

DOSSIER D'ENQUÊTE PRÉALABLE À LA DÉCLARATION D'UTILITÉ PUBLIQUE

TRONÇON PONT-DE-SÈVRES < > NOISY – CHAMPS (LIGNE ROUGE - 15 SUD)

PIÈCE **G.6.1**

Étude d'impact

Annexe : Méthodologie d'élaboration de CarbOptimum[®], outil de calcul pour l'estimation des émissions et consommations de CO₂ induites par la réalisation du Réseau de transport public du Grand Paris

Sommaire

| | | | |
|--|-----------|--|--|
| Préambule | 5 | | |
| Rappel du contexte et des objectifs de l'étude | 7 | | |
| Démarche d'ensemble | 7 | | |
| 1 Phase 1 : Approche méthodologique d'évaluation du bilan des émissions de gaz à effet de serre spécifique au projet du Réseau de transport public du Grand Paris | 9 | | |
| Partie 1 : Introduction, enjeux et analyse des méthodologies existantes | 11 | | |
| 1.1 Introduction | 11 | | |
| 1.1.1 Les changements climatiques | 11 | | |
| 1.1.2 Calcul des bilans d'émissions de GES | 13 | | |
| 1.2 Le contexte francilien | 14 | | |
| 1.2.1 Contexte socio-économique | 14 | | |
| 1.2.2 Contexte énergétique | 15 | | |
| 1.2.3 Occupation du sol | 16 | | |
| 1.2.4 Ce qu'il faut retenir | 21 | | |
| 1.3 Le projet de réseau de transport public du Grand Paris et les émissions de GES | 21 | | |
| 1.3.1 Objectifs du projet et impacts attendus | 21 | | |
| 1.3.2 Impacts attendus sur les émissions de GES | 22 | | |
| 1.4 Analyse des méthodologies existantes | 41 | | |
| 1.4.1 Considérations générales | 41 | | |
| 1.4.2 Considérations spécifiques | 46 | | |
| 1.4.3 Prise en compte des thématiques spécifiques au Grand Paris | 49 | | |
| 1.4.4 Conclusions | 52 | | |
| Partie 2 : Développement des lignes directrices de la méthodologie d'évaluation des émissions de GES spécifique au projet de réseau de transport public du Grand Paris | 53 | | |
| 2.1 Introduction | 53 | | |
| 2.2 Considérations générales | 53 | | |
| 2.2.1 Périmètre du bilan | 53 | | |
| 2.2.2 Procédure de calcul et facteurs d'émissions | 53 | | |
| 2.2.3 Type d'outil de calcul | 54 | | |
| 2.3 Considérations spécifiques | 55 | | |
| 2.3.1 Energies | 55 | | |
| 2.3.2 Recyclage et valorisation énergétique des déchets | 59 | | |
| 2.3.3 Amortissements et retours sur investissement | 60 | | |
| 2.3.4 Comparaison des scénarios | 61 | | |
| 2.3.5 Actualisation des émissions | 62 | | |
| 2.4 Prise en compte des thématiques spécifiques au Grand Paris | 65 | | |
| 2.4.1 Etudes préalables à la construction | 65 | | |
| 2.4.2 Construction de l'infrastructure | 67 | | |
| 2.4.3 Fonctionnement de l'infrastructure | 69 | | |
| 2.4.4 Mobilité en Ile-de-France | 70 | | |
| 2.4.5 Développement territorial | 72 | | |
| 3. Phase 2 : Identification des valeurs de référence en téq CO₂ pour les différents postes et élaboration de l'outil de calcul des bilans | 87 | | |
| 3.1 Introduction | 89 | | |
| 3.2 Introduction aux facteurs d'émissions | 89 | | |
| 3.3 Etudes et travaux préalables à la construction | 90 | | |
| 3.3.1 Cas 1 : études et travaux dont les émissions de GES sont connues | 90 | | |
| 3.3.2 Cas 2 : études et travaux dont les émissions de GES et les activités précises ne sont pas connues | 90 | | |
| 3.3.3 Cas 3 : études et travaux dont les activités précises sont connues | 90 | | |
| 3.4 Construction de l'infrastructure | 92 | | |
| 3.4.1 Matériaux majoritairement rencontrés | 92 | | |
| 3.4.2 Ouvrages d'art | 94 | | |
| 3.4.3 Equipements ferroviaires | 98 | | |
| 3.4.4 Gares et bâtiments | 102 | | |
| 3.4.5 Quais | 103 | | |
| 3.4.6 Fabrication des rames | 103 | | |
| 3.4.7 Transport des matériaux | 103 | | |
| 3.4.8 Organisation du chantier | 104 | | |
| 3.4.9 Changement d'usage des sols | 105 | | |
| 3.5 Fonctionnement du métro | 106 | | |
| 3.5.1 L'énergie de traction nécessaire au mouvement des métros | 106 | | |
| 3.5.2 Consommation en énergie des gares et des bâtiments techniques | 107 | | |
| 3.5.3 Emissions induites par les activités de gestion, de marketing, de contrôle, de pilotage, etc. | 107 | | |
| 3.5.4 Emissions liées à l'entretien et au renouvellement de l'infrastructure | 107 | | |
| 3.6 Mobilité en Ile-de-France | 108 | | |
| 3.6.1 Utilisation des véhicules particuliers, des deux-roues motorisés et des poids lourds | 108 | | |
| 3.6.2 Utilisation du réseau de transport public | 115 | | |
| 3.7 Développement territorial | 117 | | |
| 3.7.1 La construction des bâtiments résidentiels et tertiaires | 118 | | |
| 3.7.2 La démolition des bâtiments résidentiels et tertiaires | 120 | | |
| 3.7.3 La rénovation des bâtiments résidentiels et tertiaires | 121 | | |
| 3.7.4 Le changement d'affectation des espaces ruraux | 122 | | |
| 3.7.5 Les opérations de viabilisation des zones urbanisées | 123 | | |
| 3.7.6 Les consommations de chauffage des bâtiments résidentiels et tertiaires | 124 | | |
| 3.7.7 Les opérations de maintenance et de rénovation des VRD, l'exploitation des services publics dans les zones urbanisées | 129 | | |
| 3.7.8 La mobilité des individus influencée par les formes urbaines | 130 | | |
| 3.8 Energies | 131 | | |
| 3.8.1 L'électricité | 131 | | |
| 3.8.2 Essence et fioul | 131 | | |
| 3.8.3 Autres énergies | 131 | | |

4. Guide de l'utilisateur 133

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.1 | Introduction | 135 |
| 4.2 | Présentation générale de l'outil..... | 135 |
| 4.3 | Etudes et travaux préalables à la construction..... | 136 |
| 4.4 | Construction de l'infrastructure..... | 137 |
| 4.4.1 | <i>Onglet Construction</i> | 137 |
| 4.4.2 | <i>Onglet bd_construction</i> | 140 |
| 4.5 | Fonctionnement du métro | 140 |
| 4.6 | Mobilité en Ile-de-France | 140 |
| 4.7 | Développement territorial | 141 |
| 4.7.5 | <i>L'onglet developpement_territorial</i> | 142 |
| 4.7.6 | <i>L'onglet facteurs_emissions</i> | 147 |
| 4.8 | Onglets <i>synthèse et analyse résultats</i> | 147 |
| 4.8.1 | <i>Onglet synthèse</i> | 147 |
| 4.9 | <i>Onglet analyse résultats</i> | 148 |
| 4.10 | Outil « comparateur de scénarios » | 148 |

5. Annexes 151

Préambule

Rappel du contexte et des objectifs de l'étude

Dans la continuité de l'Evaluation Stratégique Environnementale du métro du Grand Paris, et suite au débat public qui s'est déroulé entre le 1^{er} octobre 2010 et le 31 janvier 2011, le schéma d'ensemble du réseau de transport public du Grand Paris a été voté à l'unanimité du Conseil de surveillance de la Société du Grand Paris le 26 mai 2011 puis publié par décret du 24 août 2011 au *Journal officiel* de la République française.

En vue de préparer les dossiers réglementairement requis dans le cadre des différentes enquêtes publiques, la Société du Grand Paris a lancé différentes études environnementales spécifiques.

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la démarche innovante menée par la Société du Grand Paris depuis le lancement des premières réflexions sur ce projet. Cette étude a ainsi une double vocation : d'une part, préparer la réalisation du bilan carbone spécifique qui sera produit dans le cadre des études d'impact environnemental préalables à l'obtention des déclarations d'utilité publique ; d'autre part, alimenter et enrichir la réflexion sur les évaluations *ex ante* qui sont menées en mettant à la disposition de la Maîtrise d'ouvrage et des acteurs du projet un véritable outil d'aide à la décision en matière d'émissions de gaz à effet de serre (GES).

Cet outil, prenant la forme d'un calculateur associé à une revue bibliographique et méthodologique, englobera l'ensemble des facteurs d'émissions pertinents du projet et, ce, pour les phases de construction et d'exploitation du métro. Il permettra de procéder à l'analyse précise du bilan des émissions de GES du projet à différentes échelles mais aussi, et surtout, d'identifier les leviers majeurs, c'est-à-dire les choix qui pourront être réalisés par les acteurs du projet en vue d'influencer positivement et de façon importante son bilan carbone.

La présente étude constituera donc une donnée d'entrée des études d'impact environnemental auxquelles elle est annexée.

Démarche d'ensemble

Pour répondre à ces objectifs, l'étude suit un échéancier décomposé en deux volets :

- Phase 1 : Approche méthodologique spécifique de la méthode de bilan carbone au projet de Réseau de transport public du Grand Paris
- Phase 2 : Définition des références en téq CO₂ pour chaque étape du projet et élaboration de l'outil de calcul des bilans

1 Phase 1 : Approche méthodologique d'évaluation du bilan des émissions de gaz à effet de serre spécifique au projet du Réseau de transport public du Grand Paris

Objectifs de la phase 1

La phase 1 consiste en une analyse bibliographique des résultats des recherches portant sur les bilans de gaz à effet de serre des infrastructures de transport et de développement territorial ainsi que des outils méthodologiques existants, tant en France qu'à l'étranger, en matière d'estimation des émissions de CO₂ liées à la réalisation d'une infrastructure et à ses effets induits afin :

- dans une première étape, d'identifier les flux de CO₂, positifs et négatifs, directement ou indirectement liés à la réalisation du réseau de transport public du Grand Paris et la manière dont les outils de calculs existants peuvent les prendre en compte ;
- dans une seconde étape, de développer la méthodologie pour l'évaluation des postes d'émissions retenus dans le cadre du projet.

Le présent rapport présente les résultats de la première étape du travail de Phase 1.

Contenu du rapport

La première partie du document rappelle succinctement en quoi les bilans des émissions de GES s'avèrent aujourd'hui être des outils efficaces d'aide à la décision dans un contexte où la réduction de ces émissions est devenue une priorité nationale et s'inscrit dans la volonté de la France d'avoir une action exemplaire en matière de mise en œuvre des engagements internationaux qu'elle a pris.

La seconde partie dresse, quant à elle, le portrait actuel du territoire au sein duquel le futur projet s'inscrira et s'attarde sur les spécificités du contexte francilien en matières socio-économique, énergétique et d'aménagement.

Les résultats du travail bibliographique d'identification des principaux flux de CO₂ qui seront impactés par le projet sont présentés dans la troisième partie. Celle-ci distingue les émissions qui seront directement liées au projet, tant dans sa phase travaux que dans sa phase exploitation, de celles qui seront induites par celui-ci.

Enfin, la quatrième et dernière partie, au-delà d'un simple recensement des outils méthodologiques existants, constitue un bilan comparatif des différents principes de calcul d'un bilan carbone pour un projet donné. Ce chapitre souligne d'ores et déjà les limites méthodologiques auxquelles les outils actuels font face et qu'il s'agira d'intégrer dans la suite de l'étude pour l'élaboration du calculateur. Pour information, des fiches de synthèse des principaux outils méthodologiques étudiés sont proposées en annexe du rapport.

Partie 1 : Introduction, enjeux et analyse des méthodologies existantes

1.1 Introduction

1.1.1 Les changements climatiques

1.1.1.1 L'effet de serre

La terre est entourée par une fine enveloppe gazeuse d'approximativement 120 km d'épaisseur appelée atmosphère. Lorsque les rayonnements solaires atteignent cette enveloppe gazeuse, une partie est réfléchiée vers l'espace tandis que le reste continue sa course vers la terre et est absorbée sous forme de chaleur par la surface terrestre. L'énergie ainsi accumulée par le sol ou l'océan est ensuite restituée vers l'espace sous forme de radiations thermiques. Lors de leur passage à travers l'atmosphère, ces radiations thermiques sont à leur tour partiellement réfléchies par certains gaz présents dans l'atmosphère, principalement la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'ozone (O₃), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O). Les gaz qui réfléchissent les radiations thermiques vers la surface de la terre jouent donc un rôle de couverture thermique et sont appelés gaz à effet de serre (GES) par analogie aux serres qui permettent de maintenir des espaces à une température plus élevée. L'effet de serre est un phénomène naturel qui permet de maintenir la terre à une température propice au développement des espèces vivantes (15°C de moyenne à la place d'approximativement -18°C de moyenne).

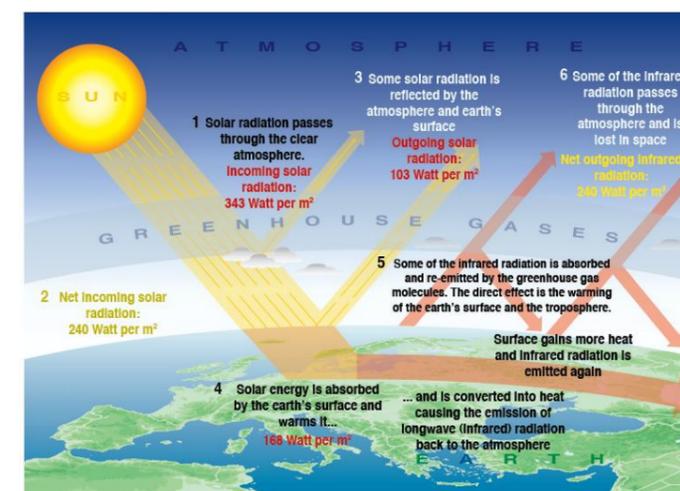


Figure 1 : Effet de serre : les radiations solaires qui parviennent à traverser l'atmosphère et qui ne sont pas reflétées par la surface terrestre, sont absorbées par le sol ou l'océan. Le sol et l'océan émettent en retour des radiations thermiques qui sont partiellement arrêtées par les gaz à effet de serre et renvoyées vers la terre. Source : Climate change science compendium, UNEP, 2009.

1.1.1.2 La prise de conscience

Les concentrations des différents GES présents dans l'atmosphère influencent l'importance de l'effet de serre. Or depuis la révolution industrielle au milieu du 18^{ème} siècle, l'utilisation comme combustible de larges quantités de bois, de charbon, de pétrole et de gaz naturel ainsi que les changements importants d'utilisation du sol ont conduit à une augmentation importante de GES (surtout du CO₂ du CH₄ et du N₂O) dans l'atmosphère terrestre pouvant laisser craindre un impact majeur sur le climat.

En 1988, suite à une augmentation des évidences d'un réchauffement du système climatique mondial, l'Organisation Météorologique Mondiale (WMO) et le Programme des Nations-Unies pour l'Environnement (UNEP) ont mis en place un Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (IPCC) afin d'étudier les possibilités de changements climatiques et de l'influence potentielle des activités humaines.

Ce groupe d'experts a depuis lors publié plusieurs rapports (dont les plus importants en 92, 95, 2001 puis 2007) en faisant l'état des connaissances sur le sujet. Plusieurs milliers de scientifiques ont travaillé sur ces rapports qui se fondent sur une quantité très importante de documents scientifiques et représentent actuellement la référence incontestée en ce qui concerne les changements climatiques.

Ce groupe de travail conclut notamment que le réchauffement du système climatique est sans équivoque. Il note à l'échelle du globe une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer et conclut que l'essentiel de l'élévation de la température du globe est « très probablement » attribuable à la hausse des concentrations de GES anthropiques.

1.1.1.3 L'évolution des émissions de GES mondiales

Grâce au suivi récent des concentrations de GES dans l'atmosphère et à l'analyse de carottes de glace portant sur plusieurs millénaires, les chercheurs ont pu montrer que depuis 1750, les concentrations atmosphériques CO₂, N₂O et CH₄ se sont fortement accrues, et sont aujourd'hui bien supérieures aux valeurs historiques.

Le GES le plus fortement influencé par les activités humaines est dioxyde de carbone (CO₂) qui provient essentiellement de la combustion des énergies fossiles et des changements d'occupation du sol. Les rejets de CO₂ ont par exemple progressé d'approximativement 80% entre 1970 et 2004¹.

Les autres gaz à effet de serre dont les concentrations ont été fortement influencées par les activités humaines sont le méthane (CH₄) (fermentation entérique des ruminants, combustibles,...), l'oxyde nitreux (N₂O) (fertilisants agricoles,...) et différents gaz artificiels utilisés par l'industrie (HFC, PFC,...) (utilisés comme propulseurs ou pour la fabrication de mousses ou de composants électroniques).

A l'échelle globale, le secteur des transports représente plus de 13% des émissions de GES et celui des bâtiments un peu moins de 8%.

Émissions mondiales de gaz à effet de serre anthropiques

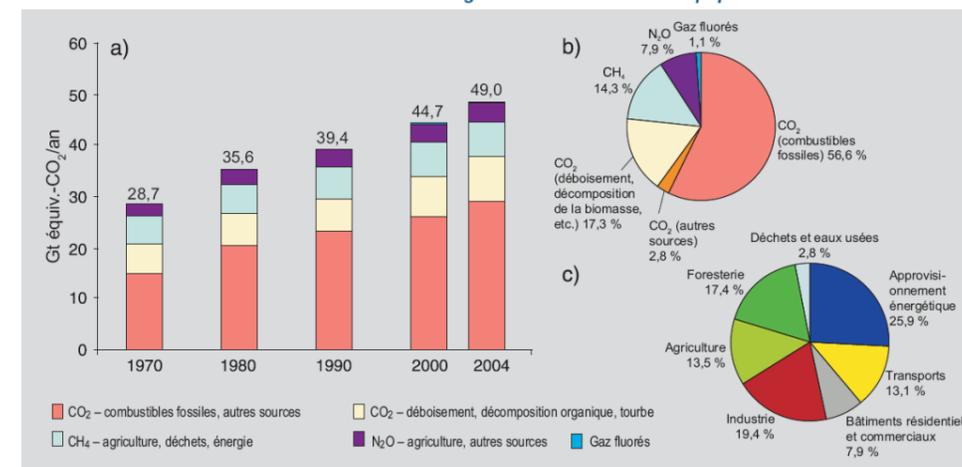


Figure 2 : a) Emissions annuelles de GES anthropiques dans le monde entre 1970 et 2004, b) Parts respectives des différents GES anthropiques dans les émissions totales de 2004, en équivalent CO₂ c) Contribution des différents secteurs aux émissions totales de GES anthropiques en 2004, en équivalent CO₂. Source : GIEC, 2007, Bilan 2007 des changements climatiques : rapport de synthèse.

1.1.1.4 Lutte contre le réchauffement du climat

La mobilisation mondiale contre les changements climatiques a débuté dans les années 90, notamment à Rio de Janeiro en 1992 à l'occasion de la conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement. C'est lors de cette conférence qu'a été adoptée la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques qui avait pour objectif de stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêcherait toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Bien que peu contraignante, cette convention donna naissance en 1997 au protocole de Kyoto par lequel de nombreux pays industrialisés se sont engagés à réduire leurs émissions de GES. Selon le protocole de Kyoto, l'Union Européenne devait réduire globalement ses émissions de 8% sur la période 2008-2012 par rapport au niveau de 1990. D'autres conférences (notamment celle de Copenhague en 2009 et de Cancun en 2010) définirent ensuite des objectifs supplémentaires de mitigation des impacts sur le climat et de réduction des émissions de GES.

1.1.1.5 Positionnement de la France

La France est particulièrement engagée dans la lutte contre les changements climatiques. Afin de respecter ses objectifs de réduction des émissions de GES, elle s'est dotée d'un Plan National de Lutte contre le Changement Climatique puis d'un Plan Climat qui définissent les actions à mettre en œuvre. Elle est d'ailleurs un des seuls pays qui a réussi à respecter les objectifs qui lui avaient été assignés suite au protocole de Kyoto (revenir entre 2008 et 2012 à un taux d'émission similaire à celui de 1990). La France qui devrait, selon ses engagements européens, réduire ses émissions à l'horizon 2020 de 14% par rapport à 2005 fait figure d'exemple grâce aux objectifs exigeants et aux leviers d'actions définis dans le Grenelle de l'environnement. La loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement dite « Grenelle 1 » consacre notamment l'objectif proposé par la loi d'orientation sur l'énergie en prévoyant de diviser par quatre les émissions de CO₂ d'ici 2050. Pour atteindre cet objectif, il est clair que tous les secteurs de l'économie devront être mobilisés (voir Figure 3).

¹ Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse, IPCC, 2008

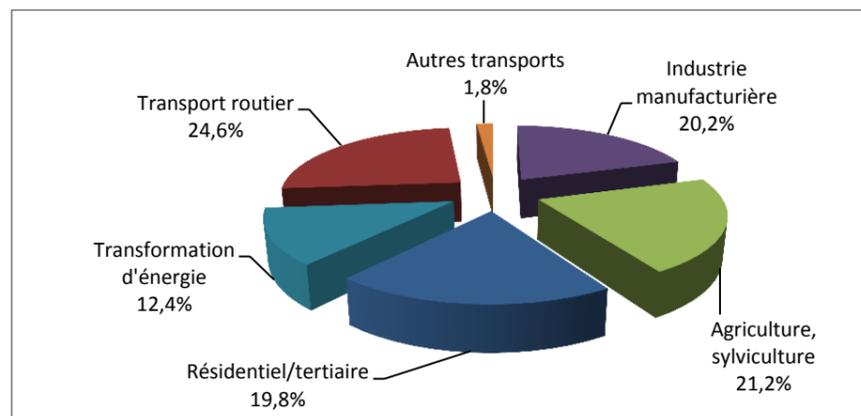


Figure 3 : Emissions de GES par secteur en France métropolitaine. Source : Emissions dans l'air en France, Métropole, Substances relatives à l'accroissement de l'effet de serre, Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA), 2011.

Les textes de la loi Grenelle 1 et de la loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement dite « Grenelle2 » définissent différents leviers d'action prioritaires dont plusieurs sont particulièrement pertinents par rapport au projet de réseau de transport public du Grand Paris. Tout d'abord, les textes prévoient le développement de modes de transport alternatifs à la voiture particulière afin de réduire les émissions liées aux déplacements. C'est bien là un objectif majeur du Réseau de transport public du Grand Paris qui vise à améliorer la mobilité en Ile-de-France et à favoriser l'emploi des transports en commun en lieu et place de la voiture particulière. Le Grenelle de l'environnement prévoit aussi une série de mesures pour favoriser l'efficacité énergétique des bâtiments. Nous verrons plus loin que le réseau de transport public du Grand Paris est bien plus qu'un projet d'infrastructure de transport et que c'est toute la dynamique territoriale qui sera influencée. Grâce à cette influence, le projet du Grand-Paris devrait permettre de supporter l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâti francilien.

1.1.1.6 Positionnement de la région Ile de France

Depuis plusieurs années, la Région Ile-de-France a engagé une politique globale visant la réduction de ses émissions de gaz à effet de serre, tous secteurs confondus. Ses efforts ont d'ailleurs porté leurs fruits dans le secteur industriel qui a vu ses émissions diminuer suite à l'application de fortes contraintes à destination des industries.

Etant donné que le transport, le résidentiel et le tertiaire constituent les postes énergétiques majeurs de la région et, qu'en plus, ce sont les postes pour lesquels les acteurs publics ne sont pas encore parvenus à diminuer significativement les émissions, ce sont eux qui sont au cœur des objectifs actuels de réduction. En particulier :

« Le secteur du bâtiment [...] représente le principal gisement d'économies d'énergie exploitable immédiatement »

(Loi de programmation du 3 août 2009 relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement)

L'engagement régional fait notamment partie des grands objectifs du Schéma Directeur de la Région Île-de-France (SDRIF) dont le projet a été adopté en 2008 par le Conseil régional, qui promeut une ville plus compacte et plus dense pour répondre non seulement aux urgences en matière de logement, mais aussi à l'accroissement des contraintes climatiques et énergétiques.

« L'aménagement du territoire et sa planification n'est pas le seul levier d'action, mais il est incontournable face à l'importance des enjeux et aux choix à long terme qu'il induit. »

(Evaluation Environnementale du projet de Schéma Directeur de la Région Ile-de-France, septembre 2008)

Dans ses orientations, ce schéma fixe un objectif de réduction des émissions de GES en Île-de-France par quatre dès 2030, objectif plus ambitieux que celui adopté au niveau national qui vise une réduction par quatre à l'horizon 2050 et, ce, notamment grâce à un objectif de modernisation du parc immobilier de bureaux et de logements. Ces enjeux sont également déclinés dans le Plan de déplacements Urbains d'Ile-de-France, l'Agenda 21 et le Plan Climat régional (en cours d'élaboration).

Toutefois, le secteur du transport routier reste une autre cible favorisée aujourd'hui par les acteurs publics :

- premièrement, parce que les efforts publics sur la réduction des nuisances (atmosphériques et sonores) du trafic routier sont plus facilement perceptibles par la population à l'échelle locale que ceux effectués sur le bâti ;
- ensuite, car le taux de renouvellement du parc automobile est très rapide comparativement au parc bâti. Il est donc plus facile d'obtenir des résultats probants à court ou moyen terme sur la réduction des consommations énergétiques ;
- enfin, parce que l'utilisation de la voiture n'est pas seulement associée dans l'esprit de la population aux problématiques environnementales mais également aux accidents et à la congestion, ce qui priorise les actions sur le transport dans l'agenda politique.

Remarque : des mesures en amont portant sur le secteur du transport routier peuvent toutefois s'avérer peu populaires, dans la mesure où elles sont perçues comme trop restrictives pour la mobilité individuelle et où elles les actions ne sont pas suffisamment communiquées au grand public avant leur mise en œuvre.

1.1.2 Calcul des bilans d'émissions de GES

1.1.2.1 Qu'est-ce qu'un bilan d'émissions de GES

Pour évaluer l'impact que peut avoir une activité sur les changements climatiques, il faut pouvoir évaluer l'ensemble des émissions de GES induites par cette activité. Pour ce faire, il faut réaliser un bilan des émissions engendrées par les processus qui sont nécessaires à cette activité en tenant compte des émissions directement liées à l'activité (par exemple les rejets de CO₂ provenant de la combustion de fioul de chauffage) et des émissions qui prennent place à l'extérieur de cette entité mais qui sont nécessaires à l'activité (par exemple les rejets de CO₂ liés à l'extraction, au raffinage et au transport du fioul de chauffage).

Il s'agit donc d'évaluer non seulement les émissions dont l'activité est « responsable » mais aussi des émissions que l'activité « nécessite » ou « induit » sans en être directement l'auteur (un système de chauffage n'est pas responsable de la chaîne de production du fioul mais en dépend indirectement). Cette notion sera très importante dans le cadre du projet de Réseau de transport public du Grand Paris car de nombreux impacts, notamment sur le développement territorial, seront induits par le projet sans que celui-ci n'en soit directement l'auteur.

Idéalement un bilan complet des émissions de GES devrait inclure l'ensemble des émissions directes et indirectes induites par l'activité étudiée. Cependant cette démarche est difficilement réalisable même à l'échelle de projets de taille modérée car les flux sont généralement très nombreux et souvent difficile à quantifier. Il est donc important dans toute démarche d'évaluation du bilan de GES de préciser clairement le périmètre inclus, c'est-à-dire, ce qui est pris en compte et ce qui ne l'est pas.

1.1.2.2 Objectifs d'un bilan d'émissions de GES

Outre l'objectif réglementaire de la démarche pour certaines études d'incidences, la réalisation d'un bilan d'émissions de GES permet d'obtenir une vision éclairée sur l'ensemble des flux de GES induits par une activité. C'est donc avant tout un processus de réflexion sur tout ce que le projet implique en termes d'émissions de GES.

La quantification des émissions dans le calcul du bilan permet quant à elle de comparer des solutions différentes et de servir d'aide à la décision pour optimiser les projets et réduire au maximum les émissions de GES. L'analyse de la sensibilité du bilan par rapport à différentes mesures potentielles permet également d'identifier les leviers d'action conduisant à une réduction de l'impact global sur les changements climatiques.

Un bilan d'émissions de GES peut donc être perçu comme un outil de management environnemental permettant d'évaluer l'impact d'une activité, d'un processus ou d'une organisation sur le réchauffement du climat et d'identifier les opportunités permettant la réduction de cet impact.

Les recherches menées notamment dans le cadre des travaux de l'IPCC ont permis de montrer les conséquences potentielles du changement climatique sur l'environnement et de définir sur cette base des objectifs de réduction des gaz à effet de serre. L'évaluation des émissions de GES permet une approche quantitative de l'impact des mesures prises pour réduire les émissions de GES et ainsi de vérifier s'il elles permettent d'aboutir aux objectifs fixés.

1.1.2.3 Méthodes d'évaluation et facteurs d'émissions

Dans la plupart des cas, il n'est pas possible de mesurer directement les concentrations et les émissions de GES résultant d'une activité. Bien qu'il soit, par exemple, possible de mesurer les concentrations de CO₂ à la sortie d'une chaudière, cette information ne permet d'évaluer que les émissions directement émises suite à la combustion sans tenir compte de l'énergie qui a été nécessaire pour extraire, raffiner et acheminer le carburant.

Pour estimer les émissions globales induites par une activité ou un processus, on a donc généralement recours à des facteurs d'émissions (FE) qui permettent de tenir compte de l'ensemble des activités ou des processus sous-jacents. Ces facteurs proposent donc une vision agrégée de toutes les émissions induites par l'activité en question. Un bilan global des émissions d'une société productrice de béton (tenant compte des déplacements des ouvriers, des matières premières utilisées et du processus de fabrication) pourra par exemple être divisé par la production nette (en tonne de béton) de cette entreprise pour en dériver un facteur d'émission agrégé par tonne de béton utilisé. L'utilisation de facteurs d'émission permet ainsi de faciliter le calcul du bilan global en permettant la conversion directe de données observables en émissions de GES.

Globalement, le calcul des émissions de GES d'une activité requiert donc trois étapes majeures :

- la première consiste à identifier et localiser chacun des postes importants d'émissions de gaz à effet de serre liés à l'activité, que ce soit de manière directe ou induite (exemple de poste : l'utilisation d'électricité) ;
- il faut ensuite étudier chacun de ces postes et en déduire un facteur d'émissions en équivalents CO₂ émis par unité d'utilisation (par exemple, le nombre de kg de CO₂ émis pour chaque kWh utilisé en fonction du type de production) ;

- la dernière étape consiste à quantifier chaque poste et à calculer, sur base des facteurs d'émissions, le bilan global de l'activité (par exemple : nombre de kWh utilisés * valeur de référence par kWh = tonne équivalent CO₂ émis pour l'utilisation d'électricité).

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre de la première étape de travail.

Le Grand Paris est un projet de très grande envergure qui aura de multiples impacts étalés sur plusieurs dizaines d'années. La méthode d'évaluation des émissions de GES devra donc permettre de prendre en compte, non seulement les émissions induites par la construction de l'infrastructure mais également les émissions ou consommations (émissions évitées) qui seront induites tout au long de la durée de vie de l'infrastructure. Les facteurs d'émissions devront donc permettre de prendre en compte les spécificités du projet et notamment sa durée de vie prolongée.

Etant donné que les facteurs d'émissions peuvent être assez variables (par exemple les émissions de GES induites par la production d'une tonne de béton dans une entreprise ne correspondent pas toujours aux mêmes quantités de GES émises dans une autre entreprise) la démarche se fonde essentiellement sur des facteurs d'émissions moyens. Le bilan d'émissions permet donc de fournir des ordres de grandeur sur les émissions de GES et non pas de quantifier précisément ces émissions. Les méthodes d'évaluation ont cependant comme objet de représenter le plus exactement possible la réalité. Elles s'efforcent donc d'inclure un maximum d'émissions et de se baser sur les facteurs d'émissions les plus récents et les plus adaptés à la situation réelle.

1.2 Le contexte francilien

1.2.1 Contexte socio-économique

Pour bien comprendre toutes les incidences d'un projet de l'envergure de celui du Grand Paris et en déduire les implications sur les émissions de GES, il est nécessaire d'avoir une connaissance approfondie du contexte dans lequel s'insère le projet. Cette seconde section propose donc un aperçu rapide des spécificités socio-économiques, énergétiques et d'aménagement du territoire francilien qui, comme nous le verrons par la suite, ont une importance particulière par rapport aux impacts du projet sur les émissions de GES.

