le montrent ces résultats, la mise à jour de 2018 a apporté des augmentations ou des diminutions des émissions liées à certains postes de manière variées selon les différents scénarios. Dans l'ensemble, les bilans de 2012 (hypothèses basses et hautes) se rapprochent davantage du scénario B réalisé en 2018.

7. DISCUSSION : LE ROLE DU GRAND PARIS EXPRESS DANS LA STRATEGIE NATIONALE BAS CARBONE

7.1. Contexte

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) a été adoptée par le Ministère de la Transition écologique et solidaire en décembre 2018. Cette stratégie propose des objectifs cohérents avec les engagements de la France auprès de l'Union Européenne, dans le cadre de l'Accord de Paris, ainsi qu'avec les engagements nationaux d'une réduction de 40% des émissions de gaz à effet de serre (GES) entre 1990 et 2030. Ces engagements correspondent à une réduction globale pour l'ensemble des secteurs.

Le cap de la neutralité carbone dès 2050 a été renouvelé par le Plan Climat en date de juillet 2017, pour le territoire français. La SNBC rappelle que cet objectif, bien qu'il soit particulièrement ambitieux, est nécessaire pour contenir le réchauffement climatique à 1,5°C d'après les travaux du GIEC. Dès lors, le principe de la neutralité carbone est adopté par la SNBC. Pour atteindre un niveau zéro émissions à l'horizon 2050, les émissions de GES des différents secteurs doivent être exactement compensées par les puits de GES à disposition. Une répartition en ce sens est proposée au sein de la SNBC.

Les secteurs émetteurs de GES identifiés dans la SNBC sont l'agriculture, l'industrie manufacturière, les déchets, les bâtiments, les transports et l'industrie de l'énergie. Les sources de puits de GES identifiés sont par ailleurs les puits de capture et stockage du carbone, les produits bois, les autres terres et les forêts.

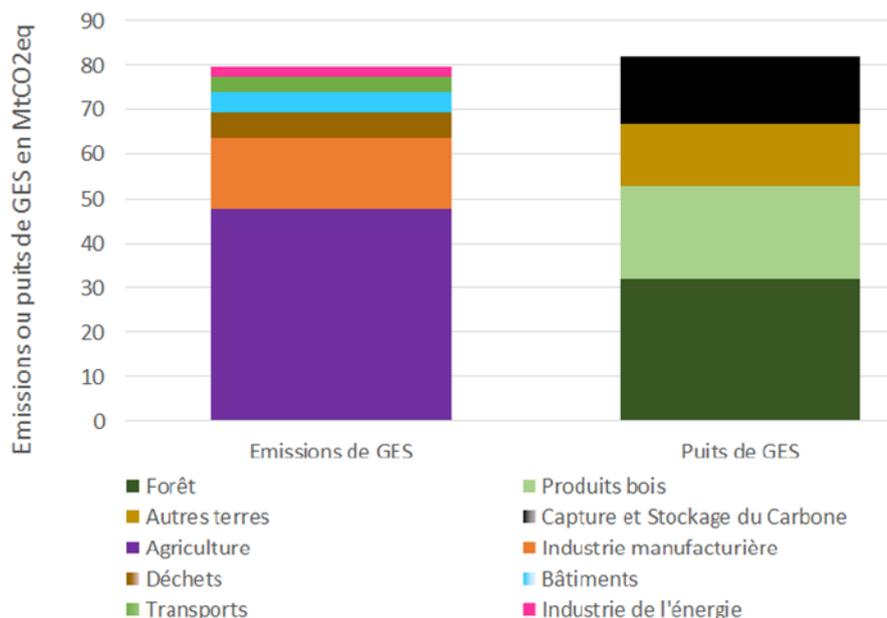


Figure 23 : Puits et émissions de gaz à effet de serre en France en 2050 selon le scénario de référence de la SNBC (source : SNBC Résumé, 2018, p.5)

7.2. Cas du secteur des transports dans la SNBC

Les trajectoires de réduction des émissions liées aux transports fixées dans la SNBC réduisent à environ 4 milliards de t eqCO_2 par an à l'horizon 2050, les émissions du secteur des transports, pour le territoire français. Les émissions résiduelles pour le secteur des transports sont celles liées aux énergies fossiles conservées pour les transports aériens et maritimes internationaux, le transport aérien domestique et des fuites résiduelles « incompressibles » de gaz renouvelables. Il s'agit donc d'une décarbonation quasi-complète pour le secteur des transports dans son ensemble, mais d'une décarbonation complète pour les déplacements terrestres (véhicules particuliers, transports routiers de personnes et de marchandises, transports en commun).

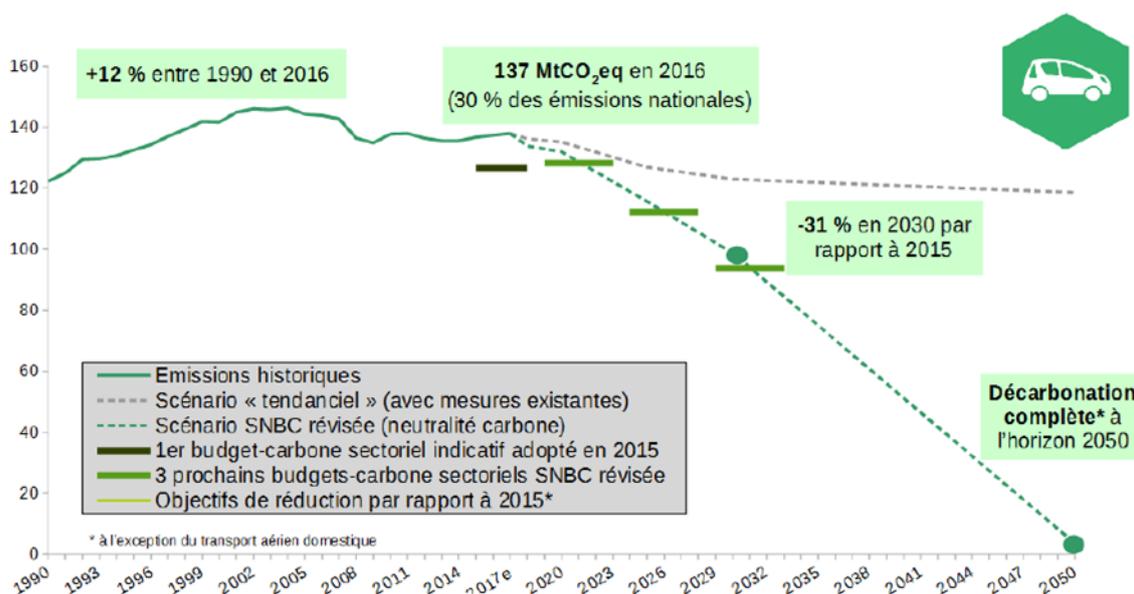


Figure 24 : Historique et projection des émissions du secteur des transports entre 1990 et 2050 (en MtCO₂eq) (source : SNBC Résumé, 2018, p. 13)

La SNBC rappelle une série de leviers nécessaires pour atteindre ces objectifs en matière de transport. Ainsi, la réduction des émissions dans le secteur des transports devra passer par :

- Une baisse de l'énergie consommée par les véhicules et une adaptation des infrastructures (notamment pour véhicules particuliers GNV ou électriques), avec un objectif en 2040 de 100% de ventes de véhicules à zéro ou faibles émissions ;
- L'amélioration de la performance énergétique des véhicules pour les véhicules particuliers et les poids lourds ;
- Une croissance de la demande maîtrisée pour le transport de voyageurs et de marchandises (hausse du télétravail, du covoiturage et des circuits courts) ;
- Un report modal important vers les modes de transport les plus économes en énergie et les moins émetteurs comme le train ou les transports en commun, ainsi qu'un soutien aux modes actifs comme la marche ou le vélo (objectif de passer de 3% à 12% de part modale du vélo en nombre de déplacements courte distance dès 2030, et à 15% en 2050) ;
- Des objectifs pour les transports maritimes domestiques et pour le transport aérien.