L'Ile-de-France : la région la plus peuplée de France

Avec 11,4 millions d'habitants en 2010², soit 18% de la population nationale, l'Ile-de-France est la région de France la plus peuplée. Entre les recensements de 1999 et 2006, la population francilienne a augmenté de 0.7 % par an en moyenne³. Cette augmentation peut s'expliquer, notamment, par le dynamisme naturel d'une population plus jeune que la moyenne française (56,9 % de moins de 39 ans).

Des disparités sociales et territoriales⁴

En Ile-de-France, le taux de pauvreté a fortement augmenté depuis une dizaine d'années alors qu'il diminuait sensiblement en France. Cette précarisation est beaucoup plus marquée dans certains territoires. Depuis le début des années 1980, les écarts de revenus se sont creusés vers

² Source : ADEME, tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, édition 2010, janvier 2010

³ Source : Evaluation Stratégique Environnementale du métro du Grand Paris, rapport de phase 1

⁴ Source : Schéma Directeur de la Région Ile-de-France, approuvé le 25/09/2008

le haut, à l'Ouest de la région, et vers le bas dans le Nord-est de Paris, dans la banlieue Nord, Est et Sud-est du cœur d'agglomération ainsi qu'aux franges rurales de la Seine-et-Marne et le long de la Seine en aval. Un autre exemple de ces disparités territoriales est le taux de chômage (valeur moyenne régionale ≈ 8,6 % en 2005) qui varie du simple au double entre les Yvelines et la Seine-Saint-Denis. Ces disparités territoriales du revenu des ménages sont un élément qui fait varier la dépense énergétique des logements.

L'Ile-de-France : un pôle économique français et européen majeur⁶

Avec 29 % de la richesse nationale produite pour 20 % de la population, l'Ile-de-France constitue un large marché de l'emploi et de consommateurs. En 2007, le PIB de la région représentait 4,5 % du PIB européen grâce, en particulier, à la présence de nombreuses multinationales et une forte densité de sièges sociaux. En 2010, la région comportait de 5 millions d'emplois⁵ répartis dans près de 680 000 entreprises. Ces emplois comprennent en partie les populations limitrophes (Oise, Eure-et-Loir, etc.).

Un pôle tertiaire important⁶

L'emploi (salarié et non salarié) se répartit au 31 décembre 2007 comme suit : services (72 %), commerce (14 %), industrie (10 %), construction (5 %) et agriculture (0.3 %). 86 % des emplois, soit près de 4.7 millions d'emplois, sont donc dans la branche du tertiaire, principalement des emplois de bureaux (Cf. Figure 4). Suivent le commerce et la santé.

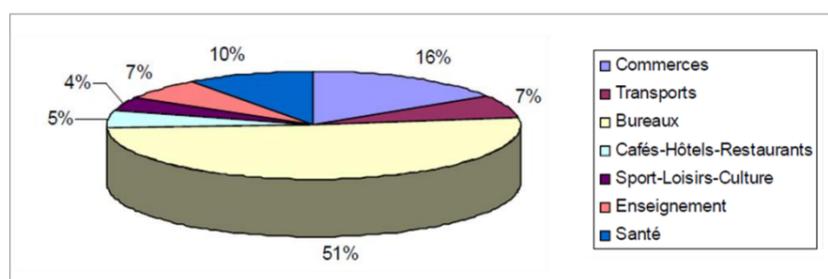


Figure 4 : Emplois tertiaires par activité en Ile-de-France en 2005 (Source : Tableau de bord de l'énergie, 2005, ADEME, ARENE)

L'Ile-de-France est également la première région industrielle de France (plus de 47 000 établissements), malgré que ce secteur soit en forte diminution dans la région, et un pôle majeur d'enseignement et de recherche.

1.2.2 Contexte énergétique

L'Ile-de-France, première région française consommatrice d'énergie

L'Ile-de-France est une région fortement peuplée et où l'activité économique est fortement concentrée, entraînant des besoins énergétiques importants. D'ailleurs, aujourd'hui, l'Ile-de-France est la première région française consommatrice d'énergie: 24,6 millions de tonnes équivalent pétrole (tep) ont été consommées en 2005, soit 15 % de l'énergie nationale. Une

⁵ Source du paragraphe : ADEME, tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, édition 2010, janvier 2010

⁶ Source du paragraphe : Plan Régional pour le Climat en Ile-de-France, livret vert, juillet 2010

nuance est toutefois à apporter : rapporté à l'habitant, l'Ile-de-France consomme moins que la moyenne nationale : 2,14 tep par francilien contre 2,56 tep par français. Cela s'explique en grande partie du fait d'un tissu urbain plus dense et une plus grande proportion d'habitats collectifs dans la région que dans le reste de la France (ces liens de cause à effet seront détaillés dans la suite du rapport).

Une évolution croissante de la consommation énergétique régionale

Entre 1990 et 2005, la consommation finale d'énergie francilienne a crû de plus de 15 %, soit une croissance annuelle moyenne de 1 % par an, contre +0.8 % par an à l'échelle de la France.

Le transport, le résidentiel et le tertiaire : les postes énergétiques majeurs d'Ile-de-France

L'augmentation de la consommation énergétique régionale s'explique en grande partie par la croissance continue du secteur des transports, premier poste de consommation énergétique (44 %, soit 10,75 Mtep) (Cf. Figure 5). L'intensité du trafic aérien, due à la présence de deux aéroports internationaux, ainsi que la part importante du trafic routier⁷ expliquent que le bilan énergétique des transports pèse davantage en Ile-de-France qu'à l'échelle du pays.

Le deuxième poste de consommation est le secteur résidentiel, avec plus de 7Mtep consommées en 2005, dont 60 % par les habitats collectifs.

L'importante quantité de bureaux, commerces, sièges sociaux en Ile-de-France explique que le secteur tertiaire⁸ représente quant-à-lui le 3^{ème} poste de consommation (4.75 Mtep, soit 19 % du bilan énergétique régional) (Cf. Figure 5).

Entre 2000 et 2005, les secteurs résidentiel et tertiaire ont vu leurs émissions de gaz à effet de serre augmenter respectivement de 8 % et de 5 %. La différence de rigueur climatique entre l'hiver 2000, particulièrement doux, et l'hiver 2005 explique entre 3 % et 4 % de cette augmentation⁹.

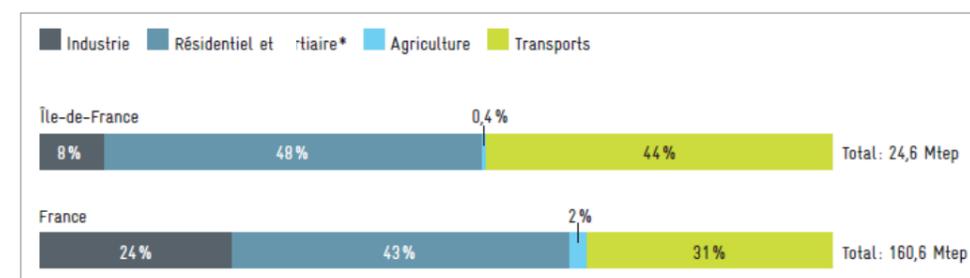


Figure 5 : Part des différents secteurs dans la consommation d'énergie francilienne et française en 2005 (Source : ADEME, tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, édition 2010, janvier 2010)

Par ailleurs, la consommation d'énergie du secteur de l'industrie est en forte diminution, en lien avec le phénomène de désindustrialisation de la région en cours depuis plusieurs années.

⁷ Le transport aérien et le transport routier représentent respectivement 50% et 48% de l'ensemble des consommations énergétiques dans le secteur des transports franciliens en 2005. Les 2% restants se répartissent entre le ferroviaire et le fluvial. Source : Tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, ADEME, 2010

⁸ Le secteur tertiaire désigne l'ensemble des activités de service, qu'ils soient marchands ou non marchands, à destination des particuliers et des entreprises.

⁹ Source : Plan Régional pour le Climat, Livre vert : état des lieux des enjeux climatiques, juillet 2010

Le pétrole majoritaire

Etant donné que le secteur des transports et celui du résidentiel et du tertiaire constituent les 2 postes majeurs de consommation énergétique en Ile-de-France, ce sont les produits pétroliers (pour le transport) suivis du gaz naturel (secteur du résidentiel) et de l'électricité (essentiellement le tertiaire) qui constituent les principales sources d'énergies utilisées: respectivement 51 %, 22 % et 20 %.

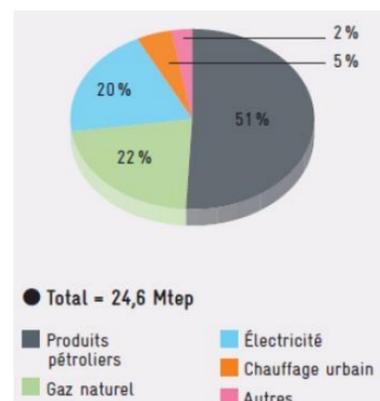


Figure 6 : Part des différents produits énergétiques consommés en Ile-de-France en 2005 (Source : ADEME, tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, édition 2010, janvier 2010)

L'incinération des déchets ou des gaz qui se dégagent à la décomposition des déchets permettent de produire 1 018 GWh¹⁰d'électricité et 5 125 GWh de chaleur qui alimente les réseaux de chauffage urbain. La nappe d'eau chaude reposant sous le bassin parisien (le Dogger) est également exploitée pour produire approximativement 1 373 GWh de chaleur géothermique et chauffer l'équivalent de 142 000 logements via le réseau de chaleur.

L'Île-de-France étant densément peuplée, elle constitue le territoire idéal pour déployer des réseaux de chaleur. Un réseau de chaleur est un réseau fermé de distribution d'eau chaude ou de vapeur qui relie plusieurs lieux de consommation, parfois plusieurs milliers de logements. Même s'il y a des pertes en ligne, le réseau de chaleur permet généralement de gagner en efficacité énergétique car la centrale de production met une grosse puissance à disposition de multiples points de consommation.

1.2.3 Occupation du sol

1.2.3.1 Développement de la région parisienne

Période d'après-guerre : construire dans l'urgence

Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale et durant une forte période de croissance économique, le temps est à la reconstruction. Le secteur du bâtiment est alors incapable de construire des logements en grande quantité et suffisamment rapidement pour répondre à un besoin croissant de se loger. Pour répondre à l'urgence de la crise du logement, les grands ensembles se généralisent en masse en Ile-de-France à partir de 1960 et, ce, jusqu'à la fin des années 1970. Ceux-ci se présentent sous la forme de tours et de barres regroupées dans des

quartiers monofonctionnels et adoptant des techniques de construction garantissant un rendement de construction important (béton armé).

Entre 1960 et 1999 : desserrement du centre, croissance des Villes Nouvelles et des pôles d'emplois régionaux, étalement urbain et croissance diffuse¹¹

La confluence des cours d'eau, le relief et le réseau de chemin de fer ont tout d'abord guidé naturellement le développement urbain selon deux directions : concentrique (en « tache d'huile ») et radiale (en « doigts de gant »). A cela s'est ajoutée, à partir des années 1960, la mise en œuvre de deux politiques publiques majeures qui ont accentué davantage l'expansion progressive des formes urbaines en périphérie : d'une part, le maillage progressif du réseau routier et, d'autre part, la mise en place du RER, tous deux étant des réseaux essentiellement radiaux et centrés sur Paris. Le développement de ces réseaux a, d'un côté, accompagné l'étalement urbain des ménages et, de l'autre, rendu possible le développement de pôles d'emplois importants comme La Défense.

En 1965, face à l'accentuation constatée du phénomène d'étalement urbain, la troisième politique mise en application a été de construire des villes nouvelles. Celles-ci avaient pour objectif de canaliser la croissance désordonnée constatée en absorbant une partie de l'augmentation démographique et des emplois. Mais, si elles ont atteint en partie leurs objectifs en accueillant une partie de la croissance démographique francilienne (elles ont absorbé 27% de la croissance de la population et de l'emploi entre 1965 et les années 90), elles n'ont pas réussi à empêcher une croissance diffuse de l'urbanisation de la périphérie. Cet effet induit n'a pas pu être contrôlé étant donné qu'à l'époque il n'existait pas (ou très peu) d'outils réglementaires permettant d'agir sur l'expansion des zones urbaines. Le phénomène d'étalement urbain a, par conséquent, continué jusque dans les années 1990.

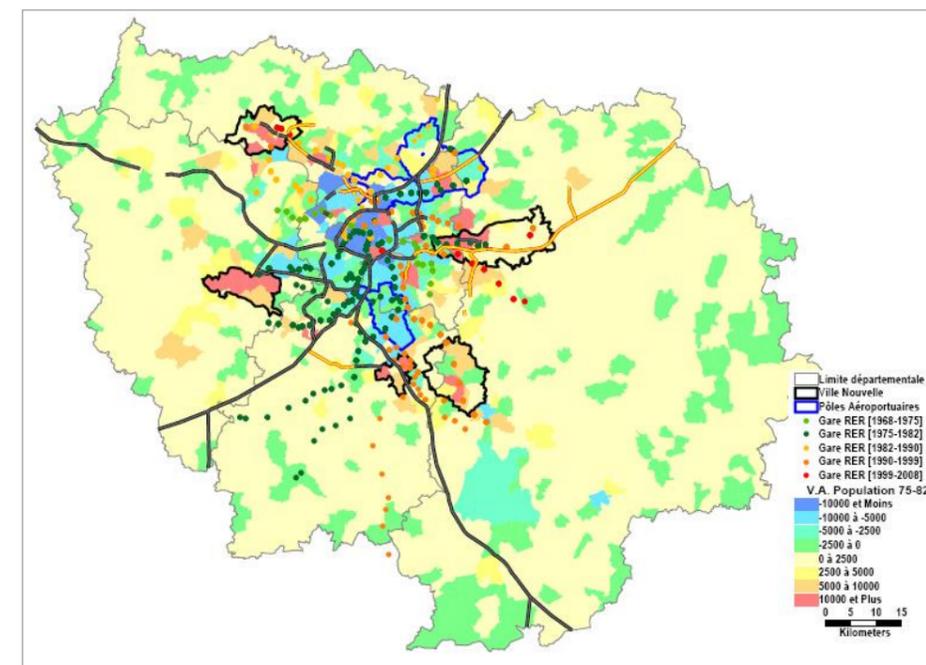


Figure 7 : Evolution des effectifs nets de population par commune entre 1975 et 1982 (Source : Mission d'étude des éléments de l'évaluation socio-économique du réseau de transport du Grand Paris - Lot 6 : Etude rétrospective sur l'évaluation des effets socio-économiques de la réalisation du RER de la région Ile-de-France (Société du Grand Paris, SETEC/STRATEC))

¹⁰ Source des chiffres : Production d'énergie par filière d'énergies renouvelables en 2005, Tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, ADEME, 2010

¹¹ Source principale : Mission d'étude des éléments de l'évaluation socio-économique du réseau de transport du Grand Paris - Lot 6 : Etude rétrospective sur l'évaluation des effets socio-économiques de la réalisation du RER de la région Ile-de-France (Société du Grand Paris, SETEC/STRATEC)

Les résultats principaux de cet étalement urbain sont : le desserrement de Paris intra-muros (en bleu sur la Figure 7), un mitage progressif et une fragilisation des espaces agricoles et naturels (fractionnement, cloisonnement) ainsi qu'un éclatement des formes d'habitat qui a engendré une augmentation des distances de déplacement, favorisant ainsi l'utilisation du véhicule particulier au détriment des autres modes de transport. En effet, l'utilisation du véhicule particulier a permis aux franciliens, pour un budget-temps de déplacement constant, d'accroître leur distance de déplacement. Tous ces phénomènes ont fortement contribué à l'augmentation de la consommation en énergie et des émissions de gaz à effet de serre de la région.

De 2000 à aujourd'hui : retour de la croissance à Paris et en petite couronne, meilleure maîtrise de l'étalement urbain

Ces dix dernières années, on assiste à un retour de la croissance à Paris et en petite couronne. Les villes nouvelles (excepté Marne-la-Vallée) étant arrivées à maturité, de nouveaux documents de planification s'articulent à l'échelle régionale, départementale et communale afin de mieux contrôler l'usage du sol francilien. Ceux-ci visent à la préservation des espaces naturels et forestiers, prônent le renouvellement de la ville sur elle-même et la compacité des agglomérations autour d'une armature de transport en commun. A Paris, où le patrimoine architectural est très riche, on tente, via notamment le Plan Local d'Urbanisme, de préserver au maximum le patrimoine existant en restreignant les caractéristiques des nouveaux bâtiments (hauteur, coefficient d'occupation du sol (COS), architecture, etc.).

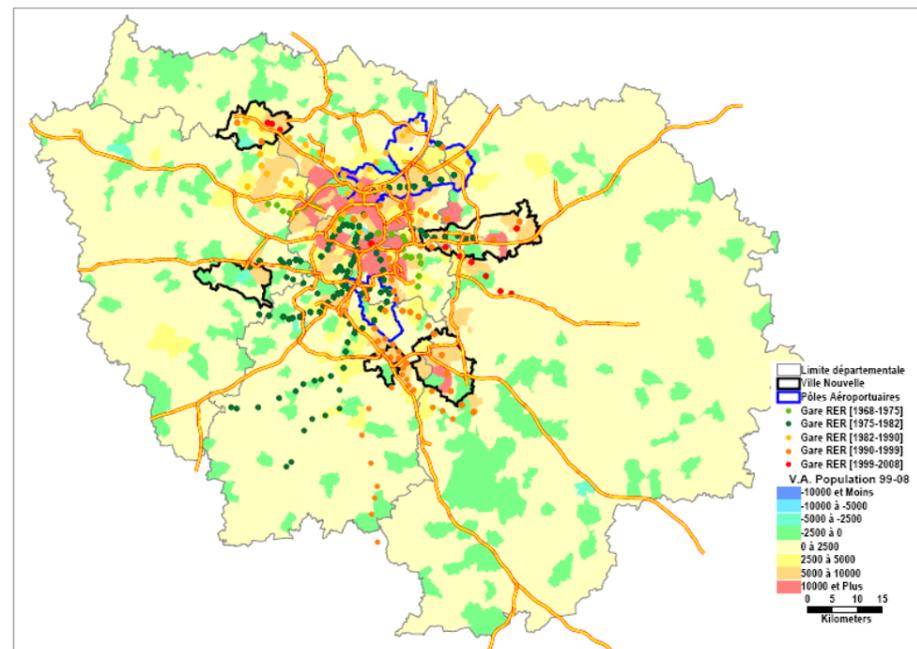


Figure 8 : Evolution des effectifs nets de population par commune entre 1999 et 2008 (Source : Mission d'étude des éléments de l'évaluation socio-économique du réseau de transport du Grand Paris - Lot 6 : Etude rétrospective sur l'évaluation des effets socio-économiques de la réalisation du RER de la région Ile-de-France (Société du Grand Paris, SETEC/STRATEC))

Aujourd'hui : une métropole compacte et une grande proportion d'espaces verts et agricoles¹²

L'Ile-de-France contient aujourd'hui 18 % de la population française sur seulement 2 % (12 000 km²) de l'emprise du territoire national. La région présente une occupation bien structurée. On observe, de manière schématique :

- au centre, Paris et ses immeubles d'habitat collectif très dense ;
- tout autour, la petite couronne occupée par un mélange d'habitat collectif et résidentiel relativement dense ;
- au-delà, entre 10 et 30 km du centre de Paris, la ceinture verte qui inclut les agglomérations nouvelles où différents types d'habitat et d'espaces ruraux s'imbriquent ;
- et, enfin, une large couronne rurale qui entoure l'ensemble.

Grâce à la compacité de l'agglomération parisienne, le territoire d'Ile-de-France est composé au total d'à peu près 80 % d'espaces naturels et agricoles, plus précisément 51 % d'espace agricole et 24 % d'espace forestier, soit pratiquement les mêmes proportions que la moyenne nationale pour la première région urbaine de France.

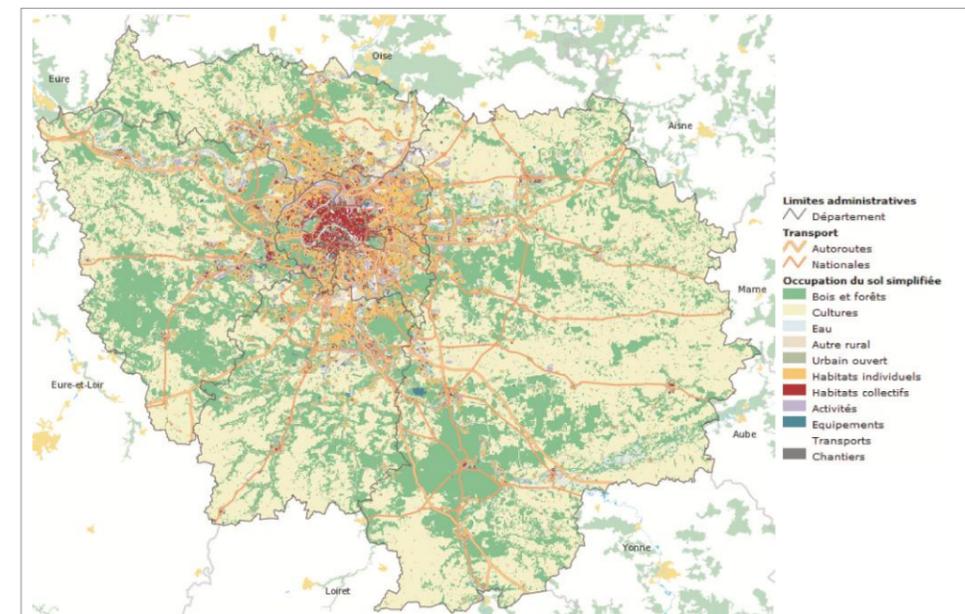


Figure 9 : Occupation du sol en Ile-de-France en 2008 (Source : IAURIF)

1.2.3.2 Le parc bâti

Une proportion importante de logements collectifs¹³

En 2005, l'Ile-de-France compte 5.2 millions de logements dont 70 % de logements collectifs¹⁴. La Région, comparativement à la moyenne nationale, possède donc une proportion importante de logements collectifs.

¹² Sources : Schéma Directeur de la Région Ile-de-France, approuvé le 25/09/2008 et Plan Régional pour le Climat en Ile-de-France, livret vert, juillet 2010

¹³Source : Contraintes énergétiques et mutations urbaines. Cahier de l'IAURIF n°147, IAURIF, 2008

Une forte représentation des maisons individuelles en grande couronne¹⁵

Si la maison individuelle est sous-représentée sur l'ensemble de la région (30 % en Ile-de-France, contre 57 % en France), elle est toutefois très présente en grande couronne (67 % du parc) (Cf. Figure 10).

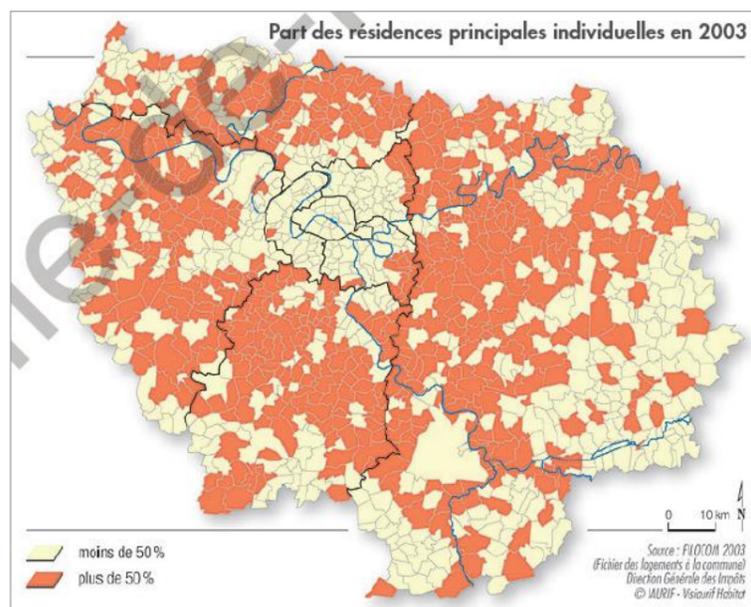


Figure 10 : Part des résidences principales individuelles en 2003 (Source : Contraintes énergétiques et mutations urbaines. Cahier de l'IAURIF n°147, IAURIF, 2008)

Le résidentiel : un parc ancien

Les logements franciliens datent, pour la plupart (72 %), d'avant 1975, période du choc pétrolier et de l'entrée en vigueur de la première réglementation thermique (Cf. page 20) voire d'avant 1949 (30 %). A Paris intra-muros, cette proportion s'élève à 83 %. Or, avant 1975, les bâtiments étaient généralement construits avec des matériaux peu isolants ou des techniques d'isolation beaucoup moins performantes qu'aujourd'hui. Il en résulte des bâtiments dépensiers en énergie qui créent, notamment des besoins en chauffage importants.

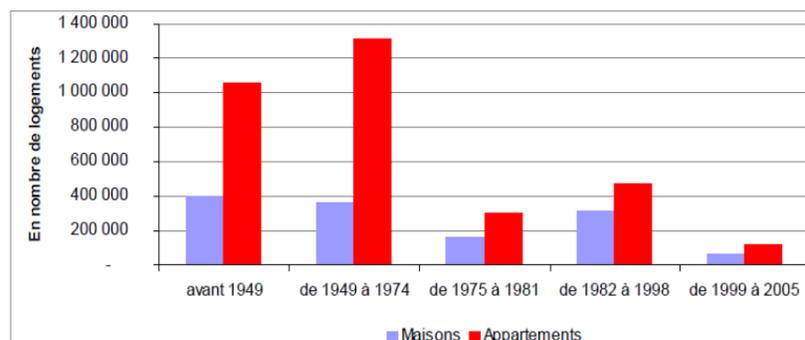


Figure 11 : L'ancienneté du parc de résidences principales en Ile-de-France (Source : L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, Energies Demain, INSEE, 2010)

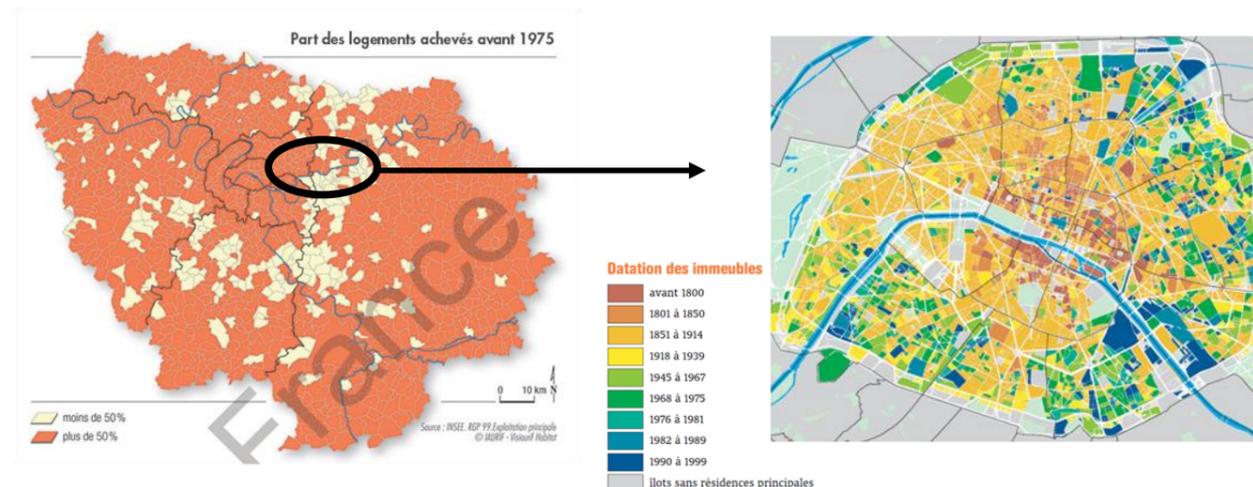


Figure 12 : Part des logements achevés avant 1975 en Ile-de-France (Source : Contraintes énergétiques et mutations urbaines. Cahier de l'IAURIF n°147, IAURIF, 2008)

Figure 13 : Datation des immeubles à Paris intra-muros (Source : Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes, APUR, 2007)

L'inertie du parc de logements et l'enjeu du parc existant¹⁶

Aujourd'hui, nous sommes loin du rythme de construction intense de la période des grandes rénovations urbaines : l'Ile-de-France est la région française qui construit le moins (Cf. Figure 14). Plus précisément, le territoire francilien se caractérise par une baisse de la construction dans l'individuel et une stagnation dans le collectif.

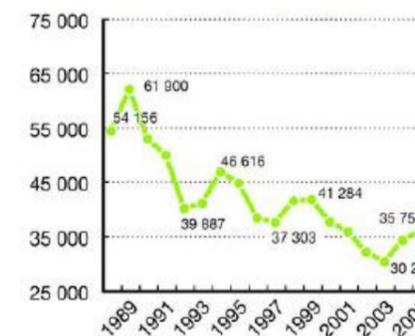


Figure 14 : Construction annuelle de logements en Ile-de-France de 1988 à 2005 (Source : Schéma Directeur de la Région Ile-de-France adopté le 25/09/2008, DREIF, Sitedel logements commencés, calculs IAURIF)

Etant donné le faible taux de renouvellement du parc de logements francilien (0.25 %), les logements anciens, construits avant 1975, représenteront encore 50 % du parc en 2030 et 43 % en 2050¹⁷. Dans ce contexte, les actions à mener pour réduire les émissions de CO₂ du secteur résidentiel francilien et parvenir à l'objectif de réduction par 4 des émissions de gaz à effet de serre doivent donc s'attaquer principalement à la réhabilitation du stock existant. D'ailleurs, le projet de SDRIF incite les acteurs publics à l'amélioration des performances énergétiques de l'existant mais sans, toutefois, pouvoir imposer d'objectifs quantitatifs en matière de rénovation et de performance énergétique.

¹⁶ Source du paragraphe : L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, 2010

¹⁷ Source : L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la région Ile-de-France (IAURIF), 2010

¹⁴ Source : ADEME, tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, 2010

¹⁵ Source : Contraintes énergétiques et mutations urbaines. Cahier de l'IAURIF n°147, IAURIF, 2008

Les perspectives d'évolution du parc résidentiel face à la crise du logement¹⁸

Depuis plus d'une quinzaine d'années, les volumes annuels de construction sont nettement inférieurs aux besoins et la pénurie de l'offre en logements s'est accentuée face à la pression de la demande. Résultat : une hausse spectaculaire du prix des loyers dans le marché du logement francilien (surtout dans Paris intra-muros et en Petite Couronne) qui a :

- accentué la migration de certaines catégories de ménages (en particulier les classes modestes et moyennes) en périphérie, où le prix du foncier est généralement moins élevé ;
- renforcé les disparités territoriales ;
- et fait apparaître de nouvelles formes d'habitat précaires.

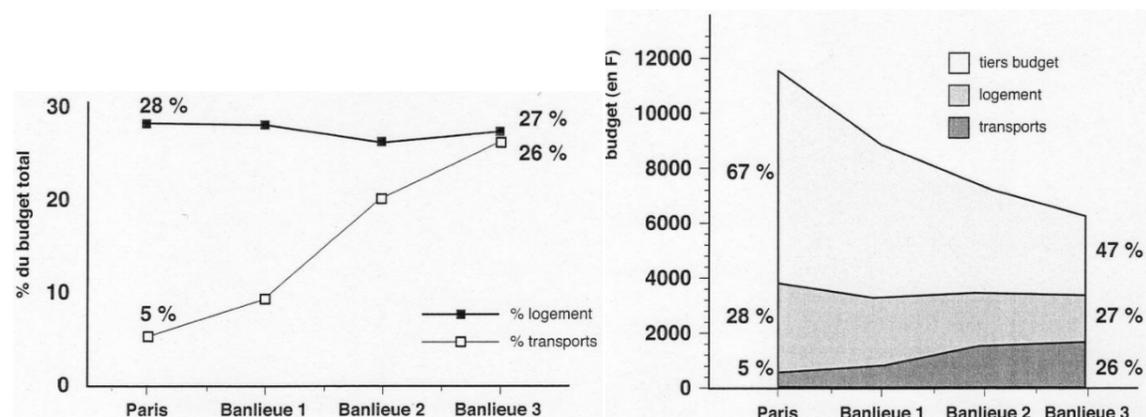


Figure 15 : Parts du budget des ménages (en % ou en francs) consacré aux transports et au logement selon la zone de résidence en Ile-de-France (Les densités urbaines et le développement durable. Le cas de l'Ile-de-France et des villes nouvelles, V.FOUCHIER, 1997)

Pour répondre à la demande insatisfaite en logements et face aux perspectives de croissance démographique ainsi qu'au phénomène progressif de desserrement des ménages¹⁹, le parc bâti francilien devra évoluer pour accroître l'offre en logements. C'est du moins l'objectif visé dans le projet du Schéma Directeur de la région Ile-de-France qui visait un rythme de construction de 40 000 logements par an qui s'accroîtrait avec le temps pour atteindre un rythme de 60 000 logements par an à l'horizon 2014. L'objectif du projet de SDRIF était d'atteindre environ 1,5 millions de logements supplémentaires d'ici 2030, en visant un taux de 30 % de logement locatif. Cet objectif est très ambitieux car très loin des tendances d'évolutions actuelles du rythme de construction. Il intègre l'achèvement des projets engagés et une intensification progressive de la construction dans le tissu urbain en utilisant l'ensemble des leviers disponibles (outils fonciers, documents d'urbanisme locaux, etc.). Il a été défini pour une situation sans projet de transport public du Grand Paris, et vise à accueillir 83 % de ces nouveaux logements dans l'agglomération parisienne de forte densité et dans des secteurs d'extension prédéfinis moyennant des mesures d'accompagnement complémentaires. La loi n°2010-597 du 3 juin 2010 relative au Grand Paris a confirmé la nécessité d'une action forte en faveur du logement et renforcé l'objectif de construction en le fixant à 70 000 logements par an.

Le parc tertiaire en hausse²⁰

Les surfaces affectées aux activités tertiaires ont progressé de 20 % entre 1990 et 2010. Aujourd'hui, elles représentent 190 millions de m² en Ile-de-France. Un quart de cette surface est constitué de bureaux (soit 48 millions de m²) tandis que les établissements commerciaux avec une surface supérieure à 300 m² représentent 7 millions de m².

Les bureaux : un parc constamment réhabilité²¹

En 2005, l'Ile-de-France compte 48 millions de m² de bureaux dont 52 % de surfaces neuves ou restructurées depuis 1985. Le parc de bureaux a doublé sa capacité d'accueil depuis trente ans au rythme d'un million de m² construit annuellement²², pour l'essentiel en extension du bâti existant.

Les restructurations jouent donc un rôle majeur et leur rythme tend à s'accroître. En effet, le rythme des restructurations a quadruplé entre 1995 et 2005 et celles-ci s'appliquent dorénavant, en plus du bâti haussmannien, aux immeubles de grande hauteur des années 1960-1970, principalement à la Défense. Contrairement aux logements, les bureaux ont en moyenne une durée de cycle de vie relativement courte (environ 20 ans). C'est pourquoi, ce processus de réhabilitation est appelé à se poursuivre puisqu'entre 2010 et 2015, la majorité des bureaux construits durant la période de grande rénovation urbaine arrivant en fin de vie.

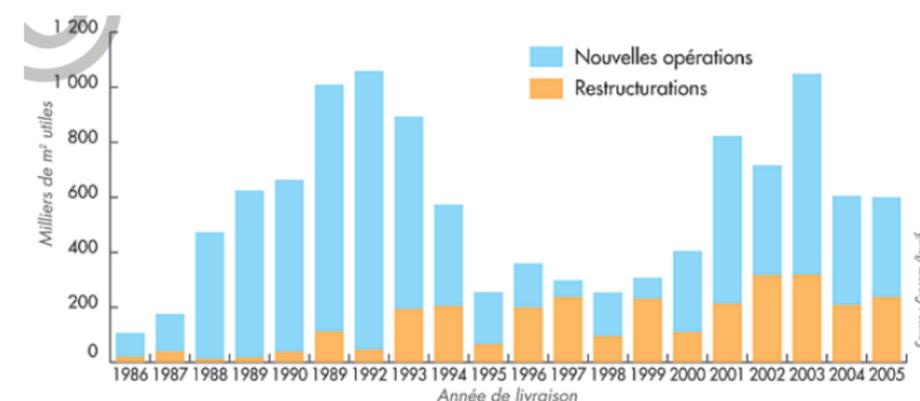


Figure 16 : Part des surfaces neuves de bureaux issues de restructurations d'immeubles existants (opérations lancées en blanc supérieures à 5 000m²) (Source : Contraintes énergétiques et mutations urbaines. Cahier de l'IAURIF n°147, IAURIF, 2008)

Les enjeux en matière de réduction des émissions liées au parc de bureaux portent donc autant sur le parc existant que sur la construction neuve. Les objectifs annuels prévus par le projet de SDRIF en matière d'évolution du parc de bureaux sont, d'ici à 2030²³ :

- 500 000 m² supplémentaires liés à l'accueil de nouveaux emplois ;
- 200 000 m² à construire pour compenser la destruction ou la réaffectation d'anciennes surfaces de bureaux ;
- 300 000 m² de surfaces existantes à rénover ;
- 200 000 m² de surfaces à démolir et reconstruire.

¹⁸ Source : Schéma Directeur de la Région Ile-de-France adopté le 25/09/2008

¹⁹ En 2005, la moyenne de surface habitable nécessaire pour un francilien était de 32m² SHON. En 2030, elle sera, d'après les estimations, de 36m² SHON (Source : Contraintes énergétiques et mutations urbaines. Cahier de l'IAURIF n°147, IAURIF, 2008).

²⁰ Source : Contraintes énergétiques et mutations urbaines. Cahier de l'IAURIF n°147, IAURIF, 2008

²¹ Source : Contraintes énergétiques et mutations urbaines. Cahier de l'IAURIF n°147, IAURIF, 2008

²² Source : Schéma Directeur de la Région Ile-de-France adopté le 25/09/2008

²³ Source : Schéma Directeur de la Région Ile-de-France adopté le 25/09/2008

Ces objectifs se fondent sur des besoins en surfaces neuves ou remises à neuf évaluées à 1,2 million de m² utiles en moyenne par an. Les travaux en cours sur les contrats de développement territorial prévus par la loi n°2010-597 du 3 juin 2010 relative au Grand Paris aboutiront probablement à modifier quelque peu ces objectifs et seront pris en compte dans le cadre de la révision du Schéma directeur.

1.2.3.3 Les contraintes réglementaires sur les performances énergétiques des bâtiments résidentiels et tertiaires

L'évolution de la Réglementation Thermique en France

Depuis 1974, des réglementations thermiques ont été établies en France pour réduire progressivement la consommation de la construction neuve. A l'époque, la Réglementation Thermique (RT) ne s'appliquait qu'aux bâtiments résidentiels neufs. Par la suite, (RT 1988), elle a été étendue aux bâtiments tertiaires neufs et aux parties nouvelles des bâtiments (RT 2005). Aujourd'hui, la réglementation thermique s'attaque au domaine de la rénovation. D'autre part, les RT s'inscrivent désormais dans le cadre des directives européennes et s'appliquent également au bâti existant dans le cadre de la certification énergétique des bâtiments exigée lors de toute transaction immobilière.

Les objectifs de la RT

Les réglementations thermiques sont des réglementations d'objectifs : elles laissent la liberté de conception du bâtiment (architecture, matériaux, etc.) tout en fixant des cibles d'isolation de l'enveloppe à atteindre et en limitant, en bout de chaîne, la consommation d'énergie par usage. Le calcul des cibles à atteindre se fait par bâtiment, et non pas par logement ou bureau.

La RT et les tendances d'évolution des consommations du parc francilien

Avant la mise en œuvre des préconisations du Grenelle, la RT était censée définir des normes de plus en plus restrictives, c'est-à-dire que, tous les 5 ans, la nouvelle Réglementation Thermique devait améliorer de 15 % les performances énergétiques des nouveaux bâtiments par rapport à la précédente.

L'objectif de cette RT évolutive était d'aboutir à des consommations unitaires de chauffage de 20 kWh/m² en 2050. Toutefois, étant donné le faible taux de renouvellement du parc résidentiel francilien actuel (Cf. page 17), l'application de la RT au neuf conduira plutôt, d'après les estimations²⁴, à une consommation moyenne du parc en 2050 supérieure à 50 kWh/m²/an. Bien que nettement inférieure à la moyenne actuelle des bâtis franciliens (environ 250 kWh/m²/an), cette valeur de 50 kWh/m²/an reste loin des objectifs visés par la démarche RT, d'où l'enjeu d'agir également sur l'existant. C'est d'ailleurs l'un des objectifs des nouvelles normes sur les réhabilitations qui sont en cours d'élaboration.

²⁴Source : Contraintes énergétiques et mutations urbaines. Cahier de l'IAURIF n°147, IAURIF, 2008

Le développement des certifications environnementales des bâtiments

Afin d'encourager les entrepreneurs dans leurs projets, de nouveaux labels énergétiques ont été développés au début des années 90 et continuent d'évoluer. Ils permettent notamment de mettre en avant une ambition énergétique qui va au-delà du simple respect des exigences thermiques actuelles. HPE (Haute Performance Energétique), THPE (Très Haute...) ou encore THPE EnR sont autant de labels qui permettent aujourd'hui aux entrepreneurs de communiquer leurs ambitions énergétiques.

La labellisation environnementale, certifiée par un organisme indépendant, est une démarche volontaire de la part des entrepreneurs. Outre le fait que la labellisation est un outil de communication indéniable, c'est aussi un outil qui offre un cadre méthodologique permettant de définir et de hiérarchiser les objectifs environnementaux souhaités, notamment en termes énergétiques.

Parmi les systèmes de management environnemental existants à l'heure actuelle, on peut citer les modèles étrangers LEED, BREEAM, DGNB, le modèle français HQE ou encore le référentiel Habitat et Environnement (H&E). Ceux-ci s'appliquent à l'échelle d'un bâtiment, à la fois pour la construction et la rénovation d'un logement ou d'un bâtiment tertiaire. Tous, sans exception, font de l'énergie une cible spécifique avec des objectifs à atteindre à la fois sur les consommations, l'isolation du bâtiment, etc. D'autres outils existent également à l'échelle d'un quartier, par exemple l'Approche Environnementale de l'Urbanisme (AEU), développée par l'ADEME.

Des incitations fiscales à destination des particuliers

Des incitations fiscales se sont également développées en parallèle afin d'inciter les particuliers à engager des travaux énergétiques dans leur logement (primes, prêts à taux intéressants, etc.) et afin de les informer quant aux performances énergétiques des bâtiments (certifications énergétiques). Si le sujet n'est pas approfondi dans le présent rapport, il est toutefois rappelé à titre d'information car ces incitations fiscales constituent un levier non négligeable afin d'agir sur les comportements individuels des principaux utilisateurs des bâtiments.

Les réglementations à venir

Suite au Grenelle de l'Environnement, la nouvelle RT 2012, en application à partir de 2011, devient la référence. Celle-ci vise à être plus restrictive et à atteindre une division par 3 de la consommation énergétique des bâtiments neufs²⁵, en s'alignant sur le label BBC 2005 (consommation maximale de 50 kWh/m²/an). Elle concerne les 5 usages: chauffage, rafraîchissement, eau chaude sanitaire, ventilation et auxiliaires. Ensuite, à l'horizon 2020, une nouvelle RT (2020) est envisagée pour mettre en œuvre le concept de bâtiment à énergie positive (BEPOS).

Concernant l'existant, la loi Grenelle vise à réduire les consommations d'énergie du parc français d'au moins 38 % d'ici 2020 et, ce, par la rénovation complète de 400 000 logements à compter de 2013.

²⁵Constructions neuves faisant l'objet d'une demande de permis de construire déposée à compter de la fin 2012 et bâtiments publics et tertiaires dont la demande est déposée à compter de la fin 2010.

1.2.4 Ce qu'il faut retenir

Avec 24,6 Mtep consommés en 2006, l'Ile-de-France est la région française la plus consommatrice d'énergie (15% du total national). Toutefois, l'Ile-de-France affiche une consommation par habitant (2,1 tep/hab) inférieure à la moyenne nationale.

L'Ile-de-France c'est une métropole compacte qui comprend :

- 11 millions d'habitants (18 % de la population française) : une population relativement jeune et en relative stagnation ;
- 5 millions d'emplois, majoritairement dans le secteur du tertiaire ;
- un cœur d'agglomération, Paris intra-muros et ses immeubles d'habitat collectif, très dense, et une petite couronne occupée par un mélange d'habitat collectif et résidentiel relativement dense, entourés d'une ceinture verte qui inclut les agglomérations nouvelles où différents types d'habitats et d'espaces ruraux s'imbriquent ;
- 80 % de sa superficie recouverte d'espaces naturels, agricoles et forestiers.

La consommation énergétique de l'Ile-de-France c'est :

- avant tout le secteur des transports avec 44 % de la consommation énergétique en 2005 ;
- mais également le secteur du bâtiment (29 % secteur résidentiel, 19 % secteur tertiaire), principal gisement d'économies d'énergie et cible des évolutions réglementaires en lien avec les consommations énergétiques.

Le parc bâti francilien révèle différents potentiels énergétiques :

- un parc résidentiel (5.2 millions de logements) majoritairement collectif, ancien, et très inerte ;
- un parc tertiaire constitué majoritairement de bureaux et de commerces et qui bénéficie d'un taux de renouvellement bien supérieur ;
- pour le secteur résidentiel et, dans une moindre mesure, le secteur tertiaire, l'enjeu majeur à moyen terme est la rénovation énergétique de l'existant.

De plus en plus de leviers d'action pour agir sur le secteur du bâtiment se développent :

- la Réglementation Thermique évolutive, renforcée par les lois Grenelle, agit sur les bâtiments résidentiels et tertiaires neufs et s'étend au fur et à mesure à l'existant ;
- les certifications environnementales, de plus en plus poursuivies par les promoteurs, constituent un outil pour viser des performances énergétiques plus ambitieuses, allant au-delà des exigences réglementaires en vigueur ;
- et, en parallèle, de nombreuses incitations fiscales (primes, prêts, etc.) à destination des particuliers visent à encourager les travaux énergétiques des logements.

1.3 Le projet de réseau de transport public du Grand Paris et les émissions de GES

Le projet de réseau de transport public du Grand Paris consiste en la création d'un nouveau métro automatique d'approximativement 175 km et comprenant 57 gares. Ce réseau reliera Paris aux pôles stratégiques de la région Ile-de-France et sera 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"²⁶.

Le projet de métro n'est qu'un élément d'une vaste entreprise stratégique de développement 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. 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 sera prépondérante pour une évaluation adéquate et complète du projet sur les émissions de GES et par conséquent sur les changements climatiques.

1.3.1 Objectifs du projet et impacts attendus

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

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 réseau de transport public 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.

Soutien du développement économique et territorial

Le Réseau de transport public du Grand Paris devrait favoriser le développement économique de la région Ile-de-France en :

²⁶Article 1 de la loi n°2010-597 du 3 juin 2010 relative au Grand Paris

- 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.

Ceci devrait permettre, notamment, d'améliorer l'attractivité du territoire, de faciliter l'accès des demandeurs d'emplois à plus d'offres d'emplois et 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.

Le métro devrait également stimuler l'aménagement des territoires. L'offre nouvelle de transport public sera en effet accompagnée de l'aménagement de véritables quartiers de villes, mélangeant logements et emplois. Grâce à des mesures d'accompagnements, une structure d'agglomération plus compacte et des projets urbains plus denses et moins consommateurs d'espace pourront être programmés.

Participation au développement durable

Le réseau de transport public du Grand Paris est un projet de développement durable, dont les effets seront bénéfiques sur les plans économique et social, mais également du point de vue environnemental : 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.

Comme mentionné précédemment, le réseau de transport public du Grand Paris aura pour effet de diminuer la part relative de la voiture au profit des transports en commun. La mise en œuvre du métro automatique devrait permettre un report modal de la voiture vers les transports publics estimé, au stade de l'Evaluation Stratégique Environnementale présentée au débat public, à 18 000 voyages à l'heure de pointe du matin à l'horizon 2035. Cette diminution du trafic routier devrait permettre de réduire les nuisances qu'il provoque à tous les niveaux : bruit, consommations énergétiques et émissions de GES, pollutions atmosphériques,...

Source : Société du Grand Paris, 2011, www.societedugrandparis.fr

1.3.2 Impacts attendus sur les émissions de GES

Sachant que la construction de ce métro représenterait, a priori, un « investissement » non négligeable au niveau de son impact carbone²⁷, il est 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 important consenti au départ.

Les émissions de GES induites par le projet seront très variables en fonction des différentes phases du projet. Globalement, les phases suivantes peuvent être distinguées : la phase préalable d'études et de travaux préparatoires, la phase de construction de l'infrastructure et la phase de fonctionnement (voir Figure 17). En phase de fonctionnement, les émissions induites directement par le fonctionnement de l'infrastructure, les émissions liées à l'évolution de la mobilité en Ile-de-France et les émissions liées aux impacts sur le développement territorial peuvent également être distinguées (voir Figure 17).

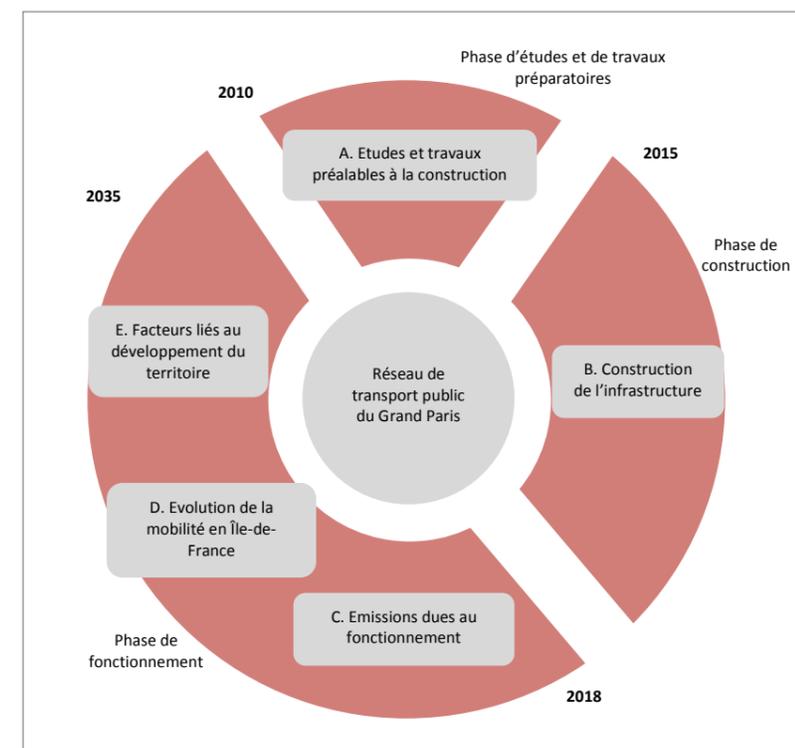


Figure 17: Principales catégories de postes d'émissions en fonction de différentes phases de réalisation du projet

Chaque thématique sera analysée plus en détails dans les paragraphes suivants. Pour chacun des postes d'émissions nous détaillerons :

| Les composantes en jeu | Principales variables intervenant au sein du poste d'émissions |
|--------------------------|---|
| Les facteurs d'influence | Facteurs qui peuvent influencer positivement ou négativement les composantes du poste d'émissions. L'analyse portera essentiellement sur les facteurs en lien avec le projet |
| Les chiffres clefs | Présentation de quelques chiffres clefs permettant d'approcher l'importance du poste d'émissions dans le bilan global |
| Les leviers | Actions permettant d'influencer positivement et de façon importante le bilan de GES du projet et qui sont du ressort des acteurs de l'aménagement du territoire. (Remarque : les autres leviers sont parfois cités mais non détaillés) |

1.3.2.1 Etudes préalables à la construction

La réalisation de projets majeurs d'infrastructures de transport requiert de nombreuses concertations, études et travaux préparatoires. Citons notamment les études d'intérêt socio-économiques, les études d'incidences environnementales, les débats et enquêtes publics, les études géotechniques, les études de génie civil, etc. L'initiation et le suivi du projet nécessitent également un important travail de gouvernance.

²⁷L'impact carbone des projets ferrés du Grand Paris, Carbone 4, SNCF, 2011

Composantes en jeu

Les émissions concernées sont notamment liées :

- Aux déplacements domicile-lieu de travail des employés (voiture/transports spéciaux/transports publics) ;
- A la consommation énergétique (électricité/gaz) des bâtiments dans lesquels sont réalisées ces études ;
- A l'utilisation de consommables bureautiques et de papier (émissions liées à leur fabrication, leur transport et à la gestion des déchets générés) ;
- A l'amortissement du matériel utilisé pour les travaux (matériel informatique [par exemple : ordinateurs, imprimantes,...], matériel topographique [par ex : GPS, théodolite,...], machines de forage, etc.) ;
- Aux voyages et déplacements spéciaux réalisés par les personnes en charge des études dans le cadre du projet (réunions avec les comités de pilotage, visites et échantillonnages de terrain, campagnes d'enquêtes, etc.).
- A l'amortissement des bâtiments. La construction des immobilisations (immeubles) nécessite, en effet, la production des matériaux de base, leur transport et leur assemblage, ce qui engendre des émissions qui doivent être réparties sur la durée de vie des bâtiments.

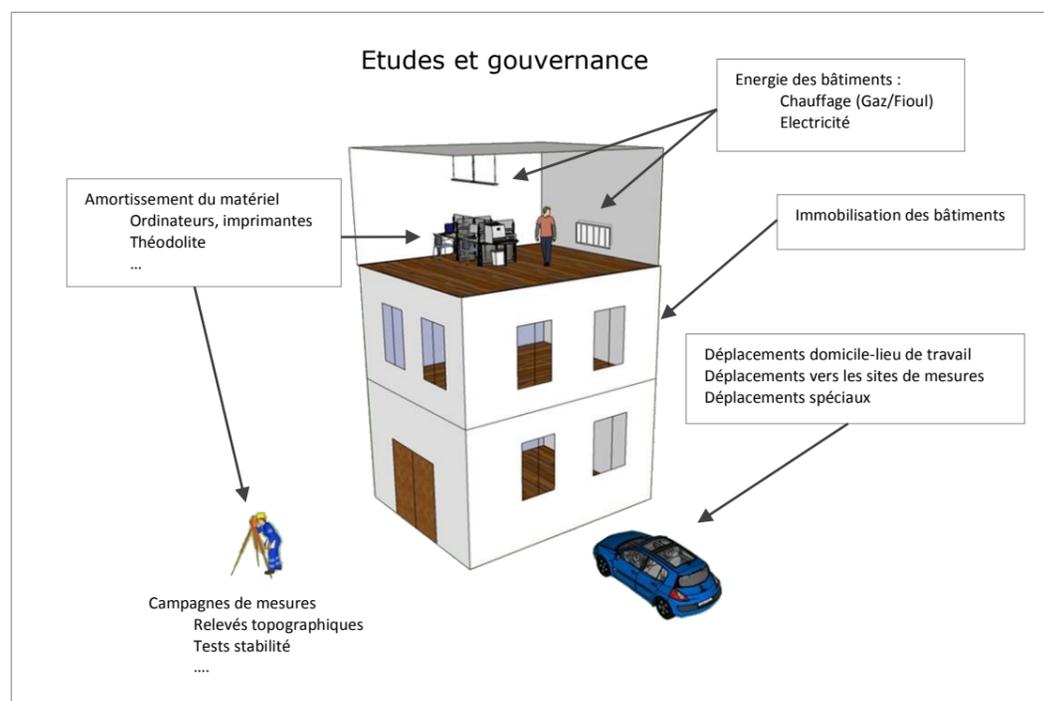


Figure 18 : Représentation des postes d'émissions lors de la phase d'études et de travaux préalables.
Source : Stratec.

Facteurs d'influence

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 de la permission de construire l'infrastructure). Les émissions induites par les études et travaux préalables sont donc relativement fixes et ne seront donc que peu influencées par des facteurs extérieurs. Le seul facteur d'influence notable sera la façon écologique ou non de conduire les études au sein des bureaux d'études.

Chiffres clefs

- Consommation énergétique (tous usages) de bureaux en métropole = 11,96 kg CO₂ /m²/an
- Emissions liées aux déplacements domicile-travail d'un employé utilisant un véhicule particulier = de 1259,12 à 1635,04 kg éq. CO₂ / an
- Emissions liées à l'immobilisation des bâtiments = 467,15 kg éq. CO₂ /m² (Pour une durée de vie moyenne de 50 ans on a donc 9,34 kg éq. CO₂ /m² / an).

(Source : ADEME 2010, Guide des facteurs d'émissions V6.1)

Leviers d'action

En ce qui concerne les études préalables à la construction, il n'existe que peu de leviers d'action permettant de modifier sensiblement le bilan d'émissions de GES global. En effet, la plupart des études sont indispensables et imposées par la législation.

Le maître d'ouvrage pourra cependant encourager un travail peu émetteur en GES au sein de ses structures et au sein des différents bureaux d'études et encourager ses collaborateurs et ses fournisseurs à se déplacer moins et en transports en commun.

1.3.2.2 Construction du métro

La construction de l'infrastructure de métro implique deux postes d'émissions de GES très différents qui seront analysés en détails dans ce chapitre :

- Les émissions liées aux chantiers et à la production, au transport et la mise en œuvre des matériaux de construction ;
- Les émissions liées aux changements d'usage du sol.

1.3.2.2.1 Les émissions liées aux chantiers et à la production, au transport et la mise en œuvre des matériaux de construction ;

La construction de l'infrastructure de métro se traduit par l'implantation de différents chantiers qui, au-delà de l'énergie utilisée et des ressources mobilisées au niveau local, font également appel à des matériaux de construction (ciments, métaux,...) qu'il a fallu produire et acheminer pour pouvoir les mettre en œuvre sur le chantier.

Composantes en jeu :

A. Consommation énergétique sur les chantiers

La consommation d'énergie sur les chantiers est le premier poste qui vient à l'esprit. On y retrouve 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...). L'approvisionnement en électricité sur le réseau se distingue de l'utilisation de combustibles sur le chantier par le fait qu'il n'y a pas d'émissions de GES associées sur le site, mais qu'elles sont déportées hors du site (centrales électriques).

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 :

- D'une part, les combustibles nécessitent d'être extraits, transportés et pour la majorité traités ou raffinés, ce qui nécessite des moyens et une dépense énergétique associée en plus des émissions liées aux combustibles (torchère...). Ces émissions sont qualifiées d'« amont » et représentent en ordre de grandeur 10 % des émissions directes dans le cas des combustibles fossiles.
- D'autre part une fraction de l'électricité produite dans les centrales est dissipée en ligne et lors des transformations de voltage par effet joule. Ces pertes en ligne représentent 7 % à 10 % sur un réseau moderne.

En synthèse, les émissions liées à l'énergie consommée sur le chantier peuvent être classées de manière suivante :

| | Emissions directes sur site | Emissions directes hors site | Emissions indirectes |
|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|
| Combustibles fossiles (fioul, gaz...) | Combustion (pots d'échappement) | | Extraction, transport et raffinage |
| Electricité provenant du réseau | | Production de l'électricité consommée | Production de l'électricité perdue en ligne |

Chiffres clefs :

- On constate une grande variété de conception de tunnelier liée principalement à la dureté du terrain. Les terrains rencontrés imposent des outils de coupe, des vitesses de rotation et des vitesses d'avance différentes. De plus, certains tunneliers permettent de travailler en continu avec une pose des voussoirs en même temps que la coupe, d'autres travaillent par avancées successives. Cette diversité rend difficile de définir des chiffres clés pour l'énergie consommée selon que les données disponibles considèrent uniquement l'énergie consommée par la tête de coupe, par le train total ou allant jusqu'à inclure la pose de voussoirs. Nous nous sommes attachés à considérer la puissance totale absorbée. Les calculs réalisés pour établir le graphique ci-après se basent sur des tunneliers fonctionnant dans des conditions optimales selon leur fiche technique.

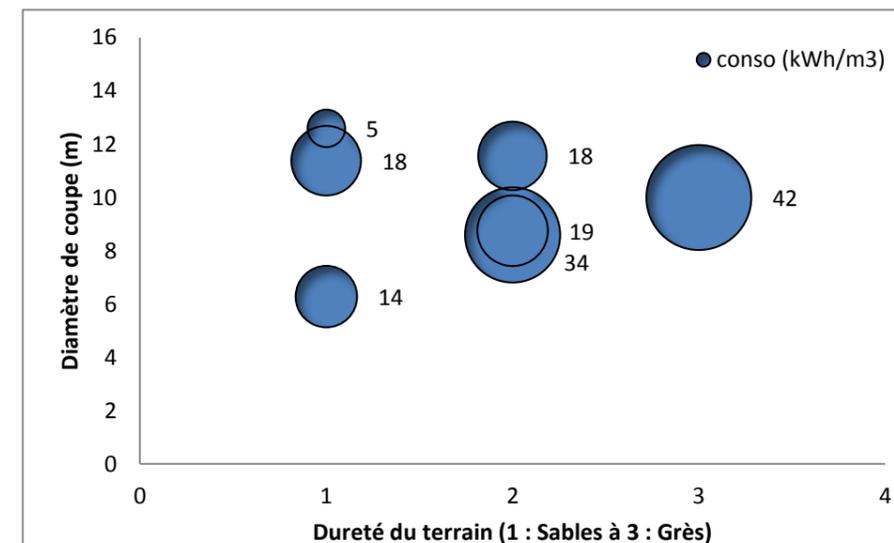


Figure 19 : Comparatif de l'énergie consommée par le tunnelier par m³ de terrain excavé (Source : Burgeap 2011)

- La consommation énergétique liée au terrassement à la pelle mécanique (cas de tranchées couvertes, bâtiments...) fait apparaître une consommation en carburant de l'ordre de 1 litre de fioul par m³ de matériaux terrassés. On retrouve cet ordre de grandeur dans le calculateur LGV (RFF-SNCF-ADEME) avec l'utilisation d'un ratio de 1,06 l/m³ terrassé.

B. Fabrication des matériaux utilisés

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...) 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.

Energie de production

Les moyens mis en œuvre pour produire un matériau nécessitent de l'énergie. Cette énergie est dite « grise ». Les émissions associées sont ramenées par unité produite : une tonne, un mètre linéaire...

Certains matériaux tels que l'acier peuvent être recyclés. Dans ce cas, pour produire une tonne de matériau aux caractéristiques comparables, la consommation énergétique (et donc les émissions de GES associées) diffère. Les questions et règles de prise en compte associées au recyclage sont exposées dans la suite du document.

Dégazage des ressources exploitées

On rencontre ce deuxième cas d'émissions lors de la production de chaux (CaO) ou de ciment : le chauffage du calcaire (CaCO₃) entraîne 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).

Chiffres clefs

Les émissions liées à la production d'une tonne de matériaux varient significativement selon la famille de matériaux et leurs caractéristiques :

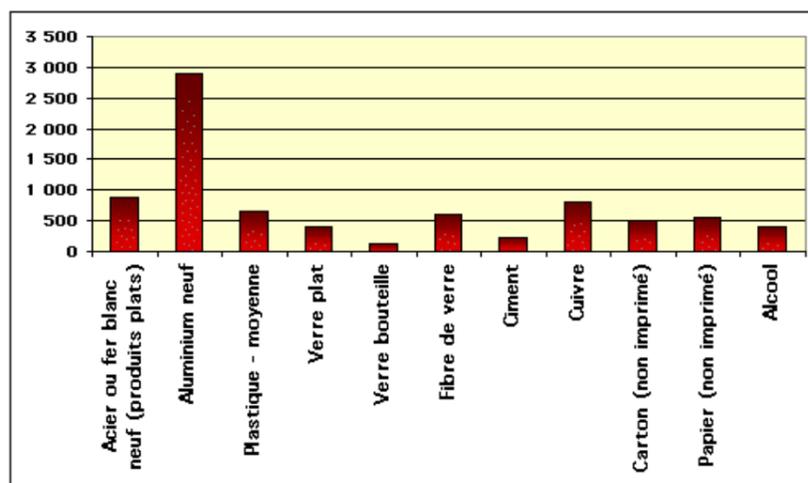


Figure 20 : Facteur d'émission de différents matériaux (kgCe/t) en moyenne européenne, Source : Bilan Carbone®

Le recyclage influe généralement de manière importante les facteurs d'émissions des matériaux qui sont énergivores à extraire mais relativement faciles à recycler. C'est le cas de l'aluminium avec un facteur 20 entre la production de recyclé ou de matériau vierge :

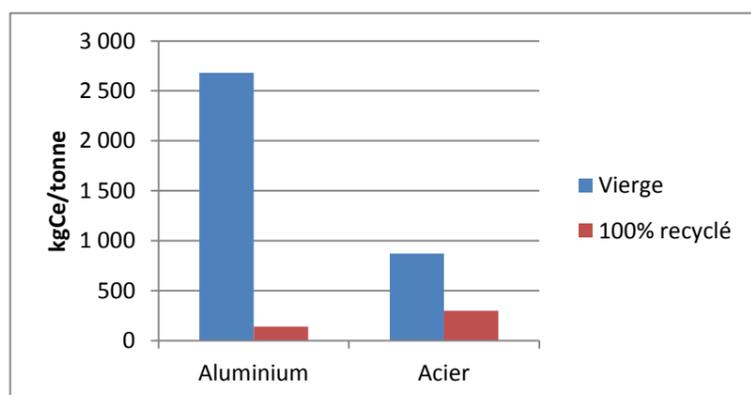


Figure 21 : Influence du recyclage sur le facteur d'émission de métaux (kgCe/t), Source : Bilan Carbone®

C. Transport des matériaux et matériels

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...)
- L'expédition depuis le chantier vers les lieux de gestion de déchets ou d'entreposage des matériels.