Très peu de ces objectifs sont chiffrés mais les quatre premiers leviers ont été considérés, au moins partiellement à travers les hypothèses retenues lors de l'élaboration de l'outil CarbOptimum ou lors de l'évaluation des incidences du Grand Paris Express.

7.3. Conséquences de la SNBC pour le bilan des émissions de GES

7.3.1. Etudes et travaux préalables

Les études et travaux préalables concernent des activités déjà en cours ou qui auront lieu dans les prochaines années. Si les objectifs de long terme fixés par la SNBC donnent des lignes directrices pour diminuer les émissions de tous les secteurs, les diminutions nécessitent cependant un temps d'adaptation et les modifications attendues dans les prochaines années ne sont pas susceptibles d'influencer les calculs réalisés dans le cadre du bilan des émissions du Grand Paris Express.

7.3.2. Construction

Comme pour les études et travaux préalables, la construction du métro du Grand Paris est déjà en cours et les choix des techniques constructives ont dû être basés sur ce qui existait à l'heure actuelle. Si la SNBC envisage une réduction importante des émissions liées à la construction, cette réduction sera largement dépendante des innovations futures en termes de techniques constructives. Néanmoins, il faut rappeler ici que, dans le cadre du Grand Paris Express, une démarche environnementale globale a été suivie tout au long de la conception et se poursuit au cours de la mise en œuvre : choix des matériaux les moins émissifs, politique optimisée d'évacuation des déblais (notamment par voie d'eau), remblayage à partir de déblais sur site, etc. Par ailleurs, des techniques constructives particulières sont également envisagées (p.ex. béton fibré). Ces efforts devraient permettre de tendre vers une réduction des émissions dans les limites des techniques constructives et matériaux disponibles actuellement. La diminution des émissions liées à la construction ne devrait donc pas dépasser environ -10% ce qui correspond au scénario optimiste retenu dans la mise à jour 2018 du bilan.

7.3.3. Fonctionnement

La SNBC oriente le mix énergétique vers une plus grande électrification de certains usages à l'horizon 2050. La structure énergétique en France est intrinsèquement peu carbonée, avec une production décarbonée à 91% en 2016 (énergie d'origine nucléaire, hydraulique, photovoltaïque, éolien et thermique renouvelable). La consommation d'énergie finale des transports domestiques proposées par la SNBC à différents horizons temporels est illustrée à la figure ci-après.

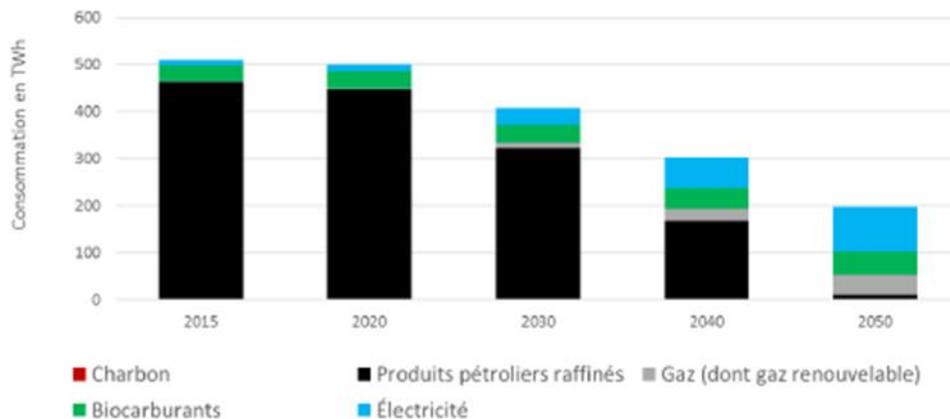


Figure 25 : Consommation d'énergie finale des transports domestiques dans la SNBC (source : SNBC, 2018, p.22)

En moyenne pour le territoire français, la production d'électricité engendre des émissions de GES d'environ 65 g eqCO₂/kWh pour ces dernières années. La SNBC ne mentionne pas d'objectif particulier pour la diminution de ce facteur. Les hypothèses prises dans l'outil CarbOptimum pour l'utilisation d'électricité sont cohérentes avec la SNBC, avec des facteurs d'émissions qui se réduisent dans le scénario A à 53,3 g eqCO₂/kWh en 2030 et à 47,6 g eqCO₂/kWh en 2050 ou dans le scénario B à 36,0 g eqCO₂/kWh en 2030 et à 32,2 g eqCO₂/kWh en 2050.

Si les objectifs de la SNBC semblent tabler sur une réduction plus importante encore de ces émissions aux horizons 2030 et 2050, il est difficile d'évaluer jusqu'à quel point il sera possible de produire de l'électricité sans émettre d'émissions de GES ne serait-ce que pour la mise en œuvre des centrales de production d'énergie renouvelable et les indications de la SNBC ne sont par ailleurs pas suffisantes pour évaluer cette réduction.

Quoi qu'il en soit, une réduction encore plus importante du facteur d'émission de l'utilisation de l'électricité aurait comme incidence principale une diminution des émissions nécessaires pour la traction des métros et pour le fonctionnement des gares avec un effet positif sur le bilan des émissions de GES dans son ensemble déjà perceptible dans le scénario optimiste.

7.3.4. Mobilité

L'atteinte de la décarbonation complète des déplacements terrestres de personnes et de marchandises est difficile à imaginer étant donné que les déplacements nécessitent intrinsèquement de l'énergie, si pas en fonctionnement du moins pour la production du véhicule ou pour celle de l'électricité. Néanmoins, il est envisageable de faire décroître davantage les émissions liées au véhicules routiers.

Le tableau ci-après compare les facteurs d'émissions cibles de la SNBC avec ceux utilisés dans l'outil CarbOptimum pour le calcul des émissions de GES liées aux déplacements (mobilité des franciliens), systématiquement pour l'horizon temporel correspondant et le même type de véhicule. Il faut toutefois préciser que les facteurs d'émissions avancés par la SNBC sont ceux de véhicules vendus neufs tandis que ceux de l'outil CarbOptimum correspondent aux facteurs pour l'ensemble du parc roulant qui est donc constitué d'une majorité de véhicules anciens.

Tableau 20 : Facteurs d'émission liés à la mobilité, respectivement issus de la SNBC pour les véhicules neufs et du CarbOptimum pour l'ensemble du parc, à différents horizons temporels (source : SNBC 2018, CarbOptimum 2019)

	Facteurs d'émission	
	SNBC, pour des véhicules neufs	CarbOptimum, pour l'ensemble du parc
VP thermiques - 2030	4 l/100 km	6,2 l/100 km (essence) 5,2 l/100 km (diesel)
VP électriques - 2050	12,5 kWh/100 km	20 kWh/100 km
PL diesel - 2040	21 l/100 km	22 l/100 km
PL GNV - 2040	15 kg/100 km	Non considéré
PL électriques - 2040	129 kWh/100 km	Non considéré

Comme le montrent ces chiffres, les directions fixées par la SNBC semblent prévoir une diminution importante des émissions liées au transport routier mais dans des proportions relativement cohérentes avec les hypothèses retenues dans l'outil CarbOptimum. Une révision des facteurs d'émissions pourrait néanmoins diminuer légèrement les gains liés aux incidences du Grand Paris Express sur le trafic routier mais dans une proportion moindre que celle envisagée dans le scénario prudent.

En ce qui concerne le transport public, la SNBC repose aussi sur une utilisation plus importante des modes de transport plus économes en énergie et moins émissifs comme le train ou les transports en commun. Si la SNBC ne précise pas comment engendrer un report modal significatif de la route vers les transports en commun, ni comment les transports publics devront évoluer pour que leur capacité permette d'absorber les nouveaux voyageurs, il va de soi que l'atteinte des objectifs passera nécessairement par des investissements pour augmenter sensiblement l'offre et donc par des projets de développement des transports publics tels que celui du Grand Paris Express.