La même remarque que celle faite pour le poste « consommations énergétiques sur les chantiers » s'applique aux émissions liées au transport de matériaux, c'est-à-dire que les émissions comptabilisées correspondent non seulement à la combustion de carburant qui se traduit par des émissions aux pots d'échappement des véhicules mais aussi aux moyens mis en œuvre pour extraire, raffiner et transporter le carburant ou l'énergie.

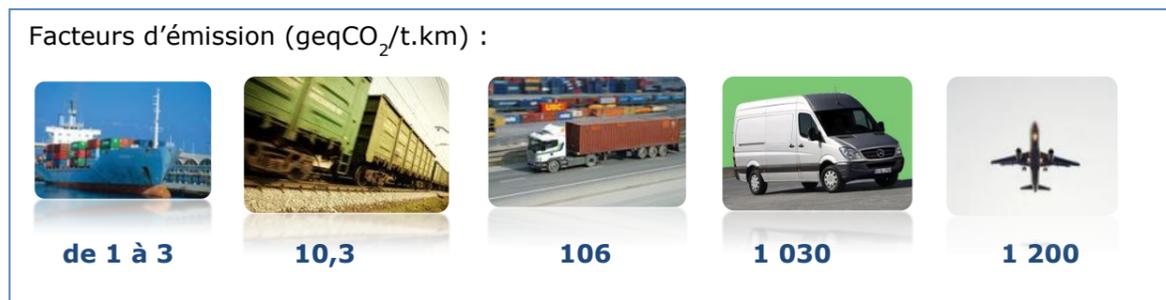
Lorsque le transport de matériaux est important, il est souvent nécessaire de tenir compte de l'usure des véhicules de transport. Il est alors possible d'évaluer l'impact lié à la fabrication des véhicules au pro rata de l'usure correspondant à l'usage qui en est fait : par exemple, un véhicule individuel a une espérance de vie de 200 000 km ; parcourir 2 000 km correspond à une usure de $\frac{2\,000}{200\,000} = 1\%$. Cette notion de répartition de l'impact lié à la fabrication d'un bien servant sur une certaine durée correspond au principe comptable d'"amortissement des immobilisations". Les comptables financiers ont des règles sophistiquées de prise en compte, les exercices de comptabilisation en GES se limitent à une prise en compte proportionnelle par rapport à un service rendu.

En synthèse, les émissions liées au transport de matériaux et matériels peuvent être classées de manière suivante :

| | Emissions directes sur site | Emissions directes hors site | Emissions indirectes |
|---|---|---|--|
| Combustibles fossiles (fioul, gaz...) | Combustion des véhicules opérés : sur chantier (pots d'échappement) | Combustion des autres véhicules : hors contrôle direct (pots d'échappement) | Extraction, transport et raffinage Amortissement des véhicules |
| Electricité provenant du réseau (cas des véhicules électriques) | | Production de l'électricité consommée par les véhicules électriques | Production de l'électricité perdue en ligne Amortissement des véhicules |

Chiffres clefs

On constate des émissions liées au transport de matériaux qui vont croissantes avec la rapidité du moyen de transport. Cette remarque est logique, mais cela prend des proportions qui vont au-delà du rapport que l'on peut penser :



D. Emissions/absorptions des procédés

Des procédés sont susceptibles d'émettre ou d'absorber des GES :

- Bien que répartie sur une partie de la durée de vie de l'infrastructure et donc non limitée à la phase de construction, nous abordons ici la question de la carbonatation du béton car elle est directement liée aux choix des matériaux utilisés. Les bétons sont constitués d'une matrice (fers, graves...) et d'un liant (ciment). Le ciment étant principalement composé de silicates, d'aluminates et de ferrites de calcium : C3S = Ca₂SiO₅, C2S = Ca₂SiO₄, C3A = Ca₃Al₂O₆, C4AF = Ca₄(Al, Fe)O₅. Les pores du béton, résultant de l'eau résiduelle de sa mise en œuvre, constituent des surfaces privilégiées pour l'attaque du ciment par le CO₂ atmosphérique. On assiste alors à une (re)carbonatation (CaO + CO₂ → CaCO₃) qui constitue une absorption de CO₂ atmosphérique. Cette absorption reste limitée (elle dégrade par ailleurs les qualités du béton et entraîne le gonflement des fers et l'éclatement du béton lorsque les fers sont atteints). Elle est fortement variable d'un béton à l'autre, de l'exposition aux intempéries, de la température... : « Elle est maximale pour une humidité relative comprise entre 60 et 80 %. Au-delà de 80 %, la cinétique diminue rapidement pour atteindre des valeurs extrêmement faibles lorsque les pores sont saturés d'eau, [...]. La cinétique de carbonatation est [...] faible à très faible lorsqu'un béton est immergé ou lorsqu'il est placé dans un environnement très sec. »²⁸. La variabilité de ce phénomène et la petite importance des flux devant ceux liés à la production du ciment font qu'aucune méthode identifiée ne le prend en compte.
- Les fuites de gaz frigorigènes de groupes froids (climatisation des bases-vie...). Les masses de fluides s'échappant des groupes froids (climatisation, pompe à chaleur...) sont infimes : quelques dizaines de grammes par an pour un groupe de 1 kW_{frigo} (équivalent à la climatisation d'un préfabriqué de 15m² : type "Algéco®"). Les gaz employés dans les machines thermiques sont cependant très impactant en termes d'effet de serre : ces quelques dizaines de grammes correspondent par leurs effets à plusieurs dizaines de kg, voire plus de 100 kg de CO₂.

Les autres matériaux composant l'infrastructure ferroviaire, les bâtiments ou le matériel roulant n'ont pas d'échanges de GES avec l'atmosphère lors de leur mise en œuvre ou utilisation : un acier peut rouiller ; cela n'affecte en rien l'atmosphère.

E. Amortissement des engins

Les émissions liées à la fabrication des engins de chantiers peuvent être amorties dans la même logique que celle exposée pour les véhicules utilisés pour le transport des matériaux.

Cette prise en compte est pertinente pour des machines massives et potentiellement conçues ou adaptées pour le chantier. Le cas de tunnelier sera à approfondir en ce sens.

F. Gestion des déchets

La gestion des déchets représente un enjeu auquel le grand public peut être sensible. Cependant, les émissions associées à ce poste sont souvent très inférieures à celles liées à la production des matériaux approvisionnés (exception des plastiques incinérés).

Les moyens mis en œuvre pour gérer les déchets et les émissions liées à l'incinération sont à prendre en compte.

Dans le cas de recyclage (valorisation matière) des déchets, une règle de coupure doit être définie pour ne pas prendre en compte deux fois un même poste : lors la production des matériaux approvisionnés issus de recyclé et lors du recyclage des déchets issus du chantier aboutissant à la production de matériaux recyclés.

Dans le cas de valorisation énergétique suite à la combustion des déchets, il y a production d'une quantité d'électricité et/ou de chaleur qui est ensuite exploitée. Le fait de valoriser l'énergie issue de la combustion ne change rien aux émissions qui ont physiquement lieu, comparé à un scénario de combustion sans valorisation. Certains référentiels comme le Bilan Carbone^{®29} propose une quantification des émissions dites « évitées » correspondant aux émissions qui auraient été générées pour produire cette même quantité d'électricité ou de chaleur par les moyens conventionnels. Ces émissions n'étant pas additionnelles, elles ne sont pas déduites du bilan global.

G. Transport des personnes

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.

Des personnes "gravitent" autour du chantier et y interviennent ponctuellement (contrôles, conduite de tâches, résolution de blocages...). Les déplacements associés étant davantage ponctuels, ils sont généralement moins optimisés (nombre de personnes par voiture...).

Facteurs d'influence

Le principal facteur qui déterminera l'importance des émissions de GES induites par la construction de l'infrastructure sera l'ampleur des travaux à réaliser. Les variables déterminantes seront donc la longueur du métro, le nombre de gares et la configuration adoptée (aérienne / au sol / souterraine en tranchée couverte / souterraine en tunnelier).

De manière moins importante, les choix relatifs au déroulement des chantiers pourront influencer le bilan global. Ces choix concernent par exemple les matériaux de construction (type, origine, recyclé ou non,...) et la réutilisation des déblais sur site ou les méthodes d'évacuation (par camions, par voie d'eau,...).

Leviers

Il sera possible de minimiser les émissions de GES induites par la construction de l'infrastructure en optimisant les caractéristiques du métro et en favorisant les possibilités de conduite de chantier les moins émissives.

Emissions liées aux changements d'usage du sol

²⁸ Laboratoire d'Etude et de Recherche sur les Matériaux, Dossier technique sur la Carbonatation du béton.

²⁹ Bilan Carbone[®] est une méthodologie issue de l'ADEME.

Composantes en jeu

Les terrains ont un contenu en carbone qui varie selon leur utilisation : d'une part, la partie arienne (biomasse) est directement impactée par l'affectation des terrains, d'autre part, les sols ont un contenu carbone (pouvant être très significatif) dépendant directement de la biomasse qui les alimente. Ainsi, le changement d'utilisation des terrains peut conduire à un appauvrissement ou à un enrichissement de leur contenu carbone.

En outre, le remplacement de surfaces agricoles ou de surfaces boisées par des surfaces urbanisées supprime leur utilisation potentielle pour la production de biocarburants ou de matières combustibles (bûches, plaquettes,...). Les surfaces naturelles s'apparentent, en effet à des usines écologiques de production d'énergie renouvelable qui, non seulement, immobilisent une quantité de carbone mais produisent aussi continuellement de la biomasse pouvant être exportée pour la production d'énergie renouvelable. Il convient donc de tenir compte, lors d'un changement d'affectation des sols, des émissions annuelles qui pourront ou ne pourront plus être évitées à cause de l'augmentation ou de la diminution de la production de ces matières combustibles.

Facteurs d'influence

La mise en place des chantiers et la construction de nouvelles gares et de lignes de métro au sol ou en aérien entraîneront un changement d'affectation de certaines surfaces. L'étendue de ces surfaces sera principalement déterminée par le nombre et l'étendue des gares ainsi que la longueur des lignes de métro non souterraines.

Il est intéressant de noter que l'emprise au sol des chantiers et de l'infrastructure du métro sera relativement minime par rapport à l'impact du métro sur l'urbanisation qui sera traité plus en détails dans la suite de ce document.

Chiffres clefs

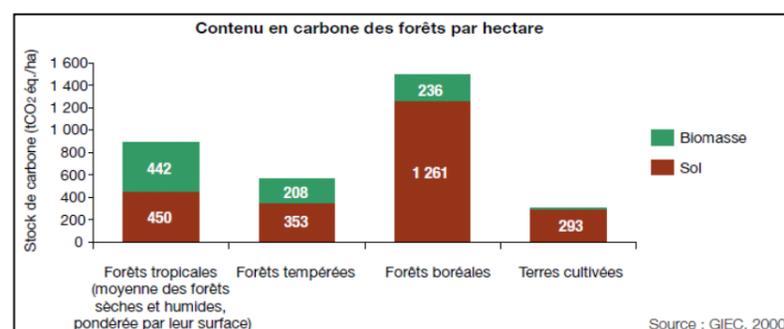


Figure 22 : Stocks de carbone contenus dans la biomasse et le sol selon le type d'occupation du territoire (Source : GIEC 2000)

Un terrain complètement construit ne supportera aucune végétation (donc aucune biomasse) et le sol ne contiendra qu'une quantité négligeable de matières organiques. Le passage d'un hectare de terrain agricole vers un hectare construit correspondra donc à approximativement 300 téq. CO₂ émis.

Leviers

Comme mentionné précédemment, les surfaces affectées par la construction de l'infrastructure même seront relativement minimales par rapport aux impacts attendus sur l'urbanisation. Les leviers concernant l'emprise au sol des chantiers et de l'infrastructure n'auront donc qu'une influence assez limitée sur le bilan global.

On pourra tout de même éviter autant que possible les constructions de gares et les parkings trop étendus ainsi que les lignes non souterraines en zone initialement boisée ou agricole. On pourra aussi maximiser les surfaces végétales (toitures vertes, parkings enherbés, etc.).

1.3.2.3 Fonctionnement de l'infrastructure

De nombreux flux de carbone seront liés au fonctionnement des infrastructures de transport. Il s'agit principalement de la consommation d'énergie et de tous les intrants liés au fonctionnement des trains et des gares.

Composantes en jeu

- 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.). Des rames de service peuvent également recourir à des combustibles (fioul, différents gaz...), permettant ainsi d'intervenir sur le réseau lorsque la distribution en électricité est coupée (maintenance...).
- la consommation en énergie des gares (éclairage, chauffage, ventilation, etc.) ; les bâtiments d'accueil du public, de gestion et techniques (atelier de maintenance...) consomment également 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, les consommations énergétiques des bureaux, l'amortissement du matériel et de l'immobilier ; le personnel travaillant au fonctionnement de l'infrastructure (agents de conduite, agents de maintenance, régulateurs...) induisent des déplacements quotidiens pour se rendre à leur travail et en repartir.
- 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 détachées, de produits d'entretien... Des opérations plus importantes de rénovation ou de renouvellement sont parfois aussi nécessaires. L'entretien courant répond à la même logique que les consommables : la maintenance est réalisée au fil du temps avec une certaine régularité des budgets associés. Par conséquent la prise en compte peut se faire sur base des flux annuels approvisionnés sans amortir ceux-ci. Le renouvellement ponctuel de gros matériels ou les opérations lourdes de rénovation se distinguent de l'entretien courant par le fait que ces opérations correspondent à des budgets exceptionnels dont l'investissement est amorti sur plusieurs années. Afin de faire correspondre les émissions associées à la

logique d'usage, plusieurs méthodes (dont le Bilan Carbone®) proposent une prise en compte de ces émissions en les répartissant sur la durée d'usage correspondant.

- Fuite de climatisation : On retrouve ici les émissions évoquées au chapitre des émissions sur les chantiers relatives aux fuites de gaz frigorifiques provenant des groupes froids. Malgré leurs petites quantités, les gaz utilisés dans les climatiseurs ont en effet un impact important en termes d'effet de serre lorsqu'ils sont relâchés (suite aux fuites des machines thermiques) dans l'atmosphère.

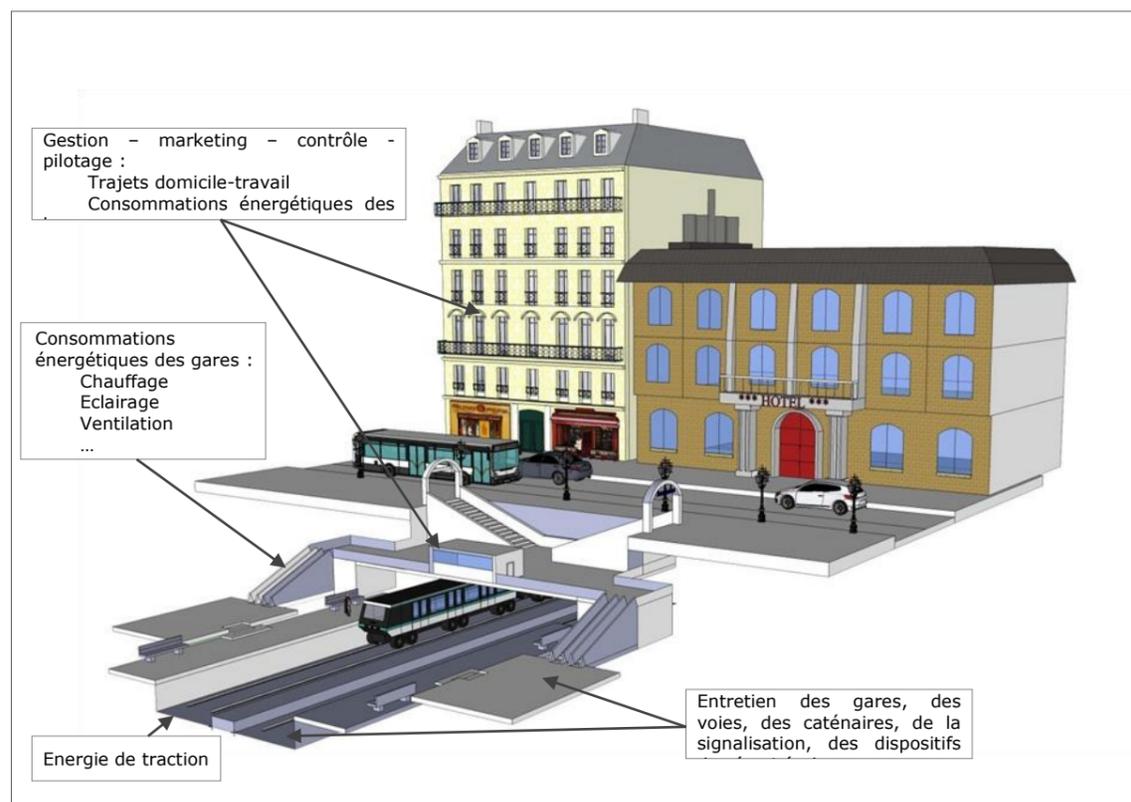


Figure 23 : Représentation des postes d'émissions induites par le fonctionnement du métro (Source : Stratec, 2011)

Facteurs d'influence

- le nombre de gares et de 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.

Chiffres clefs

- Energie de traction métro en Ile-de-France = 123 g éq.CO₂ / véh.km ou 4,1 g éq. CO₂ / voy.km³⁰

³⁰Predit, 2007, Calcul de facteurs d'émission des modes de transports en commun urbains

- Maintenance et amortissement du matériel roulant en IdF = 61 g éq. CO₂ / véh.km³¹
- Consommation énergétique (tous usages) de bureaux en métropole = 11,96 kg CO₂/an/m²³²

Leviers d'action

- Faire varier le nombre de gares, leur taille et leur efficacité énergétique ;
- Choisir une configuration technique du futur métro (vitesse commerciale, technologie de roulement, etc.) qui minimise l'énergie de traction nécessaire à son fonctionnement ;
- Prévoir une politique énergétique favorisant l'énergie à faible taux d'émissions.
- Construire des gares multifonctionnelles où peuvent être intégrées d'autres activités (commerces, bureaux, espaces culturels,...) afin de renforcer les synergies et de partager les coûts de fonctionnement.

1.3.2.4 Mobilité en Ile-de-France

De par sa nature, le projet du Réseau de transport public du Grand Paris vise à améliorer la mobilité en Ile-de-France et à induire un report modal de la route vers les transports en commun. Ce report modal devrait permettre une réduction de l'utilisation de la voiture particulière et donc des émissions qui en découlent. Une première approche de l'effet de la mise en service du réseau de transport public du Grand Paris a d'ailleurs montré que la mise en service de nouveaux tronçons va étendre les possibilités de liaison entre deux points, réduire les temps de parcours et réduire les coûts de transport entre certains points. Un report modal important de la voiture particulière vers le transport public (estimé de façon prudente par l'étude environnementale stratégique à 18 000 voyages à l'heure de pointe du matin³³) sera donc induit par le projet.

Composantes en jeu

L'impact du projet sur les émissions de GES relatives à la mobilité en Ile-de-France sera principalement constitué des composants suivants :

- Le report modal de la route vers les transports en commun devrait induire une diminution des kilomètres parcourus par les véhicules particuliers. Il y aura, par conséquent, une diminution des émissions liées à la consommation de carburant, à l'amortissement et à l'entretien des véhicules ;
- Le fonctionnement du nouveau métro va, en contrepartie, induire des émissions de GES diverses qui ont déjà été détaillées dans la partie « fonctionnement du métro » ;
- Cependant, l'impact de la mise en service du réseau de transport public du Grand Paris sur les émissions du réseau de transports en commun ne se limitera pas au nouveau métro. En effet, la mise en service du métro induira une redistribution des voyageurs sur l'ensemble du réseau :
 - D'une part, l'amélioration de l'offre de transport en commun permettra à certaines personnes qui prennent actuellement leur voiture d'emprunter les transports en commun. Ces personnes utiliseront alors la nouvelle ligne de métro mais également les lignes de métro, tram ou bus en connexion avec cette ligne.
 - D'autre part, le métro permettra d'optimiser les trajectoires permettant de relier deux points entre eux. Par exemple, le nouveau métro devrait permettre de voyager d'une

³¹Predit, 2007, Calcul de facteurs d'émission des modes de transports en commun urbains

³²ADEME 2010, Guide des facteurs d'émissions V6.1

³³Evaluation Stratégique Environnementale du réseau de métro automatique du Grand Paris, rapport de phase 2, version 3, 2010

banlieue à une autre sans passer par le centre de Paris³⁴. La mise en service du nouveau métro induira donc, dans certains cas, une optimisation des trajectoires et, par conséquent, une réduction des distances parcourues et un déchargement de certaines lignes.

- Le réseau de transport public du Grand Paris dans son ensemble induira également de nombreux changements urbanistiques et de développement territorial. La structure urbaine étant intimement liée avec la mobilité des habitants, le réseau de transport public du Grand Paris induira aussi des effets indirects sur la mobilité et les émissions qui y sont liées. A titre d'exemples, la densification du bâti et l'augmentation de la mixité permettent de réduire les distances moyennes parcourues par les habitants. Ces notions complexes seront abordées en détails dans le chapitre sur le développement territorial.

Facteurs d'influence

- L'importance du report modal sera d'abord influencée par le tracé, le nombre de gares et leur localisation.
- De plus, le report modal sera largement influencé par le tarif appliqué pour l'utilisation des transports en commun ainsi que par les coûts liés à l'utilisation de la voiture particulière (prix des carburants, tarification de l'usage de la route, tarification des parkings, ...).
- Les émissions ne dépendent pas uniquement des distances parcourues. Elles sont également influencées par le type de véhicule (poids, aérodynamisme,...), son mode de carburation (essence, diesel), sa cylindrée et sa date de mise en circulation (pour tenir compte des normes d'émission). Les émissions sont aussi fonction de la vitesse du véhicule, de l'usage (charge) et des conditions de circulation (Figure 24).

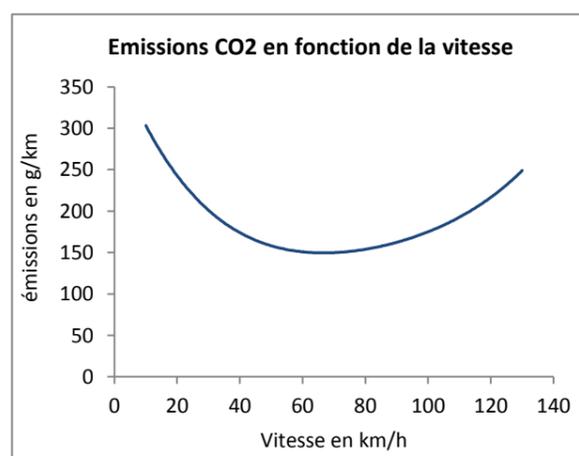


Figure 24 : Courbe des émissions de CO₂ en fonction de la vitesse pour un véhicule particulier moyen en 2007. Source : modifié de Sétra, 2009, Emissions routières de polluants atmosphériques, Courbes et facteurs d'influence.

Chiffres clefs

La figure ci-dessous donne un aperçu des différences d'émissions de GES entre les modes de transport :

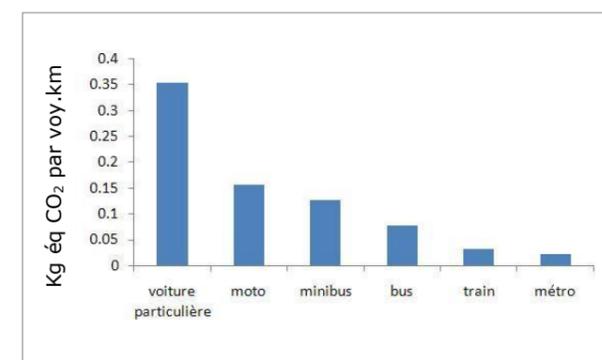


Figure 25 : Emissions moyennes en kg éq CO₂ induites par des déplacements en fonction du mode de transport (voit. Part. 1 personne en centre ville, moto >125cm³, minibus 4 personnes, bus avec en moyenne de 21 personnes, train). Données extraites du modèle Bilan Carbone® de l'ADEME

Remarque : La différence des émissions provenant des véhicules particuliers que l'on peut observer entre la Figure 24 (en moyenne entre 200 et 250 g CO₂/km) et la Figure 25 (350 g CO₂/km) s'explique par les objectifs différents des deux études. La première donne les émissions de CO₂ au pot d'échappement (émissions directes) tandis que la deuxième tient compte de l'ensemble des émissions de GES au pot d'échappement mais également tout au long de la chaîne de production et d'acheminement du carburant ainsi que de l'usure du véhicule. Cette différence souligne l'importance de la définition du périmètre de l'étude que nous étudierons plus en détails dans ce rapport (§ 1.4.1.1).

Leviers d'action

Les leviers d'action sont nombreux en termes d'émissions liées à la mobilité :

- Toutes les mesures qui permettent d'influencer les coûts d'utilisation des transports en commun et des véhicules particuliers : tarification de l'usage de la route, tarification des parkings, primes d'utilisation des transports en commun, ...
- Toutes les améliorations d'accessibilité des gares : parkings de dissuasion, zones « kiss and ride », location de vélos urbains (type vélib),...

1.3.2.5 Développement territorial

Pour accueillir les accroissements de population et d'emploi prévisibles à l'horizon 2035 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, comme nous l'avons vu (voir partie 1.2.3.2, page 17), 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 du sol (scénario « au fil de l'eau »), à un report naturel des besoins de nouvelles constructions vers les franges

³⁴ Source : Société du Grand Paris, 2011, www.societedugrandparis.fr

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. La désurbanisation 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.

L'Évaluation Stratégique Environnementale a permis de souligner que la mise en œuvre du réseau de transport public du Grand Paris (scénario « avec projet ») est une condition pour le succès d'un aménagement du territoire favorisant la densification de l'habitat et des activités autour des futures gares grâce, notamment, aux outils opérationnels que sont les Contrats de Développement Territorial ou encore à la mise en œuvre d'autres mesures d'accompagnement supplémentaires.

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 pour induire 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.

Les CDT en question

Les CDT seront définis conjointement par l'Etat et les collectivités publiques concernées après consultation de la région et du département ainsi que soumission à enquête publique. De plus, un contrat entre les collectivités territoriales et un tiers prestataire pourra détailler les conditions de mise en œuvre des opérations d'aménagement ou des projets d'infrastructures. Les CDT pourront définir, autour des gares et du périmètre de l'opération d'intérêt national du Plateau de Saclay :

- des objectifs, pour les communes, de développements quantitatifs et qualitatifs en matière de développement économique, d'aménagement urbain, de logement et de déplacements prenant en compte les objectifs du développement durable. Ils répondront notamment à l'objectif de construction annuelle de 70 000 logements géographiquement et socialement adaptés à l'Île-de-France (voir Figure 26) ;

- les opérations d'aménagement ou les projets d'infrastructures nécessaires à la réalisation de tels objectifs, ainsi que leurs conditions de mise en œuvre, leur financement, et l'échéancier prévisionnel de leur réalisation. Si ces opérations sont incompatibles avec les documents d'urbanisme en vigueur (SDRIF, SCoT, PLU, etc.), une révision de ces documents pourra être engagée afin d'assurer leur compatibilité avec la mise en œuvre du contrat.

- la création de Zones d'Aménagement Différé (ZAD) à l'intérieur desquelles une date de référence est fixée pour évaluer le prix du bien susceptible d'être préempté. Cela vise à permettre d'éviter la spéculation foncière à l'intérieur de cette zone.

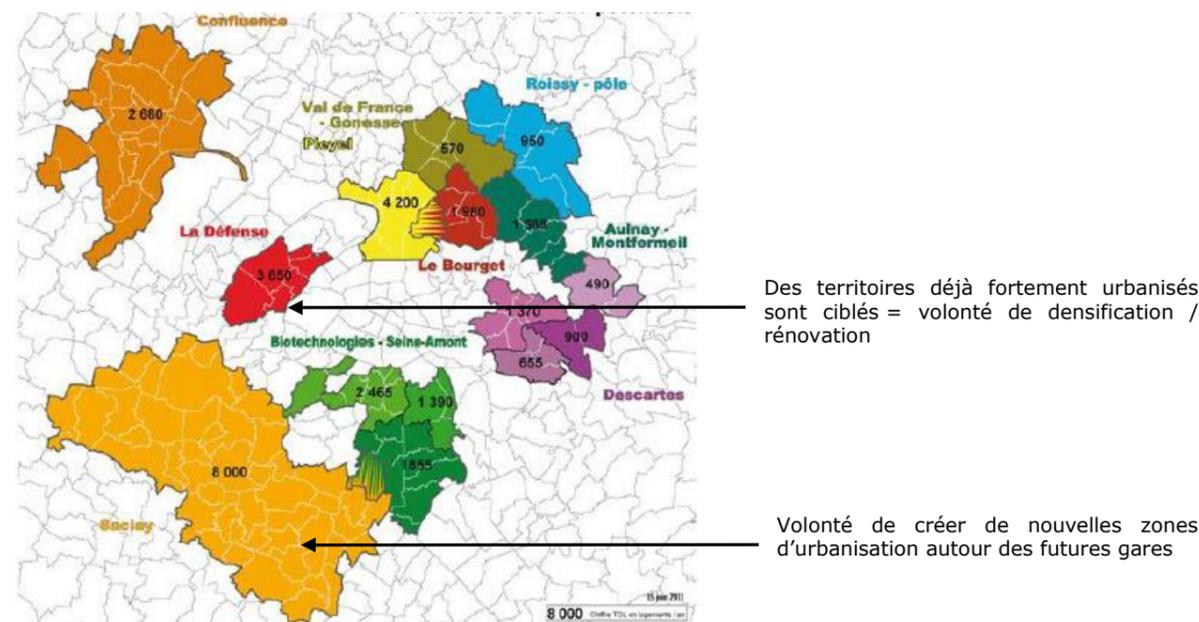


Figure 26 : Répartition des objectifs annuels de logements dans les périmètres potentiels de Contrats de développement territorial (Source : cadredeville.com, 17 juin 2011)

L'Évaluation Stratégique Environnementale a permis de souligner que la mise en œuvre du réseau de transport public du Grand Paris et des mesures d'accompagnement adaptées permettrait des gains d'émissions de CO₂ non négligeables qui se traduiraient sous les formes suivantes :

- au niveau de la **forme urbaine du bâti**, en lien avec la densification du résidentiel et du tertiaire qui induit des besoins, notamment, en infrastructures de desserte (VRD) ;
- au niveau des **performances énergétiques du bâtiment** : l'urbanisation liée au projet est l'occasion d'entraîner un mouvement important de rénovations et de démolitions/reconstructions. Ce renouvellement du parc bâti va donner lieu à des bâtiments énergétiquement plus performants. Nous verrons par la suite que ces gains compensent 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** : une stratégie d'aménagement incorporant densité et mixité urbaine autour de nouveaux nœuds d'une infrastructure TC d'envergure devrait encourager un raccourcissement des trajets terminaux et un report modal vers les transports en commun.

Dans les parties suivantes, les principaux éléments du travail bibliographique effectué sont repris. Ils permettent de décrire, de manière théorique et à l'échelle micro (bâtiment ou quartier), en quoi les impacts attendus du métro en termes d'aménagement du territoire peuvent être sources de réduction des émissions de CO₂ durant le cycle de vie des bâtiments (construction et exploitation).

La partie 1.3.2.5.1 (page 31) s'attarde tout d'abord sur les effets de la forme urbaine sur les émissions de CO₂ liées à la construction des bâtiments. Puis, les effets de la forme urbaine sur les émissions liées à l'exploitation des bâtiments sont traités dans la partie 1.3.2.5.2 (page 33). Enfin, la partie 1.3.2.5.3 (page 37) présente les effets de la forme urbaine sur les émissions de CO₂ liées aux déplacements des individus.

1.3.2.5.1 Les émissions de CO₂ liées à la construction des bâtiments, des voiries et des réseaux divers

Composantes en jeu

Les émissions de GES liées à la construction d'un bâtiment résidentiel ou tertiaire sont la somme :

- des émissions directes liées à la réalisation des **chantiers des bâtiments** et des émissions indirectes liées à la fabrication, l'acheminement et l'utilisation des différents matériaux constituant ces bâtiments (résidentiels ou tertiaires). Ce sous-poste a déjà été expliqué plus en détails dans la partie « construction de l'infrastructure ». Pour rappel, les émissions induites sont fonction, en particulier :
 - de la distance entre le chantier et les sites de production et de conditionnement des matériaux qui influence les coûts carbone liés à l'acheminement des matières premières du bâtiment ;
 - du volume de matériaux utilisés pour construire le bâtiment ;
 - de la nature des matériaux utilisés.
- des émissions liées aux travaux **de viabilisation**. Ceux-ci représentent les investissements initiaux d'extensions des voiries et réseaux divers (eaux usées, électricité, téléphone, etc.) nécessaires à l'extension des zones d'habitat et d'activité engendrée par une nouvelle construction. Les émissions de GES créées par ces coûts de viabilisation sont fonction :
 - de la longueur des infrastructures à construire ;
 - des techniques de construction mises en œuvre pour raccorder le nouveau bâti au réseau existant qui impliquent des durées de chantier et des engins sensiblement différents.
- des variations du stock de carbone contenu dans les terrains dues au **changement d'utilisation de ces terrains** lors de l'implantation d'une nouvelle construction. Ce point a également été traité plus en détails dans la partie « construction de l'infrastructure ».

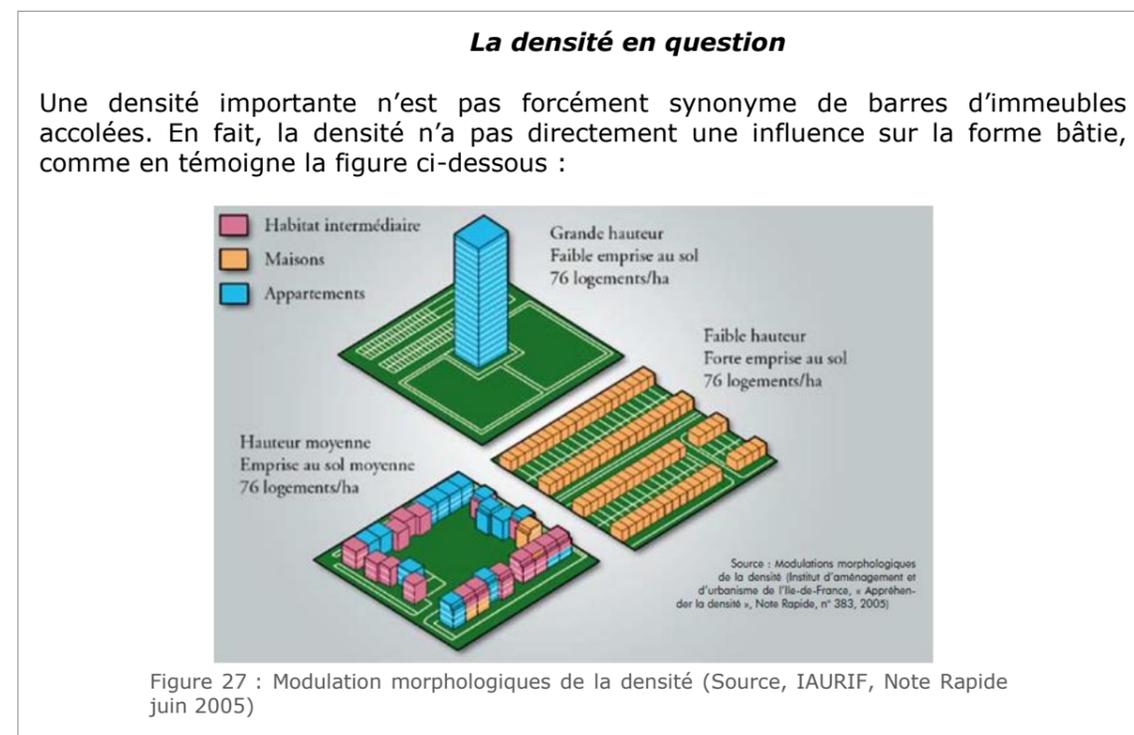
Facteurs d'influence

Les émissions de GES du poste « coûts liés à la construction » varient en particulier selon les paramètres architecturaux et urbanistiques suivants :

- La **typologie** du bâtiment (maison individuelle, immeuble collectif, bureaux, etc.) qui influence :
 - d'une part, les besoins en surfaces. En effet, en moyenne, un habitant a besoin d'une surface habitable (30 m² SHON/hab) plus importante qu'un employé de bureau (20 m²SHON/employé³⁵) et un habitant d'un immeuble collectif est généralement plus économe en surfaces (28 m² SHON/hab) qu'une personne vivant dans une maison individuelle (40m² SHON/hab)³⁶.
 - d'autre part, les niveaux d'isolation de l'enveloppe du bâtiment (W/m²/K) à respecter, qui diffèrent selon sa nature. Le choix et le volume des matériaux à mettre en œuvre (et les émissions de CO₂ induites) seront fonction de ce critère.

³⁵ Source : Etude d'évaluation socio-économique dans le cadre de la préparation du débat public sur le Grand Paris, Mission 3 : mise en œuvre de la méthodologie élargie d'évaluation socio-économique, Société du Grand Paris, Direction Régionale de l'Équipement de l'Ile-de-France, SETEC/STRATEC, novembre 2010
³⁶ Source : Contraintes énergétiques et mutations urbaines. Cahier de l'IAURIF n°147, IAURIF, 2008

- La **période de construction du bâtiment** indique les objectifs de performances d'isolation de l'enveloppe à atteindre en fonction de la Réglementation Thermique applicable à l'époque de sa construction (RT2000, RT2005, etc.). Elle conditionne donc la nature et le volume de matériaux à mettre en œuvre afin d'atteindre (a minima) les objectifs fixés.
- La **localisation du bâtiment** définit la qualité de l'accessibilité transports en commun/véhicules particuliers de la zone où se situe le bâtiment. Cet indicateur d'accessibilité a une influence sur le prix du foncier³⁷ et conditionne indirectement la superficie de planchers des logements et des bureaux qui s'y implantent.
- La **densité** de la zone d'implantation du bâtiment influence la longueur des infrastructures et des raccordements éventuels à construire par habitant. Elle influence également la longueur des déplacements pour l'acheminement des matériaux de construction.



- Le **taux de mitoyenneté** et le **pourcentage d'immeubles collectifs** dans le quartier influencent à la fois la longueur des infrastructures annexes à mettre en œuvre et la **compacité** des bâtiments qui s'y trouvent. La compacité du bâtiment permet de limiter la quantité de matériaux à mettre en œuvre pour construire son enveloppe.

³⁷ Source : travaux conduits par V. Fouchier sur la densité en Ile-de-France. Voir notamment : Les densités urbaines et le développement durable. Le cas de l'Ile-de-France et des villes nouvelles, V.FOUCHIER, 1997

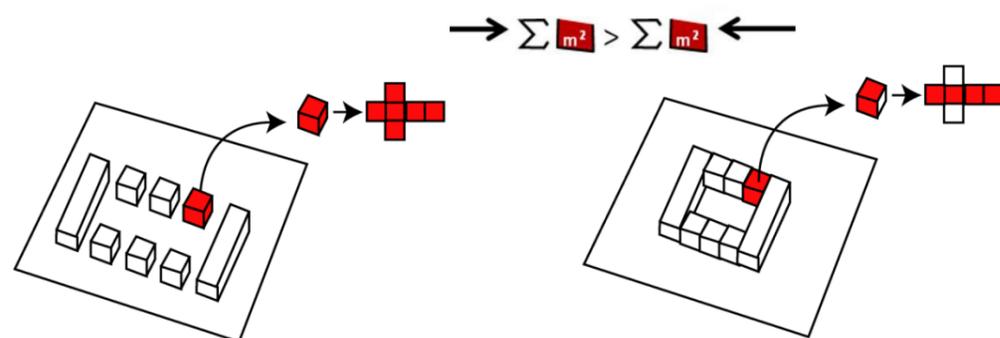


Figure 28 : représentation conceptuelle de l'influence du taux de mitoyenneté sur la surface de l'enveloppe : à surface de plancher égale, un bâtiment mitoyen ou semi-mitoyen nécessite une surface d'enveloppe (en rouge sur la figure) moindre (Source : Stratec, 2011)

De manière générale, chaque nouveau bâtiment, qu'il soit en zone urbaine dense ou diffuse, devra respecter les mêmes normes énergétiques (fixées par la loi), mais la construction d'un nouveau bâtiment en zone diffuse engendrera un coût carbone plus élevé puisqu'elle nécessitera davantage de matériaux et d'émissions de GES liées au transport de ces matériaux.

- Les **dimensions du parcellaire** (largeur à front de voirie, profondeur des parcelles) influencent la longueur des infrastructures à construire pour le raccordement aux réseaux. La faible densité des quartiers périurbains découle le plus souvent de la mise en place de maisons unifamiliales isolées sur de vastes parcelles. Par rapport à des immeubles mitoyens que l'on rencontre dans des zones plus denses, des surcoûts sont générés puisque, pour un nombre de logements déterminé, la distance moyenne élevée entre deux habitations nécessite une plus grande longueur de réseau nécessaire.

Chiffres clefs

- Le guide des facteurs d'émissions de l'ADEME³⁸, sur base de travaux du CNRS, permet de souligner la différence entre les émissions créées par la construction de bâtiments selon son affectation et selon deux types de matériaux utilisés :

| Type de bâtiment | kg équivalent carbone par m ² | |
|-----------------------|--|--|
| | Construction métallique (hangar...) | Construction béton (immeuble de bureaux) |
| Logements | 40 | 119 |
| Bâtiments agricoles | 60 | 179 |
| Bâtiments industriels | 75 | 225 |
| Garages | 60 | 179 |
| Commerces | 50 | 150 |
| Bureaux | 43 | 128 |
| Enseignement | 40 | 120 |
| Santé | 40 | 120 |
| Loisirs | 46 | 138 |

Tableau 1: kg équivalent carbone par m² de bâtiment construit selon l'affectation du bâtiment et les matériaux utilisés pour sa structure (Source : Guide des facteurs d'émissions, Bilan Carbone Entreprises et Collectivités, ADEME, janvier 2007)

- Une étude récente sur le sujet des coûts de viabilisation, menée par Jean-Marie HALLEUX et Jean-Marc LAMBOTTE en Wallonie³⁹, donne, à titre indicatif, une estimation chiffrée des coûts primaires moyens relatifs à l'équipement de différents types de parcelles :

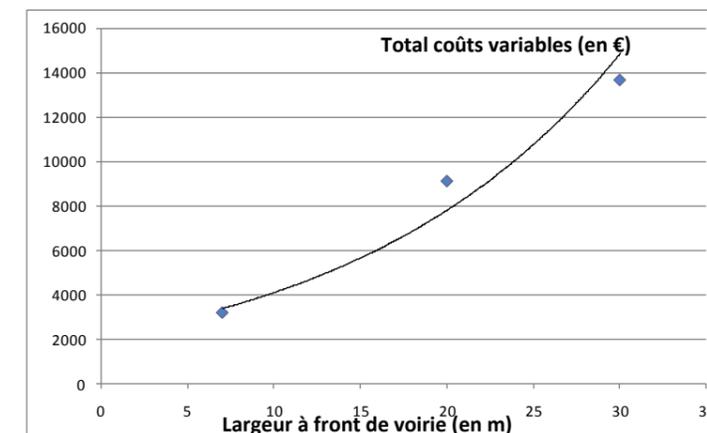


Figure 29 : Estimation du coût primaire moyen d'équipement de parcelles dans un lotissement avec création de voirie selon la largeur à front de voirie (Source : extrapolations Stratec (2010) sur base de l'étude : Halleux J.-M, Lambotte J.-M. et Bruck L., 2008, "Etalement urbain et services collectifs : les surcoûts d'infrastructures liés à l'eau", Revue d'Economie Régionale et Urbaine, n°1, pp.21-42, p.28)

Remarque : ces coûts sont spécifiques au contexte belge mais ils permettent toutefois de mesurer l'importance des variations de coûts selon les configurations géométriques des parcelles.

Exemple de ces variations : Entre un parcellaire de 7 mètres de largeur (a), correspondant à une urbanisation relativement compacte de maisons mitoyennes, et un parcellaire de 30 mètres en front voirie (b), semblable à celui que l'on retrouve dans une urbanisation de type périurbain, la différence de coûts de viabilisation s'élève à plus de 12 000 € en faveur d'un urbanisme compact. Ce surcoût, déjà mentionné dans l'Évaluation Stratégique Environnementale, s'exprime également en termes de variations d'émissions de GES pour la construction des infrastructures liées au bâti neuf.

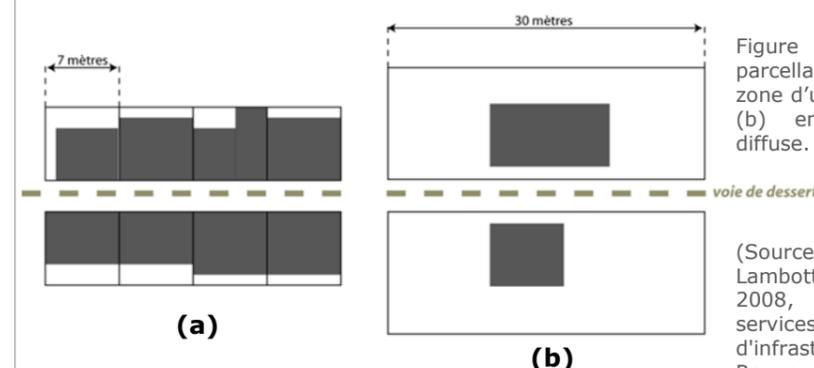


Figure 30 : Typologie de parcellaires rencontrés (a) en zone d'urbanisation compacte et (b) en zone d'urbanisation diffuse.

(Source : 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)

³⁸Source : Guide des facteurs d'émissions, Bilan Carbone Entreprises et Collectivités, ADEME, janvier 2007

³⁹Halleux 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

- Si l'on considère la proportion des émissions liées à la construction du bâti par rapport à l'ensemble des émissions sur toute sa durée de vie, le guide des facteurs d'émissions de l'ADEME souligne que celle-ci dépend fortement du type de construction :
 - lors d'une extension pour le cas d'un bâtiment **existant**, les émissions liées à la construction représentent environ **7 à 10%** (dont 5% imputable à la seule fabrication des matériaux) des émissions de fonctionnement sur sa durée de vie ;
 - pour les **bâtiments neufs**, la proportion des émissions liées à la construction par rapport aux émissions globales sur toute sa durée de vie est de l'ordre de **15%** ;
 - pour les **bâtiments visant de très hautes performances énergétiques**, cette proportion peut atteindre **20 à 25%** de la consommation énergétique sur sa durée de vie.

Ces fourchettes sont valables pour les différents bâtiments (résidentiel ou tertiaire).

Leviers

Contrairement à la construction du métro et des gares annexes qui sera fortement contrainte par des critères de desserte, topographiques ou encore techniques, la construction des logements et des bâtiments tertiaires prévue dans le projet bénéficie, elle, d'une marge de manœuvre plus importante quant à la localisation des nouveaux bâtiments et les techniques employées pour leur construction.

Les Contrats de Développement Territorial (CDT), dont l'élaboration est du ressort des parties prenantes du projet du Grand Paris, constituent des outils réglementaires permettant de profiter de cette marge de manœuvre et d'influencer, par le biais des contrats d'aménagement, les conditions de réalisation des constructions à l'échelle communale et supra-communale. En cela, les CDT constituent des outils permettant d'agir sur les leviers de réduction des émissions franciliennes de GES liées à la construction des bâtiments.

Ces leviers peuvent être :

- Limiter l'étalement urbain **en préservant le plus possible les espaces vierges de la construction nouvelle** et en définissant les périmètres d'urbanisation dans le tissu urbain existant ;
- Définir des **Coefficient d'Occupation du Sol (COS)** relativement élevés qui permettront d'atteindre des densités importantes pour les nouvelles constructions ;
- Définir des règles de construction favorisant des **taux de mitoyenneté importants**.
- Promouvoir des programmes de **construction d'immeubles collectifs** au détriment de constructions pavillonnaires ;

1.3.2.5.2 Les émissions de CO₂ liées à l'exploitation des bâtiments

Composantes en jeu

Les émissions de GES liées à l'exploitation d'un bâtiment résidentiel ou tertiaire sont la somme :

- des émissions liées à la **consommation énergétique du bâtiment** (kWh/an) qui dépend fortement de son usage ;
- des émissions liées au trafic routier **des services publics qui desservent le bâtiment** (ramassage des ordures, poste, etc.) (voir encadré page 35).

Concernant la consommation du bâtiment par usage...

Dans le secteur résidentiel, le chauffage représente à lui seul près de 70 % des consommations générées par les logements franciliens en énergie finale⁴⁰ (Cf. Figure 31). On assiste, ces dernières années, à une hausse plus lente des consommations de chauffage que l'augmentation des surfaces construites (hors aléas climatiques). Ceci est dû à l'isolation thermique et à l'amélioration des performances des équipements. Au contraire, les consommations d'énergies pour la cuisson et l'électricité spécifique⁴¹ augmentent toujours nettement. Cela s'explique notamment par l'engouement de la population pour l'installation de nouvelles technologies dans leur logement, (comme le multimédia) souvent très dépensières en énergie.

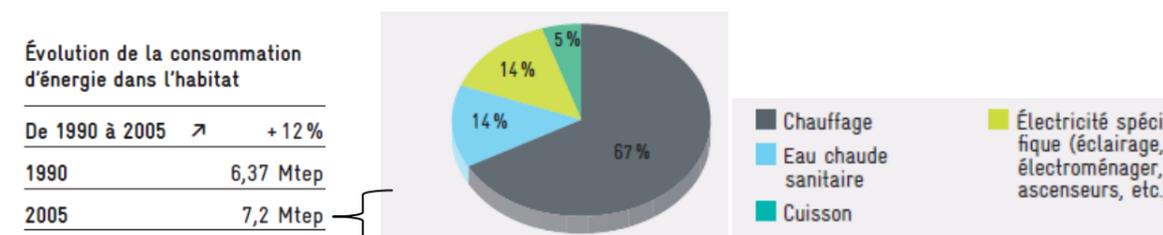


Figure 31 : Evolution 1990-2005 de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel et ventilation des consommations énergétique par usage dans l'habitat en 2005 (Source : ADEME, tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, édition 2010, janvier 2010)

Concernant le secteur tertiaire, sa consommation en énergie finale a crû de 18 % entre 1990 et 2005⁴². Cette évolution est toutefois à relativiser : l'ensemble des surfaces affectées au tertiaire a progressé de 20 % entre 1990 et 2005 : la consommation énergétique a donc crû moins vite que l'activité elle-même. Si on observe les détails par poste de consommation, c'est le chauffage des locaux, en particulier dans l'enseignement et la santé, qui est le premier poste de consommation énergétique⁴³. Suivent les usages spécifiques de l'électricité (éclairage, etc.), surtout pour les bureaux et les commerces. Enfin, la climatisation représente une part croissante des consommations d'énergie en 2010.

Remarque : du point de vue énergétique, le secteur du tertiaire est globalement méconnu et souffre d'un déficit de suivi statistique pour évaluer les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre associées. Aujourd'hui, les données disponibles quant aux consommations des bâtiments sont disparates et souvent obtenues en ayant recours à la modélisation. Ceci est également vrai, dans une moindre mesure, pour le résidentiel.

Aujourd'hui, donc, la consommation énergétique liée au **chauffage constitue le principal gisement d'économie d'énergie à la fois pour le secteur résidentiel que tertiaire** pour les raisons suivantes :

- premièrement, le chauffage représente plus des deux tiers des consommations dans un logement ou dans un bâtiment tertiaire actuel ;
- deuxièmement, la part de marché des énergies fossiles dans la consommation de chauffage est encore majoritaire ;
- et, enfin, même si ce poste de consommation est relativement stable ces dernières années comparativement aux autres postes en constante hausse, c'est celui sur lequel il est le plus facile d'agir à l'échelle régionale. En effet, les besoins en chauffage sont fortement liés aux

⁴⁰ L'"énergie finale" est l'énergie mesurée au niveau du compteur de l'abonné. L'"énergie primaire" est l'énergie qui a été nécessaire pour créer l'énergie consommée. Le calcul de l'énergie primaire prend donc en compte les rendements des centrales productrices et les pertes liées au transport notamment.

⁴¹ L'électricité nécessaire pour les services qui ne peuvent être rendus que par l'usage de l'énergie électrique (or eau chaude, chauffage et cuisson).

⁴² Source : ADEME, tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, 2010

⁴³ Source : ADEME, tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, 2010

caractéristiques, notamment géométriques, du bâti et au tissu urbain environnant : c'est ce que nous verrons par la suite.

L'évolution récente des contributions des autres postes de consommation laisse à penser que ceux-ci (notamment l'électricité spécifique ou la climatisation) représenteront, d'ici quelques années, des segments importants de la consommation énergétique francilienne (même si des normes énergétiques se mettent en place au fur et à mesure sur la consommation de certains équipements). Ces postes ne sont cependant pas à corrélés à des variables d'aménagement du territoire mais bien à des variables liées au comportement des individus (aspects socio-économiques) et aux politiques d'incitation mises en place pour influencer ces comportements. C'est pourquoi, dans la suite du rapport, seul le chauffage est retenu comme poste de consommation énergétique.

Si l'on considère donc uniquement le poste « chauffage »...

Les émissions de GES liées à l'exploitation d'un bâtiment résidentiel ou tertiaire sont la somme :

- des émissions directes liées à la **consommation de chauffage du bâtiment** qui résultent de la balance entre :
 - les besoins liés à l'utilisation du bâtiment ;
 - les pertes énergétiques dues aux déperditions du bâtiment, soit par l'enveloppe du bâti (par conduction ou rayonnement), soit par le phénomène de ventilation (renouvellement d'air) ;
 - les apports internes du bâtiment, c'est-à-dire les apports de chaleur créés par ses occupants et le matériel qu'ils utilisent ;
 - les apports externes du bâtiment, c'est-à-dire les rayonnements solaires s'infiltrant par les ouvertures et qui réchauffent le bâti. Ces apports externes peuvent également permettre d'utiliser l'énergie renouvelable qu'est le soleil pour produire de l'électricité (panneaux photovoltaïques) ou de l'eau chaude sanitaire (panneaux solaires thermiques).

Les émissions de GES liées au chauffage du bâtiment vont varier selon cette consommation et selon l'énergie utilisée pour répondre au besoin de chauffage.

Facteurs d'influence

- **L'affectation du bâtiment** influence les apports internes et les besoins liés à son utilisation. En effet, la production de chaleur des occupants (dans le temps et en quantité) et l'utilisation des différents équipements dans le bâtiment sont différents selon l'activité qui s'y exerce. Dans les bureaux, par exemple, les apports internes sont dus majoritairement à l'utilisation des ordinateurs pendant les journées de travail. Dans les logements, les besoins en chauffage seront plus importants en soirée.
- Le **statut d'occupation du bâtiment** joue également sur les besoins liés à son utilisation. En effet, de nombreuses études révèlent que les comportements d'utilisation du chauffage diffèrent selon si les usagers sont propriétaires ou locataires de leur logement, bureaux, etc.
- La **période de construction du bâtiment**, en lien avec la réglementation thermique à laquelle le bâtiment est conforme, influence les pertes énergétiques dues aux déperditions du bâtiment. En effet, la réglementation thermique applicable à la date de construction du bâtiment conditionne la nature et l'inertie de ses surfaces déperditives (caractéristiques des

matériaux employés, épaisseur, etc.), c'est-à-dire de ses performances d'isolation et sa perméabilité à l'air.

- La **densité**, quant à elle, influence la faisabilité de mise en place de réseaux de chaleur collectif pour la production locale de chaleur urbaine en réseaux (exemple : géothermie sur la nappe du Dogger).
- Le **taux de mitoyenneté** et le **pourcentage d'immeubles collectifs** ont deux effets principaux :
 - Tout d'abord, ils influencent les pertes énergétiques dues aux déperditions du bâtiment. En effet, un fort taux de mitoyenneté et un pourcentage élevé d'immeubles collectifs permettent une diminution des surfaces déperditives des bâtiments : une réduction de la surface de l'enveloppe due à la compacité et une réduction du nombre de façades déperditives :
 - ✓ A l'« horizontal » : « ranger en bande deux ou trois habitations (ou bâtiments de bureaux) permet de réduire d'environ 10 à 15 % les déperditions par l'enveloppe »⁴⁴ (Cf. Figure 28, page 32)
 - ✓ En « vertical » : le gain énergétique sur les déperditions à travers les parois croît progressivement en fonction de la hauteur : « d'un rez-de-chaussée à un R+1 ou un R+2, le gain s'élève respectivement de 20 à 30 %. Au-delà de R+3, il se stabilise très rapidement à moins de 40 % »⁴⁵.
 - ✓ Au final : « Si l'on représente [...] les gains engendrés par une augmentation de la compacité globale du tissu en fonction du nombre d'étages et du nombre de mitoyennetés, on s'aperçoit qu'un aménagement de bâtis en bande de longueur assez réduite et de deux étages environ suffit pour minimiser les déperditions par les parois »⁴⁶.

L'exemple de Paris intra-muros

Paris intra-muros⁴⁷ consommait en 2005 19 % de l'énergie utilisée dans les logements franciliens. Pourtant, en 2005, ce département concentrait 24 % du nombre total de logements et 90 % des immeubles parisiens dataient d'avant 1975 et avaient, donc, potentiellement des façades peu performantes. Ce sont donc la petite taille des logements et leur mitoyenneté qui ont permis de réduire leurs déperditions thermique et de compenser ainsi les besoins en chauffage⁴⁸. En 2007, les parisiens consommaient en moyenne 10 000 kWh d'énergie finale par résidence principale pour leur chauffage, soit une valeur inférieure d'un tiers à la valeur nationale. Cet écart important souligne bien le fait qu'une forme urbaine dense, haute et compacte, comme celle qu'on peut observer à Paris, est énergétiquement très performante du point de vue des besoins du bâtiment en lui-même.

- Ensuite, ils ont une influence sur la quantité d'apports solaires reçus et le potentiel recours à l'énergie renouvelable qu'est le soleil. En effet, un fort taux de mitoyenneté et d'immeubles collectifs réduit les marges de manœuvre quant à l'orientation des bâtiments. Or, l'orientation a un rôle majeur sur la quantité d'énergie solaire reçue en

⁴⁴ Source : M. MAÏZA in Contraintes énergétiques et mutations urbaines. Cahier de l'IAURIF n°147, IAURIF, 2008

⁴⁵ Source : M. MAÏZA in Contraintes énergétiques et mutations urbaines. Cahier de l'IAURIF n°147, IAURIF, 2008

⁴⁶ Source : idem

⁴⁷ Source du paragraphe : Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes, Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR) pour les données 2007 et ADEME, 2010 pour les données 2005

⁴⁸ Source : ADEME, tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, 2010

façade (Cf.Figure 32). De plus, un fort taux de mitoyenneté et d'immeubles collectifs augmentent les effets d'obstruction (Cf.Figure 33).

Par contre, si on donne la priorité à l'utilisation de l'énergie solaire comme source majeure d'apport externe d'énergie, on structurera le bâti de façon à pouvoir utiliser les toits à 100%, c'est à dire minimiser les obstacles, et imposer par exemple un gabarit uniforme avec toitures plates. Cela pourrait permettre soit au niveau individuel, soit au niveau collectif d'établir des champs de panneaux solaires et/ou de panneaux photovoltaïques.

Il faut savoir que pour des constructions passives, il est possible de couvrir tous les besoins énergétiques (chauffage et autres) de bâtiments de 5 étages rien qu'avec l'énergie captée du soleil sur la surface des toits.

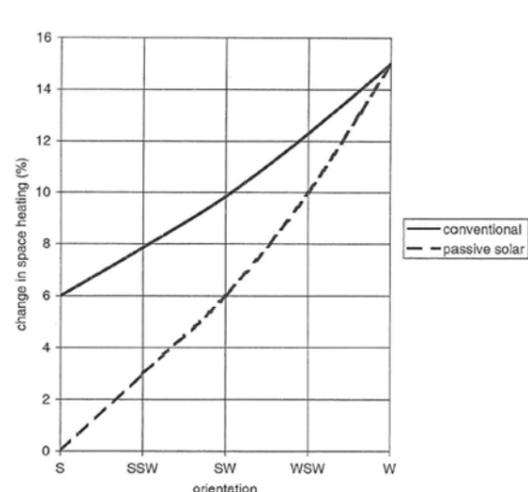


Figure 32 : Influence de l'orientation d'un logement sur ses besoins en chauffage (% de variation des besoins) (Source : Energy and the city : density, buildings and transport, K.STEEMERS, Cambridge, 2003)

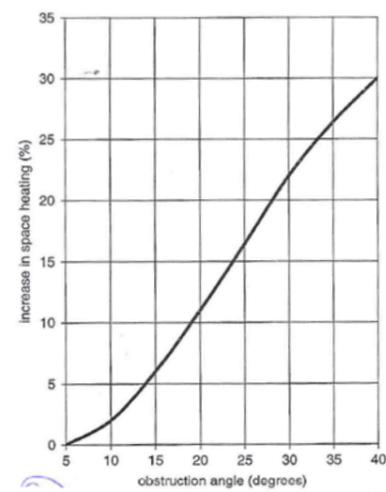


Figure 33 : Influence de l'obstruction (en °) sur les besoins en chauffage d'un logement (% d'augmentation des besoins)(Source : Energy and the city : density, buildings and transport, K.STEEMERS, Cambridge, 2003)

Pour simplifier

En milieu urbain, l'exploitation des apports externes est plus difficile du fait des obstructions et parce qu'il n'est pas toujours possible de privilégier les orientations optimales pour les bâtiments compte tenu du bâti environnant existant. Par contre, si l'exploitation des apports du soleil devient une priorité de l'urbanisme futur, l'énergie solaire pourrait jouer un rôle primordial dans la balance énergétique du nouveau bâti. Par ailleurs, la mitoyenneté, la compacité et la hauteur des bâtiments sont des variables urbaines avec lesquelles il est possible de minimiser les déperditions des enveloppes, permettant ainsi d'obtenir des bâtiments énergétiquement performants.

Emissions liées à la desserte des bâtiments par les services

Bien que moins importantes que les émissions de GES liées à la consommation des bâtiments, les émissions liées à la desserte des bâtiments par les services publics seront également influencées par le type de bâti.

En effet, le taux de mitoyenneté, le pourcentage d'immeubles collectifs et les dimensions du parcellaire (largeur à front de voirie et profondeur des parcelles) influencent les distances de déplacement nécessaires aux véhicules des services publics desservant les bâtiments (distribution du courrier, ramassage des poubelles, nettoyage,...).

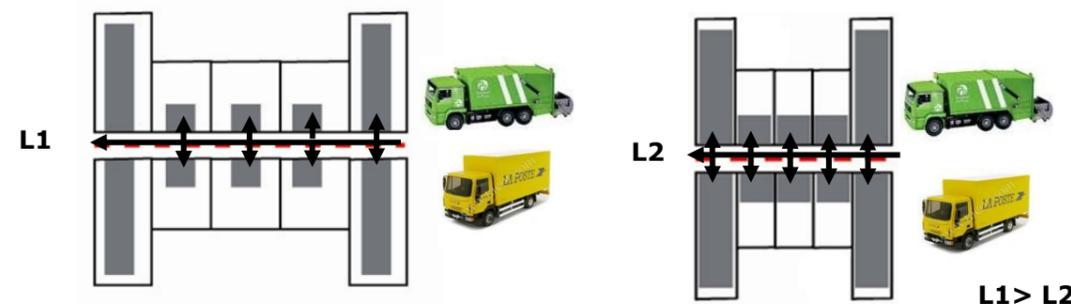


Figure 34 : Illustration de l'influence de la largeur des parcelles sur les distances de déplacement liées aux services publics (Source : Stratec, 2011)

Chiffres clefs

- Les maisons individuelles consomment relativement plus d'énergie pour le chauffage que les logements collectifs. En Ile-de-France, « elles affichent une moyenne de consommation conventionnelle liée au chauffage de 205 kWh/m²/an [...]. Les logements collectifs affichent des consommations de 150kWh/m²/an »⁴⁹. Cette variation est due, en grande partie, à l'influence de la mitoyenneté.