7.3.5. Développement territorial

En ce qui concerne les émissions liées au logement, la SNBC prévoit de renouveler radicalement l'ensemble du parc existant à l'horizon 2050. Il est également rappelé dans la stratégie l'importance d'accompagner l'aménagement du territoire pour des formes urbaines résilientes en limitant l'artificialisation des sols.

La densification des pôles urbains et l'optimisation de l'usage des espaces, mentionnées par la SNBC, se trouvent au cœur de la prise en compte des effets du GPE liés au développement territorial valorisé par le bilan des émissions de GES.

La consommation d'énergie finale des bâtiments proposée dans la SNBC pour différents horizons temporels est illustrée ci-après.

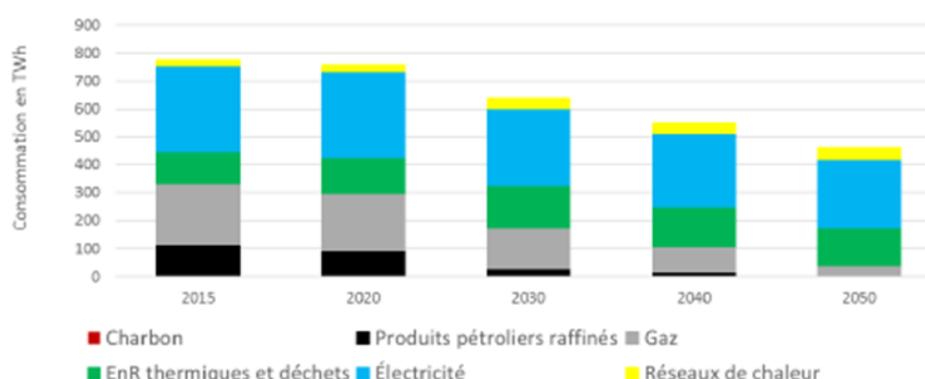


Figure 26 : Consommation d'énergie finale des bâtiments dans la SNBC (source : SNBC, 2018, p.23)

Dans le domaine du bâtiment, la SNBC propose les objectifs suivants : réduction de 53% à l'horizon du 4^e budget carbone (2029-2033) par rapport à 2015, et une décarbonation quasi-complète du secteur des bâtiments à l'horizon 2050.

Les mesures doivent notamment permettre de lutter contre l'inertie importante du parc résidentiel, dont 70% pourrait être constitué d'immeubles construits avant 2012, à l'horizon 2050. Des incitations importantes doivent être fournies pour induire la rénovation de cette partie du parc de bâtiments, dont la réalisation est nécessaire à la baisse des consommations énergétiques d'exploitation des bâtiments.

Les hypothèses prises dans l'outil CarbOptimum pour le calcul des émissions de GES liées au développement territorial sont cohérentes avec les objectifs de rénovation du parc de bâtiments de la SNBC.

La baisse des émissions de GES liées à la construction et à la rénovation des bâtiments contribue grandement aux émissions de GES évitées. En outre, la réalisation du GPE est sans doute une condition nécessaire à l'atteinte des objectifs de développement territorial, en particulier du fait de la densification des tissus urbains induits par l'arrivée du nouveau réseau d'infrastructures de transports.

7.3.6. Conclusions du bilan au regard de la SNBC

Comme rappelé dans la SNBC, le scénario de référence n'est pas prescriptif mais indicatif, c'est-à-dire qu'il sert de boussole pour le suivi du pilotage de la transition énergétique, sans qu'il y soit associé aujourd'hui un plan d'action de long terme particulier.

L'analyse a montré une relative cohérence entre les facteurs d'émissions retenus dans l'outil CarbOptimum et les lignes directrices établies par la SNBC, tout en soulignant certaines divergences. La SNBC intègre par ailleurs certains objectifs du Grand Paris Express directement dans sa stratégie, notamment en tablant sur un report modal important vers les transports en commun et une urbanisation plus dense. Il est ainsi indéniable que le GPE est un facilitateur et un levier de la mise en œuvre de la SNBC.

Dans l'ensemble, les résultats du bilan ne sont donc que peu modifiés par la SNBC mais à l'inverse le Grand Paris Express s'intègre parfaitement dans les objectifs fixés par la SNBC.