⁴⁹ Source : L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, 2010

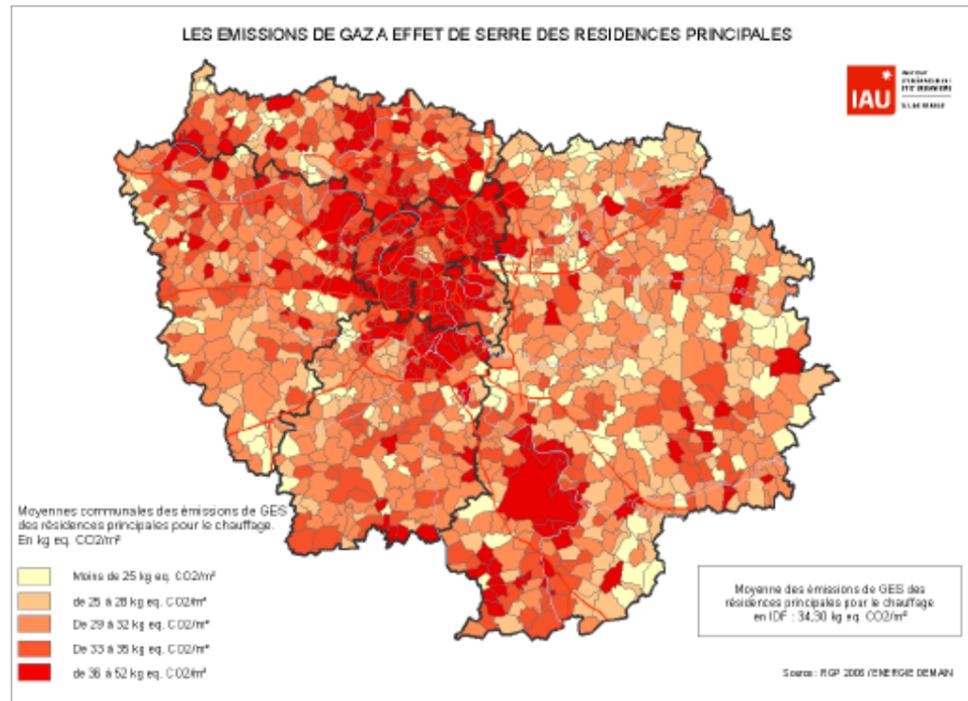


Figure 35 : Moyennes communales des émissions de GES des résidences principales pour le chauffage, en kg eq. CO₂/m² (Source : l'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, 2010)

Remarque : cette carte peut mettre en valeur des résultats contre-intuitifs mais il faut garder à l'esprit qu'elle donne des moyennes communales et, ce, en m². Pour avoir un meilleur aperçu de la réalité, il faudrait ramener ces émissions à l'habitant puisque, comme nous l'avons vu, la surface habitable varie sensiblement selon la couronne où se localise l'habitat.

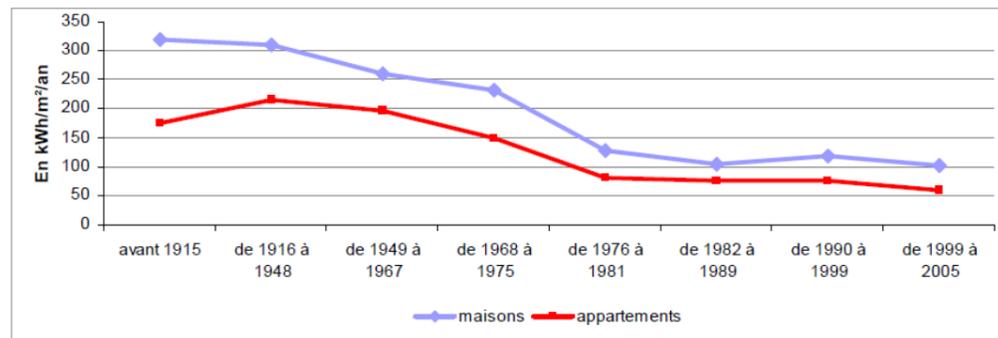


Figure 36 : La consommation conventionnelle des maisons et appartements, par tranche d'âge en kWh/m²/an (énergie finale pour le chauffage) (Source : ENERTER 2005 (Energie Demain)/INSEE in L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, 2010)

| Zone urbaine | Zone rurale | | |
|--------------|-------------|-----------|-----------|
| | 4 façades | 3 façades | 2 façades |
| 4 façades | -4,50 % | +3,40 % | +16 % |
| 3 façades | -14 % | -5,30 % | +8,4 % |
| 2 façades | -31,5 % | -21,5 % | -5,7 % |

Tableau 2 : Illustration de l'influence du taux de mitoyenneté sur la consommation du bâtiment : comparaison de consommation pour le gaz et l'électricité en zone rurale et en zone urbaine selon la mitoyenneté du bâtiment (nombre de façades) (Source : les coûts de la désurbanisation, Thème 7.1., Chapitre V, Approche environnementale des coûts de la désurbanisation, Ministère de la Région Wallonne, CPDT, Rapport final de la subvention 1999, 2004)

- **Ordre de grandeur :** il faut savoir qu'en moyenne les bâtiments tertiaires (tout usage confondu) consomment près de 220 kWh/m²/an de plus que les logements⁵⁰, soit près du double. Toutefois, il faut garder à l'esprit que le parc tertiaire est très hétérogène en termes de performances énergétiques.
- Le secteur tertiaire, friand d'électricité :

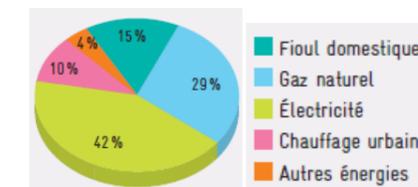


Figure 37 : Part des différents produits énergétiques dans la consommation tertiaire en 2005 (Source : ADEME, tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, édition 2010, janvier 2010)

- Le gaz naturel est la première source d'énergie utilisée dans l'habitat. Il tend de plus en plus à se substituer au fioul et au bois pour le chauffage. Cependant, l'électricité est encore largement plébiscitée, notamment dans le logement neuf. Enfin, le chauffage urbain représente une part non négligeable. En particulier, les logements sociaux franciliens (1 logement sur 4) sont à 70% équipés de système de chauffage central collectif.

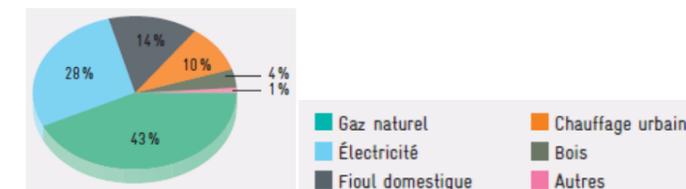


Figure 38 : Part des différents produits énergétiques dans la consommation de l'habitat en 2005 (Source : ADEME, tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, édition 2010, janvier 2010)

⁵⁰ Contraintes énergétiques et mutations urbaines. Cahier de l'IAURIF n°147, IAURIF, 2008

Leviers

Il existe ainsi, comme pour le poste « construction des bâtiments », de nombreux leviers permettant d'influencer les émissions de GES liées à « l'exploitation des bâtiments ». Ce sont, en fait, deux principales familles de leviers qui ressortent :

- Premièrement, des leviers agissant sur les formes urbaines, architecturales et techniques du bâti en phase construction et qui permettent d'obtenir des bénéfices énergétiques sur le court ou le moyen terme ;
- Deuxièmement, des leviers d'ordre socio-économique permettant d'influencer les comportements individuels.

Les CDT étant les instruments du projet du Grand Paris destinés à la mise en place de mesures d'aménagement du territoire, de mesures incitatives réglementaires, ou fiscales, ils constituent là encore les outils permettant d'agir sur ces deux types de leviers.

Concernant la première famille de leviers, les CDT pourraient :

- Limiter l'étalement urbain **en préservant le plus possible les espaces vierges de la construction nouvelle** et en définissant les périmètres d'urbanisation dans le tissu urbain existant ;
- Définir des **Coefficient d'Occupation du Sol (COS)** relativement élevés qui permettront d'atteindre des densités importantes pour les nouvelles constructions ;
- Promouvoir des programmes de **construction d'immeubles collectifs** au détriment de maisons individuelles ;
- Définir des règles de construction favorisant des **taux de mitoyenneté importants**.
- Définir des **objectifs de performance énergétique à atteindre pour les futurs programmes de construction/rénovation allant au-delà des exigences réglementaires en vigueur**, par exemple en promouvant la certification environnementale des nouveaux bâtiments. Cela permet ainsi de favoriser des isolations plus performantes et des besoins en chauffage moindre, mais également de promouvoir le recours à l'utilisation des énergies renouvelables dans les bâtiments.
- Inciter à l'augmentation des programmes de démolitions/reconstruction et de constructions pour augmenter le **taux de renouvellement du parc bâti** (voir encadré page 37).
- Promouvoir une forme de nouveau bâti qui permette une exploitation optimale des apports solaires sur les toits.

Concernant la deuxième famille de leviers, les CDT pourraient :

- Inciter les communes à l'**instauration d'incitations financières** (primes, prêts à taux intéressants, etc.) afin d'encourager les particuliers à engager des travaux énergétiques dans les bâtiments.
- Inciter les communes à encourager l'**instauration d'un suivi des consommations énergétiques** des bâtiments et la **diffusion de l'information** aux particuliers.

Zoom : le levier « augmenter le taux de renouvellement du

Comme vu précédemment, l'accélération du renouvellement du parc a des effets tout au long du cycle de vie des bâtiments :

1. En phase construction, elle engendre des coûts carbone plus importants étant donné que la démolition/reconstruction ou la rénovation nécessitent des techniques et des matériaux plus dépensiers en énergie.
2. Durant l'exploitation du bâtiment, elle permet une réduction des consommations puisque le bâtiment a une isolation plus performante du fait du caractère évolutif de la réglementation thermique. Cette réduction des consommations (et des émissions de GES associées) permet, au bout de quelques années (en moyenne : 10 ans) de compenser les coûts initiaux injectés. Passé cette durée d'amortissement, l'action de renouvellement du parc permet d'engendrer des bénéfices énergétiques année après année.

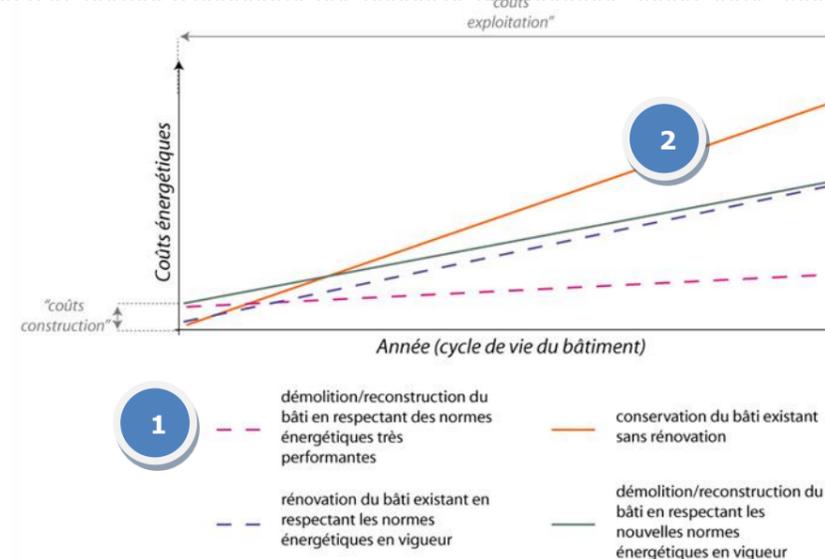


Figure 39 : Exemple de l'analyse du coût carbone lié au bâti dans le temps en fonction du mode de construction (conservation de l'existant, rénovation, démolition/reconstruction, construction) (Source : Examining the carbon agenda via the 40% House scenario, B. Boardman, University of Oxford, 2011)

Remarque : les gains énergétiques cumulés sont d'autant plus importants que le bâtiment respecte des normes énergétiques ambitieuses.

1.3.2.5.3 Les émissions de CO₂ liées à la mobilité des individus

Composantes en jeu

Les émissions de GES liées à la mobilité des individus sont fonction :

- de la fréquence des déplacements et du nombre de trajets induits ;
- de la longueur de ces trajets entre l'origine et la destination ;
- du choix modal pour effectuer ces trajets ;
- des conditions de circulation sur les réseaux (vitesse, flux) ;

- des émissions kilométriques du mode de transport retenu pour effectuer le trajet.

Les parties suivantes permettent de souligner l'influence que les formes urbaines peuvent avoir sur ces trois premiers paramètres (et de manière indirecte sur le quatrième).

Facteurs d'influence

- La densité autour des gares est un incitant au report modal vers les transports en commun.

L'influence de la densité sur les comportements des individus a été portée au débat durant les années 1990, notamment par les travaux de Peter Newman et Jeffrey Kenworthy. La courbe de Newman et Kenworthy (Cf. Figure 40) montre un lien entre la densité des agglomérations et la consommation énergétique des habitants pour leurs déplacements. De manière simplifiée, cette courbe permet de distinguer trois groupes de villes :

- les villes nord-américaines et australiennes, caractérisées par de faibles densités urbaines et une consommation d'énergie très importante ;
- les villes européennes, dont la densité et la consommation d'énergie pour les transports privés sont moyennes ;
- et, enfin, les villes asiatiques, qui sont plus denses et les moins "énergivores" du point de vue du transport individuel.

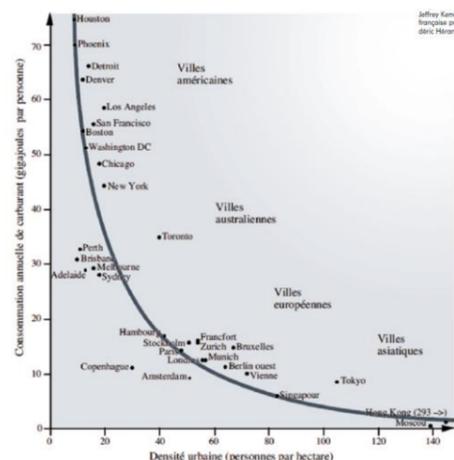


Figure 40 : Consommation annuelle de carburant par personne et densité urbaine dans différentes métropoles du monde (Source : Newman, Kenworthy, 1998)

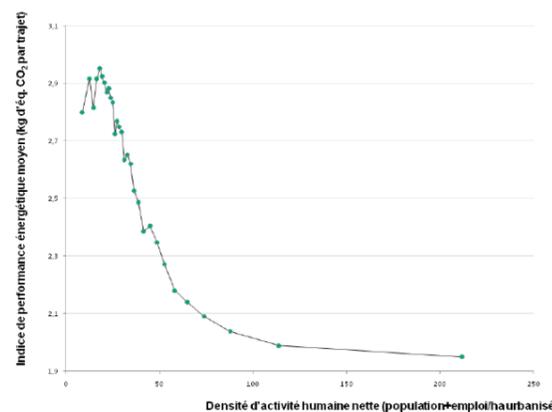


Figure 41 : Evolution des émissions de CO₂ liées aux déplacements domicile-travail par classe de densité (Source : Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des gaz à effets de serre, LEPUR, Université de Liège)

Même si cette étude a pu être remise en question du point de vue méthodologique, sa principale conclusion a pu être confirmée par de nombreuses études depuis (Cf. Figure 41) : **l'augmentation de la densité urbaine permet de réduire les consommations énergétiques liées au transport individuel.** Ce qui a été souligné depuis c'est qu'il existe une **valeur « seuil » de densité** au-delà de laquelle les émissions liées aux déplacements individuels ne diminuent plus (ou moins).

L'étude de Jean-Paul Hubert⁵¹ dans le contexte wallon constitue un autre exemple permettant de mieux comprendre en quoi la mobilité diffère selon les densités urbaines. Les deux conclusions principales de cette étude sont les suivantes :

- L'organisation de la mobilité ne diffère pas de manière significative entre une zone urbaine, périurbaine ou rurale : **le mode de vie des individus et leurs besoins en déplacements sont constants et l'organisation de la journée pour réaliser les activités est la même que l'habitat soit rural, périurbain ou urbain.**
- Ce qui diffère, par contre, c'est la manière dont cette mobilité se réalise. En effet, **« le degré d'urbanisation change les conditions de la mobilité individuelle et quotidienne en rendant tel ou tel mode de transport plus pratique ou plus économique »**, comme en témoigne le tableau ci-dessous :

| Indice relatif à la population * | km parcourus par mode | | | | | | | total de la mobilité | | |
|----------------------------------|-----------------------|------|-----|-----------|-------|------------------|--------------------|----------------------|-------|-----------------|
| | Marche | Vélo | Bus | Tram/méto | Train | Voiture passager | Voiture conducteur | km | Temps | nb déplacements |
| Campagne | 0.5 | 1.1 | 1.1 | 0.1 | 0.7 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.0 | 0.9 |
| Marge urbaine | 0.9 | 1.5 | 0.9 | 0.2 | 1.3 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Noyau urbain | 1.3 | 0.4 | 1.1 | 2.3 | 0.8 | 1.0 | 0.9 | 0.9 | 1.0 | 1.0 |

Tableau 3 : Part relative de la mobilité totale réalisée en Belgique par les ensembles territoriaux (Source : Jean-Paul HUBERT sur base des données Mobel 1999, 2004, Op. Cit.). * Un indicateur supérieur à 1 signifie que l'indicateur d'une classe d'habitants est supérieur à la moyenne sur l'ensemble du territoire d'étude, et inversement.

D'après le Tableau 3, on remarque que :

- dans les noyaux urbains, la forte densité (en moyenne : 4 000 hab/km² d'après la méthode utilisée par l'auteur) diminue d'environ un tiers les distances à parcourir : elle favorise alors l'utilisation des transports en commun et de la marche ;
- en zone rurale, l'utilisation de la voiture est prédominante. C'est pourquoi même si les ruraux parcourent plus de kilomètres en général, leur rapport budget-temps est égal aux résidents des deux autres ensembles territoriaux ;
- les habitants des zones périurbaines sont les principaux utilisateurs du train et du vélo.

Remarque : attention, il est important de souligner que ces indicateurs sont rapportés à la part de la population belge habitant dans chacune des zones⁵². Or, en Belgique, la morphologie urbaine est différente de celle de la zone du Grand Paris. La densité de population y est globalement plus faible, sauf peut-être le long de la dorsale wallonne qui structure la région d'Est en Ouest.

Les résultats des études précédentes ont permis de souligner l'influence du niveau d'offre en transport en commun (fréquence, confort, etc.) sur le choix modal des individus. Mais l'offre est directement liée à la demande, c'est-à-dire au nombre de passagers potentiels desservis par une ligne de transport en commun. Généralement, cette clientèle est constituée de la population (habitants, salariés, etc.) à distance de marche à pieds des stations, d'où l'importance de la densité urbaine à proximité des arrêts de transports en commun. Concrètement, en intensifiant

⁵¹Hubert J. P. (2004), *Mobilité urbaine, périurbaine, rurale en Belgique : où sont les différences?*, CST N°45/2004.

⁵²Part de la population belge : Campagne : 22% - Marge urbaine : 40% - Noyau urbain : 38% (Source : Jean-Paul Hubert sur base des données Mobel 1999, 2004, Op. Cit d'après l'enquête Mobel 1999)

les pôles de génération de déplacement à proximité des stations, on accentue le report modal vers les transports en commun.

Habiter ou travailler près d'une gare a donc un impact favorable sur l'usage des transports collectifs et conduit à une diminution des kilomètres parcourus en voiture, et ce, d'autant plus qu'on se situe en périphérie⁵³. Ainsi, le principe de densifier autour des gares, comme il est prévu dans le cadre du présent projet, est propice à l'augmentation de l'usage des transports collectifs et aura une influence sur les émissions de CO₂ des véhicules particuliers.

L'exemple de Paris intra-muros

A Paris intra-muros, le maillage de métro, de RER et de bus est très fin, de telle sorte que les parisiens ont généralement un ou plusieurs arrêts de transport en commun à distance de marche à pieds. Par conséquent, les accès à ces pôles se font généralement à pied, en vélo ou en bus. C'est pourquoi les émissions de CO₂ des parisiens liés à leur transport quotidien sont beaucoup plus faibles que la moyenne régionale et nationale.

Toutefois, si la densification a des effets significatifs sur le choix modal des habitants, elle ne suffit pas à elle seule à réduire limiter les déplacements individuels. Elle doit notamment être combinée à une **mixité des usages et des fonctions** qui influence les distances de déplacement.

La mixité fonctionnelle en question

La mixité des fonctions urbaines c'est, concrètement, rapprocher l'habitat de l'emploi, des commerces et/ou des services. Le LEPUR⁵⁴ a élaboré deux approches pour mesurer cette mixité :

1. Calculer, à une échelle globale, le rapport entre le nombre d'emplois et le nombre d'habitants. Plus ce rapport tend vers 0.5, plus la mixité fonctionnelle est importante.
2. Calculer, à l'échelle locale, un indicateur de « richesse relative » qui correspond à la variété de types d'usage du sol différents qu'on retrouve dans un rayon prédéfini. Plus celui-ci est élevé, plus la mixité fonctionnelle est importante.

La mixité des fonctions urbaines permet de réduire les distances de déplacement et de favoriser les déplacements de proximité. Cela favorise ainsi le report modal des usagers, et ce, d'autant plus qu'on privilégie la mixité aux abords des stations de transports en commun mais à condition, toutefois, que la mixité fonctionnelle soit bien pensée (exemple : rapprocher les emplois des catégories d'actifs correspondant au secteur d'activité). La mixité permet également d'assurer une exploitation optimale du réseau de transport en commun, dans la mesure où les demandes de mobilité de A vers B et de B vers A se compensent. Ce qui n'est pas le cas lorsque l'on ségrègue habitat, travail, loisir et commerce (problèmes des « retours à vide »).

L'étude menée par le LEPUR en Wallonie à ce sujet permet d'établir des liens de causalité, comme le montre la Figure 42 ci-après.

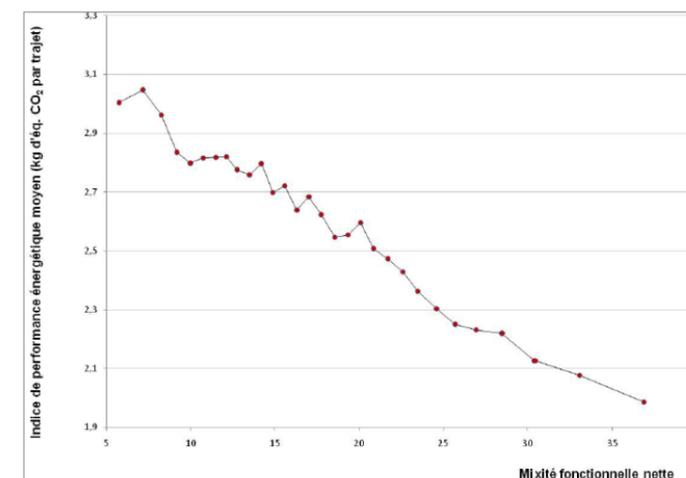


Figure 42 : Evolution des émissions de CO₂ liées aux déplacements domicile-travail par classe de mixité fonctionnelle nette (Source : Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des gaz à effets de serre, LEPUR, Université de Liège)

Remarque 1 : pour la mixité, contrairement à la densité, il n'y a pas d'effet de seuil observé.

Remarque 2 : peu d'études existent sur les déplacements individuels liés à d'autres motifs (domicile-école, domicile-commerces, etc.) que le travail mais il est généralement admis que la mixité a une influence moindre sur ces trajets, cette influence restant toutefois importante.

L'influence majeure des variables socio-économiques à ne pas oublier

Si, depuis plusieurs décennies, l'influence des formes urbaines sur la mobilité des individus a été démontrée, de nombreuses études ont également souligné la nécessité de prendre en compte les caractéristiques socio-économiques de la population dans l'étude des déplacements. STEAD⁵⁵, notamment, a effectué ce travail en intégrant une dimension supplémentaire à la relation traditionnelle occupation du sol – forme urbaine – mobilité : les variables socio-économiques. D'après les calculs de régression effectués sur des données d'enquête mobilité à l'échelle de la Grande-Bretagne, **les caractéristiques socio-économiques ont davantage d'influence sur les comportements de mobilité que les caractéristiques de l'occupation du sol** : les premières expliquent environ **50 %** des variations de distances parcourues par personne tandis que les dernières n'en expliquent qu'un tiers. Cette conclusion a d'ailleurs été validée par d'autres études sur ce sujet⁵⁶.

D'après STEAD, les variables socio-économiques clefs permettant d'expliquer les déplacements de manière significatives sont : le **taux de motorisation des ménages**, la **proportion d'actifs** et le **statut socioprofessionnel du chef de ménage**.

Même si les variables socio-économiques sont en parties liées à la forme urbaine (exemple : en général, le salaire moyen par ménage diffère selon la taille des villes), elles ne seront pas directement modifiées par la mise en œuvre du projet de transport public du Grand Paris. En tout cas, les variables socio-économiques ne constituent pas un levier pour les aménageurs du Grand Paris pour agir sur les émissions de CO₂ des déplacements des franciliens. Il faut cependant garder à l'esprit qu'elles ont une influence non négligeable sur les déplacements.

⁵³Habiter ou travailler près d'une gare de banlieue, quels effets sur les comportements de mobilité? D.NGUYEN-LUONG, J. COUREL, IAU Île-de-France, novembre 2007

⁵⁴ Source : Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des gaz à effets de serre, LEPUR, Université de Liège

⁵⁵ Relationships between land use, socioeconomic factors, and travel patterns in Britain, STEAD D., 2001

⁵⁶ Transport and reduced energy consumption: What role can urban planning play? HICKMAN R., BANISTER D., 2007 – Densities, urban form and travel behavior, GORDON I., 1997

Chiffres clefs

Une étude réalisée par V. Fouchier offre également un graphique synthétique de l'influence de la densité et de la mixité de l'emploi et de l'habitat sur les distances et les temps de déplacement en Ile-de-France :

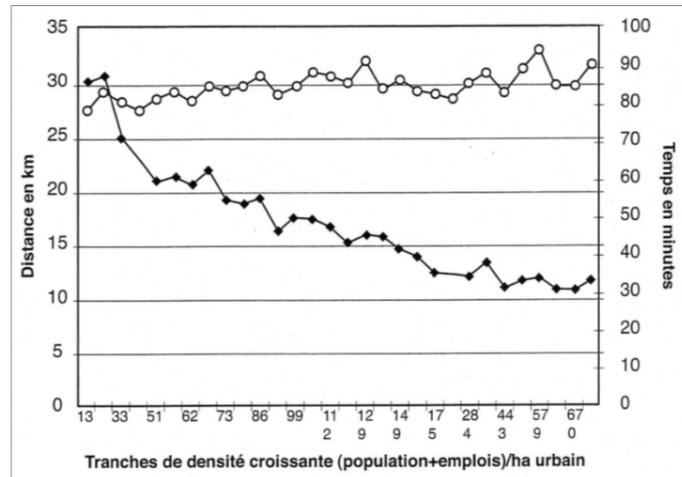


Figure 43 : Distance et temps de déplacement par individu et par jour selon la densité humaine nette de résidence, Ile-de-France (Sources : d'après EGT 1991 DREI et Densité Cité, Les densités urbaines et le développement durable. Le cas de l'Ile-de-France et des villes nouvelles, V. Fouchier, 1997)

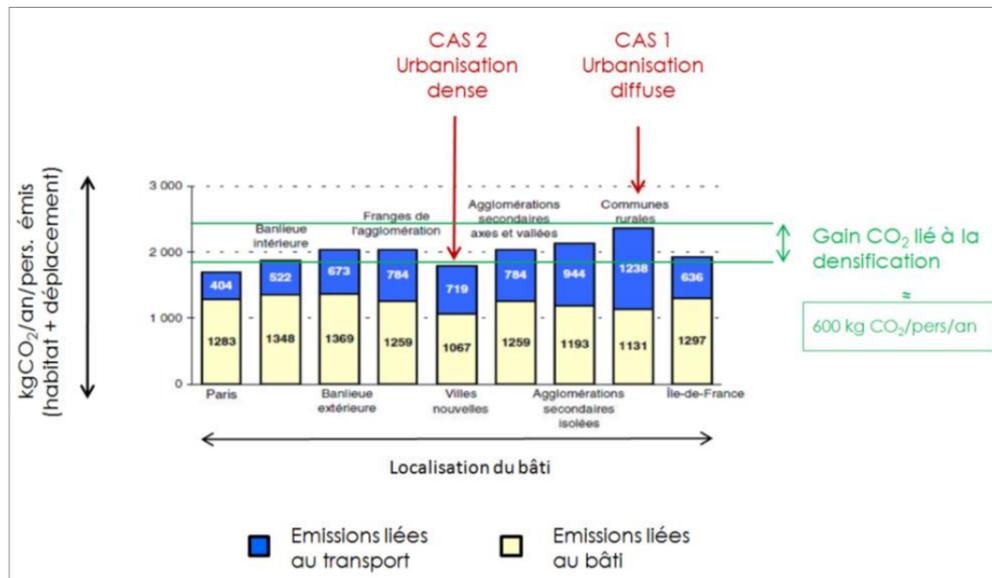


Figure 44 : Emissions de CO₂ par personne (en kg) dans la Région Ile-de-France en 1990 (Source : C.Plateau, « les émissions de gaz à effet de serre des ménages selon les localisations résidentielles », SESP/CEREN/INRETS, 2006 (chiffres de 1990))

Leviers

Les CDT constituent là encore les outils permettant d'agir sur les leviers influençant les émissions de GES dues aux déplacements des individus.

Concrètement, les CDT pourraient :

- Définir des Coefficient d'Occupation du Sol (COS) adaptés à l'accessibilité des zones en transport en commun ;
- Promouvoir une mixité fonctionnelle et urbaine adaptée à ce même indicateur d'accessibilité ;
- Définir l'affectation future des périmètres d'aménagement en fonction de l'accessibilité des terrains qui s'y situent.

Les conditions de définition de ces trois leviers pourraient s'inscrire dans une politique globale d'aménagement communal (ou supra-communal) visant la cohérence « urbanisme/transport ». L'encart ci-dessous présente quelques références en la matière sur lesquelles l'élaboration des CDT pourrait s'inspirer.

Quelques références en matière de cohérence urbanisme-transport

Le lien entre la dimension « occupation du sol – forme urbaine » et la dimension « mobilité » est avéré depuis les années 1980. C'est à cette époque que se sont développés différentes politiques novatrices de planification du territoire permettant de prendre en compte le système de transport. On peut citer notamment :

► La **théorie hollandaise « ABC »** qui vise l'adéquation entre l'accessibilité d'un terrain par les transports et le profil de mobilité des activités qui s'y installent. De manière théorique, un zonage du territoire peut se dessiner de la manière suivante :

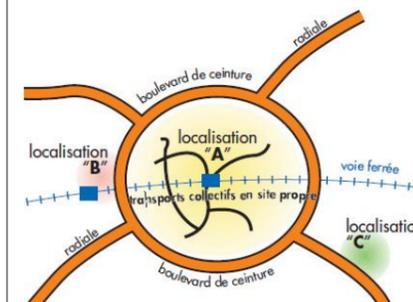


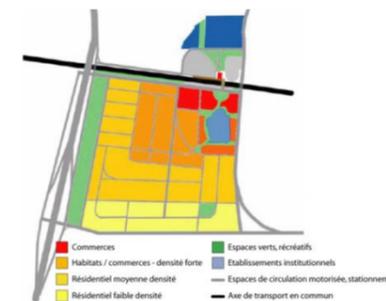
Figure 45 : Schéma de principe de la théorie « ABC » (Source : Cohérence urbanisme/transports, quelques "bonnes pratiques" de développement durable en Europe. Agence d'urbanisme de la région stéphanoise. Septembre 2004)

- en zone A, où la desserte TC est très bonne, sont implantées les entreprises à forte concentration d'emplois et/ou attirant de nombreux visiteurs et dont les activités ne dépendent pas de l'accessibilité routière.

- en zone B, localisation péri-centrale, sont implantées les activités accueillant moins de personnes et qui nécessitent d'être doublement desservies : par les transports collectifs et par la route.

- en zone C sont implantées les activités peu denses et dont le bon fonctionnement dépend du niveau de desserte routière.

► Le concept américain de « **transit-oriented development (TOD)** » mis en œuvre en Oregon dans les années 80.



Le TOD place notamment les arrêts et les stations de transport en commun au cœur de la vie du quartier. Autour se concentre une densité radiocentrique de mixité urbaine, sociale et fonctionnelle (Fig III.1.8-12). L'idée est de faire des gares urbaines et de leurs abords immédiats des lieux de commerces et de services au bénéfice des utilisateurs de transport en commun mais aussi des non voyageurs.

Figure 46 : La station TC au cœur de la vie de quartier, schémas de principe (Source : 1000 Friends of Oregon)

1.3.2.5.4 Synthèse des émissions de CO₂ liées au développement territorial

Les 3 postes d'émissions de gaz à effet identifiés comme importants :

- La **construction des bâtiments, des voiries et des réseaux divers** qui comporte comme sous-postes :
 - La fabrication, l'acheminement et l'utilisation des **matériaux** pour le chantier des bâtiments ;
 - Les **coûts de viabilisation** des zones urbanisées ;
 - Le **changement d'utilisation des terrains** lors de la construction des bâtiments ;
- **L'exploitation des bâtiments** qui comporte comme sous-postes :
 - La consommation de chauffage des bâtiments ;
 - Les déplacements des services publics qui les desservent ;
- La **mobilité des individus influencée par les formes urbaines**.

Les 10 leviers d'action à mettre en œuvre dans les CDT :

- Limiter l'étalement urbain **en préservant le plus possible les espaces vierges de la construction nouvelle** et en définissant les périmètres d'urbanisation dans le tissu urbain existant ;
- Définir des **Coefficient d'Occupation du Sol (COS) adaptés à l'accessibilité des zones** en transport en commun ;
- Promouvoir une **mixité fonctionnelle et urbaine adaptée à ce même indicateur d'accessibilité** ;
- Définir **l'affectation future des périmètres d'aménagement en fonction de l'accessibilité des terrains** qui s'y situent.
- Inciter à l'augmentation des programmes de démolitions/reconstruction et de constructions pour augmenter le **taux de renouvellement du parc bâti**.
- Définir des règles de construction favorisant des **taux de mitoyenneté importants**.
- Promouvoir des programmes de **construction d'immeubles collectifs** au détriment de maisons individuelles ;
- Définir des **objectifs de performance énergétique à atteindre pour les futurs programmes de construction/rénovation allant au-delà des exigences réglementaires en vigueur**, par exemple en promouvant la certification environnementale des nouveaux bâtiments.
- Inciter les communes à **l'instauration d'incitations financières** (primes, prêts à taux intéressants, etc.) afin d'encourager les particuliers à engager des travaux énergétiques dans les bâtiments
- Inciter les communes à encourager les promoteurs publics ou privés à **l'instauration d'un suivi des consommations énergétiques** des bâtiments et la **diffusion de l'information** aux particuliers.

1.4 Analyse des méthodologies existantes

Les préoccupations concernant le réchauffement climatique et l'implication des gaz à effet de serre remontent à plusieurs décennies mais ont été particulièrement amplifiées par les travaux du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC) et la signature du protocole de Kyoto. Depuis lors, sous la demande des gouvernements, de nombreuses recherches sur l'évaluation des émissions de GES ont été entreprises. Ces recherches ont permis d'identifier les flux de GES provenant de diverses activités et de développer des méthodologies de quantification des flux. Citons notamment la méthode bilan carbone[®] développée par l'Agence de l'Environnement (voir Fiche 1 page 153) et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), le « Greenhouse Gas Protocol » (ou GHG Protocol, voir Fiche 2 page 154) développé conjointement par la World Resources Institute et le World Business Council for Sustainable Development ou encore le « GHG Indicator » (voir Fiche 4 page 155) développé par le United Nations Environmental Programme (UNEP). Ces recherches constituent une base de données très importante sur laquelle le développement de l'approche méthodologique spécifique au projet de réseau du Grand Paris pourra s'appuyer. L'objet de cette partie est donc d'analyser les différents outils méthodologiques existants, tant en France qu'à l'étranger, en matière d'estimation des émissions de CO₂ liées à la réalisation d'une infrastructure et à ses effets induits.

1.4.1 Considérations générales

Il existe à ce jour un nombre relativement important de méthodologies de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle d'un site ou d'un projet. Toutes ces méthodologies n'offrent cependant pas les mêmes services et ne présentent pas un même niveau de facilité opérationnelle ou de transparence sur les règles adoptées. Il convient donc de distinguer plusieurs composants associés à ces méthodologies :

- **Le périmètre du bilan** : il définit les postes d'émissions/d'absorptions pris en compte dans l'exercice ;
- **La procédure de calcul** : elle définit la manière de prendre en compte ces postes d'émissions, en cohérence avec les objectifs généraux de la méthodologie ;
- **La base de données des facteurs d'émission** : elle fournit à l'utilisateur une liste des facteurs d'émissions qui permettent de passer d'une donnée d'activité à son équivalence en termes d'émissions de gaz à effet de serre.
- **L'outil de calcul** : il permet de mettre en relation les données d'activités à saisir avec les facteurs d'émission, d'effectuer le traitement selon les règles de calcul et d'afficher les résultats des bilans.

Toutes les méthodologies ne couvrent pas l'entièreté de ces composants (voir tableau). Par exemple, la norme ISO 14064 ne définit que le périmètre de l'étude et la procédure générale de calcul mais ne propose pas d'outil ou de liste des facteurs d'émissions. Au contraire, d'autres méthodologies comme la méthodologie GEMIS (voir Fiche 6 page 156) ne définit pas le périmètre de l'étude mais propose un outil opérationnel de calcul des émissions.

Tableau 4 : Analyse des composants des méthodologies étudiées.

| | Bilan Carbone® | GHG Protocol | Méthodologie AFD | GHG Indicator | Defra | Gémis | Climate Registry | ISO 14064 | Etude LGV | Oméga TP | GES SCOT | EnerTer | Base ICE (Univ. Bath) |
|---------------------|----------------|--------------|------------------|---------------|-------|-------|------------------|-----------|-----------|----------|----------|---------|-----------------------|
| Périmètre | X | X | X | X | X | | X | X | X | | X | X | |
| Procédure de calcul | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X | X | |
| Base de FE | X | X | X | X | X | X | X | | X | X | | | X |
| Outil de calcul | X | X | X | X | | X | X | | X | X | X | X | |

1.4.1.1 Périmètre du bilan

Il existe principalement deux approches de définition du périmètre du bilan des GES d'une activité : une première approche portée par le GHG protocole en cohérence avec la norme ISO 14064 et suivie par le GHG Indicator (voir Fiche 4 page 155), la méthode Defra (voir Fiche 5 page 155) et la méthode du Climate Registry (voir Fiche 7 page 156) et une deuxième approche principalement supportée par le Bilan Carbone® et suivie par la plupart des méthodologies qui en dérivent : méthodologie AFD (voir Fiche 3 page 154), l'étude LGV Rhin Rhône, Oméga TP (voir Fiche 13 page 159), ...

▪ Division du périmètre selon le GHG Protocol (voir Fiche 2 page 154)

L'approche du GHG Protocol définit 3 « champs » d'étude différents. Le **champ 1** traite des émissions directement issues des biens dont la structure est propriétaire ou qu'elle contrôle. Le **champ 2** traite des émissions liées à la production de l'électricité, chaleur, froid... consommée par les biens dont la structure est propriétaire ou qu'elle contrôle (la perte en ligne n'en fait pas partie puisque non consommée par la structure). Le **champ 3** traite de l'ensemble des émissions induites par le fonctionnement de la structure sans notion de contrôle ou de responsabilité. Il est nécessaire d'étudier les champs 1 et 2 pour être conforme à la méthode, le champ 3 étant optionnel.

▪ Division du périmètre selon le Bilan Carbone® (voir Fiche 1 page 153)

L'approche de la méthodologie Bilan Carbone® repose sur une approche plus globale dont l'un des points fondamentaux est d'inclure :

- les émissions de GES qui prennent directement place au sein de l'entité
- et les émissions qui prennent place à l'extérieur de cette entité mais qui sont la contrepartie du processus nécessaire à l'existence de l'activité ou de l'organisation.

Il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des émissions directes et indirectes selon une logique de dépendance et donc d'évaluer non seulement les émissions dont l'activité est « responsable » mais aussi des émissions que l'activité « nécessite » ou « induit » sans en être directement l'auteur.

Cet ensemble correspond au « **périmètre global** ». Il est ensuite possible de réaliser des extractions hors de ce périmètre global afin d'évaluer la proportion des émissions provenant de périmètres plus restreint : « **périmètre interne** » (l'ensemble des émissions qui ont lieu physiquement sur le site considéré) ou un « **périmètre intermédiaire** » (le périmètre interne, plus l'approvisionnement énergétique, y compris pertes liées à l'approvisionnement énergétique, les déplacements de personnes, la gestion des déchets, le fret interne et aval à

la structure). La méthode propose également des extractions supplémentaires en cohérence avec l'ISO 14064.

| GHG Protocol | | Champ 1 : Emissions directes | Champ 2 : approvisionnement énergétique | Champ 3 : biens non possédés / non contrôlés |
|----------------|---------------|--|---|--|
| Bilan Carbone® | | | | |
| Global | Interne : | * Emissions directes des combustibles sur site, * Fuites de climatisation et émissions des procédés. | | |
| | Intermédiaire | * Emissions directes des véhicules possédés ou contrôlés pour les déplacements domicile-travail, professionnels et fret interne et aval. | * Production hors site de l'électricité, chaleur, froid... consommée sur site et par les véhicules possédés ou contrôlés pour les déplacements domicile-travail, professionnels et fret interne et aval.. | * Perte en ligne relative à l'électricité consommée, * Emissions indirectes des combustibles consommés (extraction, transport, raffinage), * Emissions directes et indirectes des autres véhicules pour déplacements domicile-travail, professionnels et fret interne et aval, * Gestion hors site des déchets. |
| | | * Emissions directes des véhicules possédés ou contrôlés pour le fret amont. | | * Fabrication des biens approvisionnés * Emissions directes et indirectes des autres véhicules pour le fret amont. * Emissions directes et indirectes des déplacements des visiteurs/usagers. * Amortissement des biens utilisés (bâtiments, mobilier, informatique) * Utilisation et fin de vie des biens produits (si réalisé en dehors de la structure) |

Tableau 5 : Comparaison entre les périmètres des bilans selon la méthodologie GHG Protocol et Bilan Carbone®

▪ L'obligation réglementaire

L'obligation de réaliser un bilan d'émission de GES, arrivée récemment (juillet 2011) dans le droit français, reprend les champs de l'ISO 14064 en limitant les champs 1 et 2 aux biens dont la structure est propriétaire : la différence porte donc sur les biens en leasing ou mis à disposition par d'autres structures.

▪ Les GES pris en compte

Les gaz pris en compte dans les bilans d'émissions de GES sont généralement ceux définis dans le protocole de Kyoto (réf), c'est-à-dire :

| | |
|--|---|
| Le dioxyde de carbone (CO ₂) | Les hydrofluorocarbones (C _n H _m F _p) |
| Le méthane (CH ₄) | Les hydrocarbures perfluorés (C _n F _{2n+2}) |
| L'oxyde nitreux (N ₂ O) | L'hexafluorure de soufre (SF ₆) |

C'est l'approche préconisée par le GHG Protocol, avec la liberté de prendre en compte d'autres gaz dans un document annexe.

Le Bilan Carbone® s'efforce quant à lui de coller au maximum avec la réalité physique et préconise de prendre en compte les émissions de GES dès lors que le niveau des connaissances scientifiques le permet. Ainsi, en plus des GES repris dans le protocole de Kyoto, sont repris les gaz de l'accord de Montréal⁵⁷, et la vapeur d'eau stratosphérique, les C.O.V., les NOx...

La vapeur d'eau atmosphérique qui réalise pourtant une part très importante de l'effet de serre global n'est généralement pas prise en compte car sa concentration dans l'atmosphère n'est pas en lien direct avec les émissions anthropiques (l'équilibre entre la concentration en vapeur d'eau et les précipitations empêche l'accumulation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère). La concentration en vapeur d'eau dans la stratosphère est, par contre, influencée par le passage des avions et est donc prise en compte dans le Bilan Carbone®.

⁵⁷ Famille des Chloro-Fluoro-Carbures : CFC et Halo-Chloro-Fluoro-Carbures : HCFC

En résumé, on observe des convergences entre les méthodes :

- Le champ 3 du GHG Protocol/ISO 14064 porte sur les mêmes postes que le périmètre global du Bilan Carbone[®], la différence réside dans les familles de gaz prises en compte.
- Le champ 1 du GHG Protocol/ISO 14064 correspond au périmètre interne du Bilan Carbone[®] quant aux postes pris en compte si on assimile les moyens possédés ou contrôlés au site d'étude. Une différence restant cependant dans les familles de gaz pris en compte.

$$\text{Données de l'activité} \times \text{Facteur d'émissions} = \text{Emissions de GES}$$

La plupart des méthodologies proposent aux personnes qui réalisent les bilans des émissions de GES des outils pratiques de calcul qui contiennent des facteurs d'émissions prédéfinis (Bilan Carbone[®], GHG Indicator, Defra, GEMIS,...). Ces facteurs d'émissions peuvent cependant être modifiés par l'utilisateur si des valeurs plus adéquates sont disponibles.

Collecte des données :

Les données collectées doivent permettre de quantifier tous les postes d'émissions identifiés. En fonction du type d'activité étudié, les données à collecter peuvent être assez spécifiques ou plus générales. De même, la période de temps sur laquelle les données doivent porter peut s'étendre sur quelques jours ou semaines pour des activités limitées dans le temps, sur un an pour l'analyse annuelle des émissions d'une entreprise (ex : méthode Defra) ou sur plusieurs années pour des projets à long terme (ex : méthode AFD, voir Fiche 3 page 154).

Calcul des émissions :

C'est la dernière étape de l'évaluation du bilan de GES. En utilisant l'outil de calcul sélectionné, les émissions correspondant aux différents postes d'émissions sont évaluées et additionnées pour obtenir le bilan global d'émissions de GES de l'activité.

Etapas ultérieures de vérification et d'analyse de l'incertitude :

L'évaluation des émissions de GES induites par une activité est un processus complexe entaché de nombreuses incertitudes. Ces incertitudes peuvent être scientifiques (les émissions de GES induites par de nombreux processus sont encore peu connues et les facteurs d'émissions ne permettent qu'une estimation grossière des émissions) ou liées aux erreurs d'estimation des quantités utilisées. Il est donc important de vérifier les résultats et de les interpréter de manière cohérente avec le niveau d'incertitude de la méthode.

1.4.1.3 Facteurs d'émissions

De nombreuses méthodologies proposent une série de facteurs d'émissions qui permettent de passer d'une donnée d'activité à son équivalence en termes d'émissions de gaz à effet de serre. A part dans les méthodologies dont l'objectif est la standardisation des bilans où les facteurs d'émissions sont généralement imposés (par exemple la méthodologie Climate Registry), la plupart des autres méthodologies proposent une liste de facteurs d'émissions non exhaustive qui peut être complétée ou modifiée en fonction des objectifs recherchés.

La méthodologie Bilan Carbone[®] propose une liste de facteurs d'émissions particulièrement fournie (approximativement 1 900 facteurs d'émissions). On retrouve ces facteurs d'émissions dans l'outil de calcul mais aussi dans le « Guide des Facteurs d'Emissions » qui reprend les facteurs et détaille les sources d'information utilisées. Ce guide est une source majeure de facteurs d'émissions qui sont généralement adaptés à la situation française. Les méthodologies dérivées de la méthodologie Bilan Carbone[®] (AFD, LGV Rhin-Rhône, Oméga TP) se basent sur la même liste de facteurs d'émissions éventuellement complétée par rapport à leurs objectifs spécifiques.

Defra propose également dans son guide "Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting" une liste importante de facteurs d'émissions définis selon le champ (1, 2 ou 3) du bilan désiré (voir Fiche 5 page 155).

La méthodologie GHG Protocol ne propose pas de liste ou de recueil complet des facteurs d'émissions mais les outils spécifiques aux différents secteurs industriels contiennent chacun des

1.4.1.2 Procédure de calcul

La procédure pour évaluer le bilan des émissions de GES d'une activité, d'une organisation, d'un produit ou d'un territoire peut varier légèrement d'une méthodologie à l'autre mais suit généralement le même schéma :

1. Les postes importants d'émissions de gaz à effet de serre liés à l'activité sont identifiés ;
2. Une méthodologie de calcul adaptée aux besoins et aux postes d'émissions identifiés est sélectionnée ;
3. Les données relatives aux différents postes d'émissions sont collectées ;
4. La méthodologie de calcul est ensuite appliquée pour évaluer des émissions de GES correspondant aux différents postes et en dériver le bilan global de l'activité.

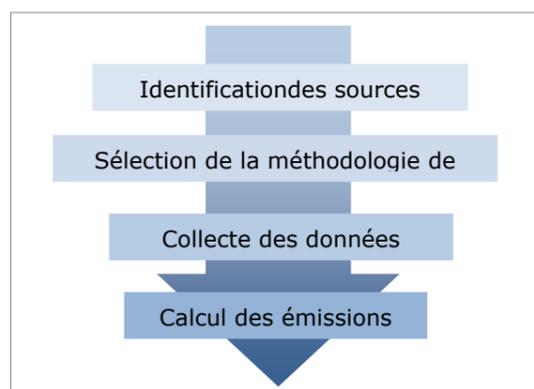


Figure 47 : Etapes générales d'une démarche de bilan des émissions de GES (Adapté de GHG Protocol for the U.S. Public Sector, World Resources Institute, 2010)

Identification des sources :

Idéalement, pour évaluer l'impact d'une activité sur les changements climatiques, l'ensemble des émissions de GES induites devraient être identifiées et intégrées dans le bilan. Cependant, cette démarche est difficilement réalisable, même à l'échelle de projets de taille modérée, car les flux sont généralement très nombreux et souvent difficiles à quantifier. Il s'agit donc principalement dans cette étape d'identifier les sources principales de GES qui sont susceptibles d'influencer significativement le bilan global. Il est également important dans toute démarche d'évaluation du bilan de GES de préciser clairement le périmètre inclus, c'est-à-dire ce qui est pris en compte et ce qui ne l'est pas, en fonction des objectifs recherchés.

Sélection de la méthode de calcul :

Pour estimer les émissions correspondant à un poste, on a généralement recours à des facteurs d'émissions (FE) qui permettent de convertir les données concernant le poste en émissions de GES. Les méthodes de calcul suivent donc généralement un schéma global de type :

facteurs d'émissions. L'outil de calcul de la méthodologie GHG Indicator inclut également une liste de facteurs d'émissions « par défaut ».

Il existe également de nombreux documents ou bases de données qui ne sont pas considérés comme des méthodologies en tant que tel mais qui contiennent des facteurs d'émissions (par exemples : Carbon Trust, 2010, Conversion factors ; IEA, 2010, CO₂ emissions from fuel combustion ; International Union of Railways, Carbon footprint of high-speed railway infrastructure ;...)

1.4.1.4 Type d'outil de calcul

La plupart des méthodologies proposent non seulement des documents de guidance mais également un ou plusieurs outils de calcul. Dans la majorité des cas, il s'agit d'un tableur sous format Microsoft Excel mais l'outil de calcul peut aussi prendre la forme d'un outil interactif online ou d'un software spécifique.

Le principe des outils de calculs d'émissions de gaz à effet de serre reste le même quel que soit le support informatique utilisé : il s'agit de réaliser la multiplication de données d'activités par des facteurs d'émissions puis de sommer les émissions ainsi obtenues par sous-famille, famille et total en respectant les référentiels utilisés. Des fonctionnalités plus évoluées peuvent être exploitées : représentation graphique des émissions, différenciation des flux sectoriels, analyse de l'évolution au cours du temps, etc.

Outils de type tableur Excel :

Ces outils sont généralement conçus pour laisser à l'utilisateur final une grande liberté par rapport aux règles et formules utilisées. L'inconvénient majeur de cette liberté est l'introduction possible d'erreurs de calculs par l'utilisateur. Aussi un processus de vérification est nécessaire.

L'outil Bilan Carbone® développé par l'ADEME se présente sous forme d'un classeur Excel contenant plusieurs feuilles. Les différentes feuilles s'occupent pour la plupart des différentes classes d'émissions (énergie, intrants, fret, déplacements,...), une feuille additionne tous les résultats et présente le bilan global et une feuille rassemble tous les facteurs d'émissions. Les feuilles de calcul se présentent globalement tel que dans la figure ci-dessous. Les cellules de couleur blanche sont celles qui doivent être complétées avec les données récoltées.

| Achats d'électricité | | | | | | | |
|---|-----------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|------------------------|-----------------------------|
| 1 - électricité achetée, producteur désigné | Emissions kg équ C | Emissions kg équ CO2 | Conso (kWh) | kg équ. C par kWh | kg équ. carbone | | |
| | | | | | | | Producteur de l'électricité |
| France, EDF France | 33 | 120 | 2 500 | 0.013 | 33 | | |
| Belgique, Electrabel | 330 | 1 211 | 3 800 | 0.087 | 330 | | |
| Total | 363 | 1 331 | | | 363 | | |
| 2 - Consommation totale d'électricité | | | | | | | |
| bâtiments chauffés à l'électricité (France) estimation à partir des m2 | Emissions kg équ C | Emissions kg équ CO2 | Kg équ C par kWh | m2 concernés | kWh par m2 an | kg équ. C par m2 an | kg équ. carbone |
| | | | | | | | |
| Bureaux | 920 | 3 372 | 0.01 | 250 | 283 | 3.7 | 920 |
| Enseignement | 0 | 0 | | | 131 | 0.0 | 0 |
| Santé | 0 | 0 | | | 221 | 0.0 | 0 |
| Moyenne toutes branches | 0 | 0 | | | 222 | 0.0 | 0 |
| Total | 920 | 3 372 | | | | | 920 |

Figure 48 : Exemple de feuille de calcul issue de la méthodologie Bilan Carbone®

Le tableur général a aussi été adapté aux différents secteurs cibles et on a donc des versions de l'outil différentes spécifiquement pour (i) les collectivités, (ii) les territoires, (iii) les entreprises et (iv) les produits. Le tableur a également été adapté par des personnes tierces, en collaboration ou non avec l'ADEME pour répondre aux besoins de secteurs spécifiques. C'est le cas, notamment, de la méthodologie des émissions des projets AFD et de la méthodologie LGV Rhin-Rhône.

Les autres méthodologies qui proposent un outil sous format de tableur Excel ont une structure généralement similaire. La méthodologie GHG Protocol développée par la World Resources Institute et la World Business Council for Sustainable Development ne propose pas d'outil général mais une série d'outils spécifiques aux différents secteurs industriels.

Figure 49 : Exemple de tableur issu de la méthodologie GHG Protocol

La méthodologie Defra propose un grand nombre de facteurs d'émissions insérés dans des feuilles de calculs très simples mais ne propose pas d'analyse intersectorielle des résultats. Le GHG Indicator développé par le United Nations Environment Programme propose également un tableur Excel simple qui a la spécificité de se complexifier au fur et à mesure que l'on ajoute des éléments. Les cellules vertes qui proposent « oui/non » permettent de définir ce que l'on veut inclure et de complexifier le tableau. Les autres cellules vertes doivent être complétées avec les données collectées.

Transport Related GHG Emissions

A - Specify Parameters

| | | | | | | | | | |
|----------------------|-----|------------------------|-----|----------------------|----|-------------------|-----|-----------------|----|
| Own Vehicle or Fleet | Yes | Fuels for Own Vehicles | | Other Transportation | | | | | |
| Other Transportation | Yes | Petrol | Yes | Car/Petrol | No | Air-long Haul | No | Train Freight | No |
| | | Diesel | Yes | Car/Diesel | No | Train | Yes | Inland Shipping | No |
| | | LPG | No | HGV | No | Air Freight/Short | No | Marine Shipping | No |
| | | | | Air-short Haul | No | Air Freight/Long | No | | |

B - Calculate CO₂ Emissions from Road Transport

| Fuel Types | Quantity Unit | Emission Factor Unit | Use Default Factor | Emiss. Factor | 2008 | | 2009 | | 2010 | | 2011 | |
|--------------|---------------|----------------------|--------------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | | | | | Quantity (kilo-litre) | Amount (tCO ₂) |
| Petrol | kilo-litre | tCO ₂ /kl | Yes | 2.22 | 25 | 56 | | 0 | | 0 | | 0 |
| Diesel | kilo-litre | tCO ₂ /kl | Yes | 2.68 | 36 | 96 | | 0 | | 0 | | 0 |
| Total | | | | | | 152 | | 0 | | 0 | | 0 |

C - Calculate CO₂ Emissions from Unit.Kilometre Transport

| Transport Mode | Quantity Unit | Emission Factor Unit | Use Default Factor | Emiss. Factor | 2008 | | 2009 | | 2010 | | 2011 | |
|----------------|---------------|-------------------------|--------------------|---------------|----------|----------------------------|----------|----------------------------|----------|----------------------------|----------|----------------------------|
| | | | | | Quantity | Amount (tCO ₂) |
| Train | '000 p.km | kgCO ₂ /p.km | Yes | 0.034 | 1 000 | 34.0 | | 0.0 | | 0.0 | | 0.0 |
| Total | | | | | | 34 | | 0 | | 0 | | 0 |

Figure 50 : Exemple de feuille de calcul issue de la méthodologie GHG Indicator de l'UNEP.

The screenshot shows a web-based data entry interface for the Climate Action Registry. The page is titled 'Marie's Trees' and is part of the 'Emission Data' section. It includes a navigation menu at the top with options like 'Main', 'Entity Information', 'User Management', 'Facilities', 'Emission Data', 'Optional Reporting', and 'Reports'. The main content area is divided into a 'Summary' sidebar and a main form. The 'Summary' sidebar lists various navigation links such as 'Main', 'Entity Information', 'Entity Emissions Summary', 'Facility Emissions Summary', 'Facility Emissions Detail', 'Optional Reporting', 'Emission Performance', 'Emission Documents', and 'Reports'. The main form contains fields for 'Facility Name' (LA Office), 'Country' (United States), 'State/Province' (California), 'Identifier', 'Equity Share' (100%), 'Emission Category', 'GH Gas', 'Emission Source', 'Calculation Method' (Built-In Calculation Tool or Pre-Calculated), 'Emission Amount', and 'Unit' (metric ton). There are also checkboxes for 'Is De Minimis' and a 'Save' button.

Figure 51 : Exemple de page d'encodage des données de l'outil Climate Action Registry Reporting Online Tool (www.climateregistry.org).

Autres types d'outils de calcul :

Certaines méthodologies proposent des outils de calcul online. C'est surtout le cas lorsque l'outil est destiné à des utilisateurs non expérimentés qui ne doivent introduire que des données récoltées au sein de leur entreprise ou organisation. C'est par exemple le cas de l'outil de calcul Climate Action Registry Reporting Online Tool (Climate Registry) (Figure 51) et du baromètre carbone des Contrats de Développement Territorial (Energies Demain – Caisse des Dépôts). Les possibilités de modification des facteurs d'émissions ou d'adaptation à des situations spécifiques sur ces outils sont pour la plupart assez restreintes.

Ces outils bénéficient de la protection des données sources (utilisation d'une base de données sans sa divulgation, ce qui correspond mieux à un modèle commercial orienté sur les données), et garantissent l'intégrité des calculs car non modifiables par l'utilisateur. L'avantage de ces outils est donc principalement leur fiabilité et la comparabilité plus importante des résultats.

Finalement l'outil de calcul peut aussi prendre la forme d'un software à part entière tel que le celui du Global Emission Model of Integrated Systems (GEMIS) développé par l'Öko-Institut (voir Fiche 6 page 156). Cette méthodologie propose une approche assez originale qui diffère plus largement des autres méthodologies reprises ci-dessus. En effet, tandis que la plupart des méthodologies reposent sur des facteurs d'émissions agrégés qui tiennent compte de manière implicite de l'ensemble des émissions induites, la méthodologie GEMIS propose une autre manière de procéder en construisant les facteurs d'émissions à partir de tous les processus sous-jacents. Grâce à un système hiérarchisé, la méthodologie permet la construction de facteurs d'émissions correspondant à des processus de plus en plus complexes par addition des émissions des processus sous-jacents. Lors du calcul des bilans, l'origine des émissions peut alors être détaillée de manière assez précise.

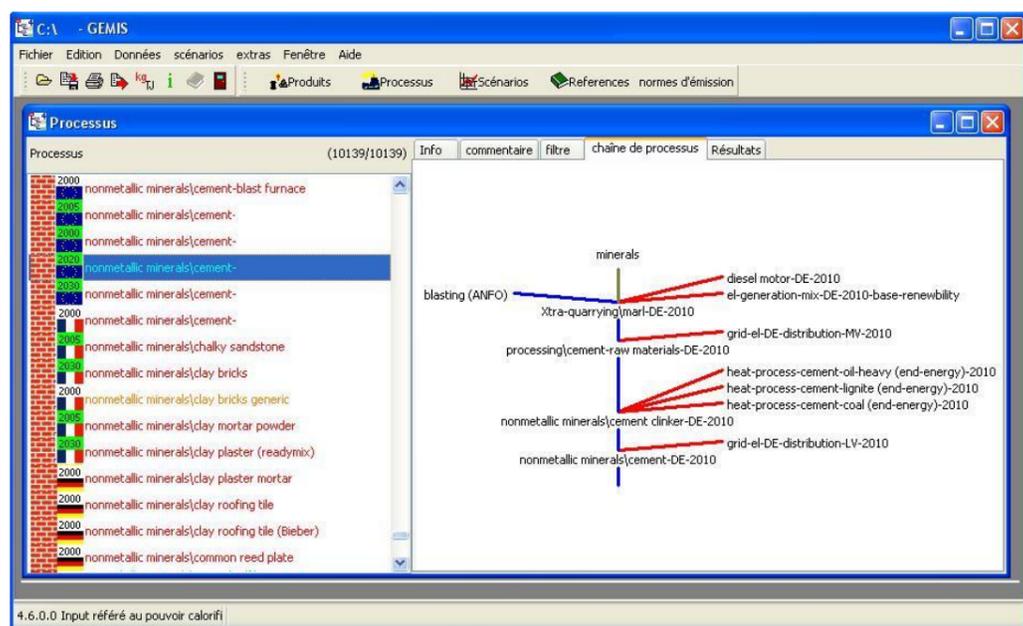


Figure 52 : Exemple de décomposition d'un processus en différents processus sous-jacents avec le modèle GEMIS.

Cette méthodologie permet une analyse approfondie des résultats mais ne contient que peu de facteurs d'émissions « complets » c'est-à-dire prenant en compte l'ensemble des émissions directes et indirectes.

1.4.2 Considérations spécifiques

1.4.2.1 Energies du réseau

Les énergies distribuées par un réseau (comme l'électricité, la chaleur et/ou le froid dans certaines zones urbaines...) peuvent être alimentées par différentes compagnies (EDF, CNR, SNET, Cie du vent... dans le cas du réseau électrique français). Les moyens mis en œuvre par ces différentes structures ont des performances d'émissions de GES qui varient pour produire une même quantité d'électricité, de chaleur, de froid.

De plus, la demande évoluant au cours d'une journée et au cours des saisons, les moyens mis en œuvre sont déclenchés selon une pyramide en partant des moyens les plus économes vers ceux les plus coûteux (qui correspondent majoritairement à un recours aux hydrocarbures et sont très émissifs).

Ainsi, selon que l'on raisonne de façon globale, en distinguant le producteur ou en distinguant le profil temporel d'usage, les facteurs d'émissions varient significativement :

| FE de l'électricité (gCO ₂ e/kWh) | | Producteur | |
|--|-------------|--|--|
| | | Moyenne | Distinction |
| Profil temporel d'usage | Moyenne | 90 : France ⁵⁸ 362 : UE 27 | 38 : EDF (Fr) ⁵⁹ 972 : EON-SNET (Fr) |
| | Distinction | 40 à 200 : moyenne selon tranche horo-saisonnière (Fr) ⁶⁰ 40 : usage annuel en base (Fr) ⁶¹ 100 : éclairage annuel (Fr) 180 : Chauffage hivernal (Fr) | 0 à 1200 |

Peu de méthodes tranchent quant à l'approche à adopter : celle-ci dépendant de l'usage de l'énergie et des objectifs de l'étude.

Les bilans d'émissions entrant dans le cadre de l'obligation consécutive au Grenelle 2 (Décret 2011-928) doivent se fonder sur un facteur d'émissions national moyen, sans possibilité de distinguer par producteur, spécificité du contrat (renouvelable) ou usage horo-saisonnier.

1.4.2.2 Puits et sources

Les quantités de GES prises en compte dans les calculs de bilan correspondent à la contribution à l'accroissement de la concentration atmosphérique en GES plutôt qu'aux émissions en tant que telles. Il existe, en effet, des usages qui émettent des gaz à effet de serre, sans contribuer pour autant à enrichir l'atmosphère en gaz à effet de serre car ils sont compensés par des flux d'absorption équivalents.

Cette question concerne principalement les émissions de CO₂ issues de la consommation de matières organiques (feu de bois, bioéthanol,...). En effet, ce carbone est alors issu de la photosynthèse (ou de la consommation de produits végétaux issus de la photosynthèse) et donc de la transformation de CO₂ en molécules organiques. Dans le cas du carbone organique, deux cas de figure sont généralement considérés :

- Si les émissions de CO₂ à partir de matières organiques ne participent pas à l'accroissement des concentrations atmosphériques en CO₂, c'est-à-dire si les émissions sont contrebalancées entièrement par la photosynthèse (ex : gestion forestière durable, agriculture durable,...), les émissions ne sont pas prises en compte dans le bilan des émissions de GES.
- Par contre, si les émissions de CO₂ à partir de matières organiques ne sont pas contrebalancées entièrement par la photosynthèse (ex : déforestation, appauvrissement du sol, ...) et participent donc à l'accroissement des concentrations atmosphériques en CO₂, les émissions sont alors partiellement ou entièrement prises en compte dans le bilan des émissions de GES.

Cette question ne concernera que de façon minimale le réseau de transport public du Grand Paris car il n'y aura pas de recours direct à des matériaux séquestrant des gaz à effet de serre. Elle s'appliquera cependant à l'utilisation croissante de biocarburants.

1.4.2.3 Valorisation énergétique des déchets

Les déchets combustibles ou fermentescibles peuvent être valorisés en produisant de la chaleur et/ou de l'électricité. Il est alors possible de quantifier les émissions qui auraient été générées par

⁵⁸ Source : AIE, 2008
⁵⁹ Source : producteur concerné, 2008
⁶⁰ Source : RTE, 2009
⁶¹ Source : Etude ADEME-EDF-RTE, 2007

les moyens conventionnels pour produire cette même quantité de chaleur et/ou d'électricité. Cette quantité correspondante d'émissions est dite « évitée » : c'est autant d'émissions qui n'auront pas à être générées de manière supplémentaire pour bénéficier de cette chaleur / électricité.

Il ne s'agit pas d'un puits (séquestration nette) d'émissions pour autant : il n'y a pas retrait de gaz de l'atmosphère, mais il y aurait simplement pu y avoir davantage d'émissions. L'ISO 14064-2 (relative aux projets) et les référentiels Mécanismes de Développement Propre (MDP) et Mise en Œuvre Conjointe (MOC) de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) proposent une quantification de ces émissions évitées, en regard d'un scénario de référence. Il s'agit là d'exercices de comparaison et non de bilan physique des flux constatés.

Dans le cas du réseau de transport public du Grand Paris, les déchets issus de la construction seront majoritairement inertes et, par conséquent, ni combustibles, ni fermentescibles. La question de leur valorisation énergétique ne se posera donc que de façon négligeable. De même, l'activité principale étant la mise en place d'un service de transport en commun, le fonctionnement ne devrait produire que peu de déchets (notons ici que les déchets récoltés dans les poubelles publiques des gares ne seront pas comptabilisés puisque leur production est totalement indépendante de la présence de la gare).

1.4.2.4 Recyclage

L'utilisation de matières recyclées permet généralement de réduire les émissions de gaz à effet de serre induites. Dans le cadre de la construction du réseau de transport public du Grand Paris, il est, par exemple, probable que, comme l'a montré le bilan carbone[®] de la LGV Rhin Rhône, l'utilisation d'acier recyclé ait un impact important sur le bilan des émissions de GES. Il est donc nécessaire de définir la façon dont le recyclage peut être pris en compte dans le calcul du bilan.

Le recyclage étant souvent un processus en boucle (l'acier est récupéré pour être réutilisé comme acier qui pourra à son tour être récupéré...), on passe donc d'une logique linéaire de la vie d'un matériau (extraction, constitution et transformations, utilisation, fin de vie) à une logique de cycle (recyclage, transformation, utilisation, recyclage...). A la différence de la logique linéaire où sont prises en compte l'ensemble des émissions avant l'utilisation d'un matériau, une règle de coupure est nécessaire pour le recyclage afin de ne pas tenir compte des vies antérieures du matériau.

Ainsi, on peut considérer que l'utilisation d'acier recyclé permet d'éviter l'extraction de minerai et la production d'acier nouveau et donc réduire les émissions de GES par tonne d'acier utilisé. Le facteur d'émission du matériau recyclé tient alors compte des émissions liées au procédé de recyclage mais pas de l'extraction de minerai et de la production d'acier. Les autres émissions (collecte, tri, prétraitement de dépollution...) étant généralement prises en compte sur le poste déchets de la vie antérieure (Bilan Carbone[®], possibilité dans GHG Protocol / ISO 14064). Cette pratique a cependant un inconvénient majeur : en imputant tout le bénéfice du recyclage au consommateur du recyclé, il n'y a pas de valorisation pour la structure qui a mis ses déchets en recyclage. Or, le marché du recyclage peut, pour certains produits (comme l'acier, l'aluminium...), être davantage limité par l'offre de déchets à recycler que par la demande de matériaux issus de recyclé. Il peut donc paraître inapproprié de valoriser le recyclage sur le matériau (la demande) plutôt que sur le déchet (l'offre).

L'autre manière considère donc que c'est parce que l'on décide de recycler les déchets d'acier que l'on permet de réduire les émissions de GES liées à l'extraction de minerai et à la production d'acier. Il est ainsi possible de valoriser le recyclage sur la gestion des déchets mis à recycler plutôt que sur l'achat de recyclé. Cette possibilité est ouverte entre autres par le GHG Protocol / ISO 14064 (et ISO 14067 liée à l'empreinte carbone des produits) qui laissent le choix de

valoriser le recyclage sur les déchets ou les matériaux. Le choix est exclusif : la valorisation n'est à réaliser qu'une fois pour éviter un double comptage.

Dans le cas de matériaux recyclés ayant les mêmes caractéristiques que des matériaux vierges, il n'est pas toujours possible de les distinguer. De plus, la question suivante se pose : lorsque la demande est supérieure à l'offre (cas majoritaire sur le marché du recyclé : acier, aluminium...), pourquoi distinguer la structure qui approvisionne du recyclé de celle qui approvisionne un matériau vierge ? En effet, dans ce cas, la demande de recyclé n'influe pas sur le volume du recyclage et il n'est pas nécessaire de distinguer les facteurs d'émissions. On peut alors se limiter à un facteur d'émissions moyen qui prend en compte le taux de recyclé constaté sur le marché global.

Cette approche est de plus en plus utilisée dans les études (LGV par exemple) et prend le contrepied à la tendance de la traçabilité et précision totale. Cette méthode a le mérite de simplifier la collecte d'information.

Dans le cas de matériaux issus partiellement de recyclé, le facteur d'émissions à prendre en compte est la combinaison de celui du vierge et du recyclé à 100%, affectée de la proportion de vierge et de recyclé.

Dans le cas du bilan d'émissions de GES du Réseau de transport public du Grand Paris, le recyclage pourrait avoir une influence considérable principalement par rapport à l'utilisation de matériaux recyclés lors de la construction.

1.4.2.5 Comparaison de scénarios

La plupart des méthodologies ont initialement été conçues pour fournir une « photo instantanée » des émissions liées à une activité existante. Dans leur forme initiale, elles ne permettaient donc généralement pas une comparaison détaillée entre un scénario de référence et un ou plusieurs scénarios de projets. C'est encore le cas pour les méthodologies GHG Protocol, GHG Indicator, Defra et pour la méthodologie Bilan Carbone[®] générale qui sont principalement destinées à évaluer les émissions d'une activité ou d'une entreprise existante. La comparaison entre deux scénarios nécessite donc la réalisation de deux bilans séparés et une comparaison des résultats à l'extérieur de l'outil de calcul.

Cependant, certaines méthodologies ont progressivement été adaptées et proposent maintenant la comparaison automatique entre plusieurs scénarios :

- La méthodologie Bilan Carbone[®] adaptée aux territoires propose par exemple un outil de comparaison automatique entre différentes situations d'un territoire. L'outil, assez simple, est un tableur Excel qui permet de mettre côte à côte les résultats de plusieurs bilans séparés. Il est donc toujours nécessaire de réaliser deux bilans séparés correspondant à deux situations différentes, l'outil ne permettant qu'une comparaison numérique et graphique des résultats (voir Figure 53).

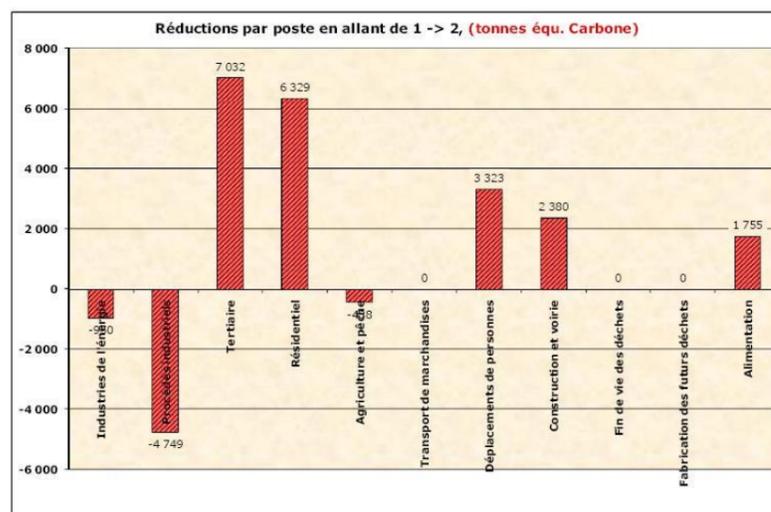


Figure 53 : Comparaison des émissions issues de deux scénarios distincts. (Source : Manuel scénario-territoire, V6.1, Bilan Carbone®, ADEME)

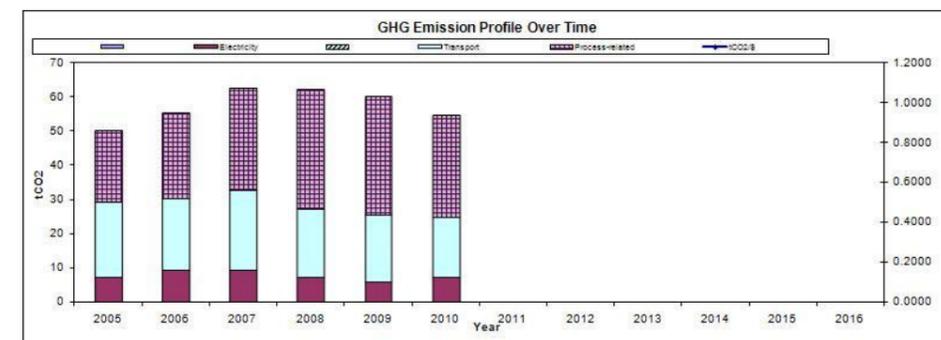


Figure 54 : Exemple de comparaison année par année des résultats d'un bilan de GES réalisé avec la méthodologie GHG Indicator.

Dans le cadre de l'évaluation de bilan de GES induits par des projets ayant une telle durée de vie, la manière dont les émissions de demain seront comparées aux émissions d'aujourd'hui constituera un élément crucial. Il s'agit donc de répondre à la question suivante : une tonne équivalent CO₂ émise lors de la construction est-elle équivalente à une tonne économisée lors du fonctionnement du métro, dans 10, 20 ou 50 ans ?

Cette question sujette à la controverse n'est que très peu abordée dans les méthodologies existantes. Le guide méthodologique de la méthodologie Bilan Carbone® est un des seuls à aborder la question dans une section en annexe sur les principes d'actualisation des émissions mais ne préconise pas l'actualisation physique des émissions. L'outil de calcul ne permet par ailleurs pas de prendre en compte un taux d'actualisation des émissions.

Le manuel d'utilisation de la méthodologie des projets AFD reprend le texte de la méthode Bilan carbone® et préconise l'utilisation d'un taux d'actualisation de valeur négative (la valeur de prise en compte des émissions augmente avec le temps) commun à tous les projets AFD. L'outil de calcul permet de définir une durée de vie du projet et un taux d'actualisation.

- La méthodologie pour les projets AFD dérivée de la méthode Bilan Carbone® a été adaptée plus profondément et permet de définir dans un seul classeur Excel les émissions d'un scénario de référence et d'un scénario de projet et de les comparer directement entre elles.
- La méthodologie GEMIS permet, quant à elle, la définition d'une multitude de scénarios différents et leur comparaison numérique et graphique automatique. La méthodologie est particulièrement bien adaptée pour comparer les alternatives de projets très locaux (par exemple comparer les émissions induites par la mise en place et le fonctionnement d'un chauffage au gaz et d'un chauffage énergie solaire + électricité) mais elle est moins adaptée à la définition de projets beaucoup plus complexes et étendus.

1.4.2.6 Prise en compte du facteur temps

A nouveau, la plupart des méthodologies ayant été initialement conçues pour fournir une « photo instantanée » des émissions liées à une activité existante, elles ne permettent généralement que peu ou pas la prise en compte du facteur temps.

Bien que certaines méthodologies permettent une analyse année par année des émissions et une comparaison automatique des résultats annuels (comme, par exemple, la méthodologie GHG Indicator illustrée dans la figure ci-dessous) aucune ne permet la définition de facteurs d'émissions évoluant au cours du temps. Pourtant, il est évident que pour des projets ayant une durée de vie de plusieurs dizaines d'années, les émissions de GES par unité d'utilisation de certains postes évolueront considérablement.

1.4.2.7 Amortissements et retour sur investissement

La logique d'amortissement consiste à répartir l'impact lié à la constitution d'un bien sur sa durée d'utilisation (avant renouvellement ou rénovation significative). Les durées ne sont généralement pas fixées par les méthodologies et laissées à l'appréciation de l'utilisateur.

Lorsqu'un projet permet de réduire les émissions de GES, la logique appelle à mettre en regard les émissions liées à la constitution du projet par rapport au bénéfice lié à sa fonctionnement. Ce bénéfice étant constitué des émissions évitées moins les émissions liées au fonctionnement du projet. La période de retour sur investissement est ainsi définie par :

$$T_{\text{retour}} = \frac{\text{Emissions de construction}}{\text{Emissions annuelles évitées} - \text{Emissions annuelles de fonctionnement}}$$

Cette donnée comporte plusieurs faiblesses :

Elle fait appel aux émissions évitées. Cette valeur est très délicate à quantifier car nécessite de formuler de nombreuses hypothèses notamment pour définir un scénario de référence en comparaison duquel sont calculées les émissions évitées.

Le fait d'avoir un terme fortement dépendant des hypothèses prises en dénominateur fait très sensiblement varier le résultat. Pour mémoire, les ordres de grandeur de précision des facteurs d'émissions sont de plus ou moins 20 %. A titre illustratif, pour des émissions de construction valant 100, des émissions annuelles évitées valant 20 et des émissions de fonctionnement valant

5, en adoptant plus ou moins 20 % sur chaque terme, la période de retour sur investissement varie de :

$$\frac{80}{24-4} = 4 \text{ ans à } \frac{120}{16-6} = 12 \text{ ans} \quad ; \text{ il y a un facteur 3 entre les résultats.}$$

Il sera donc préférable de présenter chacun des termes d'émissions indépendamment. Le calcul d'une valeur d'émissions annuelle (ou par personne transportée...) sera nettement moins sensible :

$$E \text{ annuelles} = \frac{\text{Emissions de constructions}}{T \text{ amortissement}} + \text{Emissions annuelles de fonctionnement}$$

Ce qui donne dans notre exemple, avec une période d'amortissement de 50 ans, des émissions annuelles comprises entre $\frac{80}{50} + 4 = 5,6$ et $\frac{120}{50} + 6 = 8,4$, soit $7 \pm 20 \%$. La valeur annuelle ainsi obtenue pouvant alors être comparée aux émissions évitées, ou la valeur par voyageur et par km pouvant être comparée aux valeurs des autres modes de transports.

1.4.3 Prise en compte des thématiques spécifiques au Grand Paris

1.4.3.1 Etudes préalables à la construction

Les composantes en jeu en ce qui concerne les émissions liées aux études préalables à la construction peuvent être prises en compte dans la plupart des méthodologies existantes. Il s'agit en effet principalement de toutes les émissions relatives au fonctionnement des entreprises et bureaux d'études (déplacements domicile-travail, consommation énergétique des bureaux,...). La majorité des méthodologies ayant été développées initialement pour aider les entreprises à évaluer et à réduire leurs émissions de CO₂, ce sont donc ces émissions qui ont été le plus souvent étudiées. Les méthodologies les mieux adaptées sont probablement la méthode Defra, le Bilan Carbone® et le GHG Indicator. Ces méthodologies permettent au minimum de calculer les émissions relatives :

- aux déplacements domicile-lieu de travail ;
- aux voyages et déplacements spéciaux ;
- et à la consommation énergétique des bâtiments.

Toutes les méthodologies ne permettent, par contre, pas de tenir compte de l'amortissement des bâtiments et du matériel utilisé. Pour ces émissions, seule la méthodologie Bilan Carbone® apporte une solution adéquate pour le calcul des émissions.

De même, la méthodologie Bilan Carbone® est la seule qui propose dans son guide des facteurs d'émissions une série de valeurs macroscopiques qui permettent d'évaluer sommairement les émissions de services tertiaires sur base du chiffre d'affaire ou du temps de travail global. Ces facteurs d'émissions seront particulièrement intéressants dans le cadre de l'évaluation des émissions de GES liées au réseau de transport public du Grand Paris puisqu'il ne sera pas possible d'obtenir le bilan d'émissions de GES pour chacune des études réalisées.

1.4.3.2 Construction de l'infrastructure

1.4.3.2.1 L'outil Oméga TP (voir annexes, fiche 13)

Issu de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP), cet outil s'apparente à une simplification du Bilan Carbone® à l'échelle d'un chantier de travaux publics. Il comporte notamment les onglets suivants : combustion sur site, électricité, déplacement de personnes, fret, fabrication de matériaux, gestion des déchets, amortissement des engins, amortissement des bâtiments, sous-traitance éventuelle et un récapitulatif. La majorité des facteurs d'émission sont issus du Bilan Carbone®.

Des facteurs d'émissions supplémentaires viennent enrichir l'outil, en particulier sur les matériaux de construction (Source : Eurobithume, Colas...).

L'outil est de conception simple pour une prise en main rapide, mais ne permet pas en l'état de prise en compte multi phase ou multi corps d'état sans que ceux-ci ne soient agrégés.

1.4.3.2.2 Le référentiel GHG Protocol /Initiative Protocole GES (voir annexes fiche 2)

Issus du WRI et WBCSD, cette initiative propose des outils de calcul transversaux (combustion sur site, combustion dans des véhicules...) et spécifique (production de l'aluminium, du ciment...). Ces outils sont en libre accès depuis le site web⁶². La prise en compte de chaque flux correspond à un tableur spécifique auquel est rattachée une note méthodologique.

L'utilisation de ces tableurs nécessite une grande connaissance des flux et de la technicité des produits (composition précise d'un ciment avec proportion de CaO, MgO par exemple). Aussi cet outil permet-il une certaine précision pour les flux maîtrisés (principalement pour les producteurs de matériaux), mais n'est pas utilisable pour les flux qui ne sont pas précisément connus (pas de facteurs agrégés donc difficile à mettre en œuvre dans les études amont de projets d'infrastructures de transport).

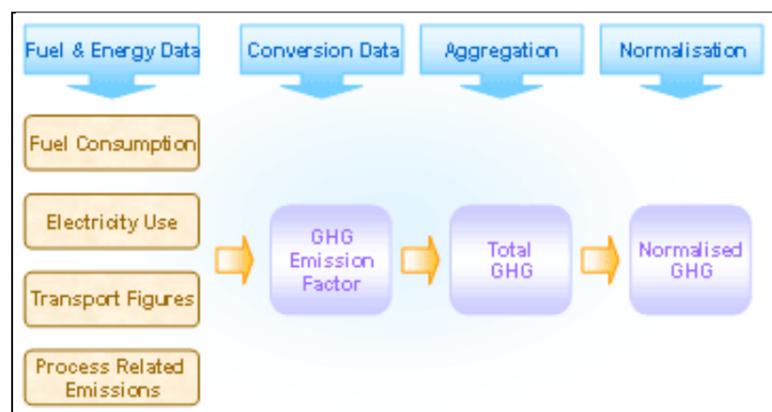
1.4.3.2.3 L'outil GHG Indicator (voir annexes fiche 4)

Issu du Programme de Nation Unies pour l'environnement (PNUE/UNEP), cet outil est en libre accès depuis le site web⁶³ des Nations Unies.

- * Dans la lignée des champs 1 et 2 du GHG Protocol/ISO 14064, cet outil se focalise uniquement sur les émissions directes d'un système et sur son approvisionnement énergétique. Cette approche prend en compte des données liées aux procédés et à la consommation énergétique mais ne propose pas des facteurs d'émissions agrégés permettant de travailler dans des études amont de projets d'infrastructures de transport :

⁶² www.ghgprotocol.org

⁶³ <http://www.unep.fr/energy/information/tools/ghg/>



- ✗ L'outil de calcul associé est simple et lisible, mais ne permet pas d'évolutions majeures comme des approches multi périmètre (phases, corps d'état...)

1.4.3.2.4 L'outil Bilan Carbone® (voir annexes, fiche 1)

Diffusée depuis 2004, la méthode Bilan Carbone® a été créée par Jean-Marc Jancovici (Cabinet Manicore) pour le compte de l'ADEME. L'ADEME a transféré les droits de la méthode à l'Association Bilan Carbone (ABC) en octobre 2011. Cette méthode n'est pas dédiée à la construction d'infrastructures, mais son caractère générique et adaptable permet de l'utiliser dans ce cadre.

- ✓ Basée sur un principe de transparence, l'ensemble des ratios d'émissions, ainsi que les lignes méthodologiques sont en libre téléchargement depuis le site de l'ADEME.
- ✓ Une fonction de totalisation de plusieurs bilans permet de réaliser un diagnostic multi périmètre (conception, construction, fonctionnement par exemple), voire totalisation de totalisation permettant de descendre à un niveau de détail par corps d'état ou par phase du chantier au sein du périmètre construction, selon une logique arborescente.
- ✗ L'outil n'étant pas dédié à la construction d'infrastructure, les facteurs d'émissions associés à ce domaine sont peu nombreux et ne permettent pas une distinction fine des différents matériaux. Par ailleurs, des domaines très documentés (gestion des déchets, recyclage et recyclé, déplacement de personnes...) ne peuvent être pris en compte avec une grande précision dans le cadre de cet exercice.

1.4.3.2.5 Le calculateur LGV RFF-SNCF-ADEME (voir annexes fiche 14)

Réalisé lors de l'étude carbone de la LGV Rhin-Rhône sous le triple portage RFF, SNCF et ADEME, ce calculateur prend en compte la réalisation de la ligne ferroviaire et son fonctionnement. Des approfondissements significatifs ont été réalisés par rapport aux facteurs d'émissions, d'une part à l'échelle des matériaux (aciers, chaux pour traitement des remblais...), d'autre part à l'échelle des ouvrages d'art avec la réalisation de facteurs d'émission par linéaire (tunnel, pont...). Nous avons pu voir la structuration de l'outil mais n'en disposons pas à l'heure de rédaction de ce rapport.

- ✓ Il paraît particulièrement pertinent pour l'étude de la construction d'une infrastructure ferroviaire, notamment par sa structuration et ses facteurs d'émissions permettant de travailler en mode projet.

- ✗ Conçu pour réaliser une étude en mode projet, il ne permet pas de proposer facilement des facteurs d'émissions alternatifs suite à une étude plus poussée d'un ouvrage particulier.

En conclusion de ce tour d'horizon des différents outils, il nous faut réaliser un outil qui permette une approche multi périmètre (comme le permet le Bilan Carbone® avec son utilitaire de totalisation), avec une adaptation aux flux liés à la construction d'une infrastructure ferroviaire et aux données disponible en mode projet (à l'image du calculateur LGV). Sur la phase de construction de la ligne, un second niveau doit permettre de constituer des facteurs d'émissions alternatifs liés aux informations supplémentaires remontées au fur et à mesure de l'avancement de la contractualisation puis de la réalisation.

1.4.3.3 Mobilité en Ile-de-France

La prise en compte des impacts sur la mobilité dans le bilan des émissions de GES est essentielle dans le cadre du réseau de transport public du Grand Paris. Bien que toutes les méthodologies permettent de calculer les émissions en fonction de la consommation de carburant et que certaines permettent d'aller plus loin et de calculer les émissions en fonction du nombre de kilomètres parcourus sur base de facteurs généraux dépendant du type de véhicule (véhicule léger, véhicule utilitaire, poids-lourd,...) et de zone (rurale, suburbaine, urbaine), aucune méthodologie ne semble être assez complète pour les enjeux du réseau de transport public du Grand Paris.

En effet, étant donné les enjeux et la durée de vie supposée de l'infrastructure, il sera nécessaire de tenir compte, non seulement des flux de véhicules, mais aussi :

- De la vitesse de parcours sur les différents axes. L'importance du report modal induit de la route vers les transports en commun pourrait en effet influencer de manière non négligeable la vitesse de circulation et la congestion sur de nombreux axes. La consommation en carburant étant, comme nous l'avons vu, fortement dépendante de la vitesse, il sera donc nécessaire d'en tenir compte dans le calcul des émissions en situation de référence et en situation de projet.
- De l'évolution du parc automobile. La durée de vie de l'infrastructure s'étendant sur plusieurs dizaines d'années, on peut s'attendre à une amélioration considérable du parc automobile en termes d'émissions de GES. Il faudra donc nécessairement définir un facteur d'émission évolutif au cours du temps permettant de tenir compte de ces améliorations.
- De l'évolution des carburants. Comme nous l'avons vu, lorsque les émissions proviennent de la combustion de matières organiques issues de cultures durables, elles ne participent pas à l'augmentation de GES dans l'atmosphère et ne doivent pas être comptabilisées dans le bilan d'émissions de GES. Les biocarburants étant considérés comme issus de l'agriculture durable, ils contribuent donc moins (il faut tout de même tenir compte de l'énergie nécessaire à la transformation des matières organiques en biocarburants et de l'énergie nécessaire au transport) à l'augmentation de GES dans l'atmosphère. Il faudra donc tenir compte de l'évolution future de leur utilisation au détriment des énergies fossiles.

Bien que diverses méthodologies (dont la méthode européenne COPERT IV) permettent de calculer les consommations des véhicules et les émissions au pot d'échappement en tenant compte de multiples facteurs (vitesse, pente, etc.), il n'existe, à notre connaissance, aucune

méthodologie de calcul des émissions de GES spécifique à la mobilité permettant de prendre en compte toute la chaîne de production et d'acheminement des carburants ainsi que l'amortissement des véhicules. Nous pourrions cependant nous baser sur les différents modèles existants pour développer notre méthodologie.

1.4.3.4 Développement territorial

De manière générale, il existe peu de méthodologies ou d'outils permettant de prendre en compte, d'un point de vue opérationnel ou stratégique, l'ensemble des thématiques énergétiques liées au développement territorial et, ce, à une échelle étendue comme celle de la commune ou de la région. Depuis quelques années, toutefois, certainement devant l'impératif climatique et énergétique et en vue des évolutions législatives et réglementaires qu'induiront les objectifs portés par le Grenelle de l'environnement sur les politiques d'aménagement du territoire, des outils d'aide à la décision sont en cours de développement. Ceux-ci auront pour vocation de guider les choix opérés par les collectivités dans leur politique de développement territorial et d'améliorer l'articulation entre les choix en matière d'urbanisme et la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, aujourd'hui, la majorité des outils existants ont été développés en interne par des bureaux d'études privés et sont, la plupart du temps, spécialisés sur un poste d'émission particulier.

1.4.3.4.1 Les outils au service des collectivités

- **L'outil GES SCoT** (voir annexes, fiche 12)

Suite aux travaux du Grenelle de l'environnement, la direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature du ministère en charge du développement durable a confié au CERTU, en liaison avec l'ADEME, le soin de mettre en place des outils d'évaluation des émissions de gaz à effet de serre dans les documents d'urbanisme, à savoir les SCoT, les PLU et les opérations d'aménagement. Ce travail a été conduit par les CETEs et le bureau d'études Factor X sous la direction du CERTU. Il a notamment donné lieu à l'élaboration d'un outil d'aide à la décision pour l'évaluation des émissions de GES de différents scénarios d'aménagement du territoire dans le cadre de l'élaboration des SCoT : l'outil GES SCoT. L'analyse de cet outil apparaît très pertinente dans le cadre de la présente étude puisque :

- ✓ GES SCoT est un outil de calcul qui englobe presque tous les postes d'émissions retenus dans la présente étude : la consommation du bâti (résidentiel et tertiaire), les actions sur le renouvellement du parc, le changement d'affectation des sols et le déplacement des individus ;
- ✓ il est adapté à une échelle territoriale régionale ou communale et nécessite des données d'entrée plus ou moins détaillées selon l'échelle de travail ;
- ✓ c'est un outil d'aide à la décision, sous forme d'un tableur Excel organisé par thématique, qui permet de tester différents scénarios d'aménagement et de repérer facilement les leviers d'actions, tout comme le futur outil que nous comptons développer ;
- ✓ et, enfin, car il a été développé pour le compte d'organismes publics et, par conséquent, est gratuit et diffusable.
- ✗ Toutefois, d'après notre contact à l'ADEME, la diffusion de l'outil, initialement prévue courant 2011, est aujourd'hui retardée. C'est pourquoi nous n'avons pas pu nous procurer la première version du logiciel.
- ⌚ Toutefois, sous condition que la diffusion ait lieu avant la fin de l'année et que nous puissions y avoir accès, il sera possible de s'inspirer de la méthodologie de calcul utilisée

dans « GES SCoT ». D'autant plus que, d'après nos contacts, l'outil est déjà finalisé et a été testé sur différents territoires d'application de SCoT, il ne reste plus qu'il soit diffusé.

- **Le baromètre Carbone des Contrats de Développement Territorial** (voir annexes, fiche 8)

La Caisse des Dépôts a récemment lancé une étude visant à développer une méthodologie de mesure de l'impact et de l'intensité carbone des projets territoriaux inscrits dans les CDT en cours d'élaboration. Cette méthodologie vise la création d'un outil informatique de mesure et d'aide à la décision spécifique au CDT : le « Baromètre Carbone des CDT ». Celle-ci, en cours d'élaboration, est développée par le bureau d'études Energies Demain.

Si cette méthodologie a des objectifs sensiblement différents de la présente étude et ne modifie en rien les conditions d'élaboration de la méthodologie spécifique à l'ensemble du projet, elle peut toutefois constituer une plus-value non négligeable dans la poursuite de notre étude dans la mesure où celle-ci se situe à un stade d'avancement plus avancé (attribution du marché en juillet 2011).

- ⌚ C'est pourquoi, dans l'optique de mener de manière concertée l'élaboration de ces deux méthodologies, une rencontre avec le bureau d'études Energie Demain a eu lieu. Les principaux éléments méthodologiques avancés pour le baromètre carbone des CDT ont été discutés. Des échanges réguliers seront, par la suite, effectués avec ce bureau interne afin d'assurer une bonne coordination entre ces deux études.

- **Le Bilan Carbone® Territoire de l'ADEME pour une « utilisation expérimentale spécifique à l'urbanisme »**

Dans l'attente qu'un outil dédié à l'évaluation des émissions de GES pour les démarches d'urbanisme soit développé, l'ADEME et la DGALN ont travaillé à l'adaptation de l'outil Bilan Carbone® Territoire_V5 aux documents d'urbanisme et aux opérations d'aménagement. Toutefois, cet outil temporaire n'est pas totalement adapté aux objectifs de l'outil visé pour la présente étude :

- ✗ Le tableur ne dispose que de très peu de champs possibles à renseigner ;
- ✗ C'est un outil trop détaillé et trop complexe, plus adapté pour un diagnostic local qu'une étude stratégique.

- **Ener'GES territoires Bretagne**

Pour accompagner les territoires, l'Etat, l'ADEME et le Conseil régional de Bretagne se sont engagés dans la structuration d'une base de données régionale commune d'évaluation des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre. L'outil développé par Energies Demain et Zen-Conseil est constitué d'une base de données et est accessible via une interface web permettant aux collectivités de générer des profils de consommations d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre de l'échelon régional à la commune.

- ✓ L'outil est disponible sur Internet, il est ludique et facilement compréhensible pour l'utilisateur ;
- ✗ Toutefois, aucune indication n'est donnée sur la méthodologie et les données utilisées derrière cet outil de calcul.

1.4.3.4.2 Les outils développés en interne par les bureaux d'étude

Si peu d'outils spécifiques aux émissions carbone liées au développement territorial sont aujourd'hui directement accessibles au grand public, nombreux sont les bureaux d'études à avoir développé en interne des outils de calcul spécialisés sur le sujet. A cause des problèmes de propriété intellectuelle, il est difficile d'effectuer un état de l'art complet de ces outils.

Citons par exemple l'outil EnerTer, développée par le bureau d'études Energies Demain (voir Fiche 9 page 157). C'est un modèle discret (« bottom up ») construit sur une base de données détaillée compilant les informations thermiques et les caractéristiques architecturales relatives à 30 millions de logements de l'Hexagone et, à l'échelle communale, les surfaces réservées au tertiaire (Source : recensement de la population, INSEE, 99). Le logiciel calcule, pour chaque logement et pour l'ensemble des surfaces tertiaires communales, ses consommations énergétiques pour le chauffage, l'ECS et la cuisson en fonction de ses caractéristiques morphologiques et techniques, son occupation et sa localisation.

- ✓ L'outil est construit à partir d'une base de données que l'on peut facilement mettre jour (dynamique) mais il diffère dans ce sens sur l'outil que nous comptons développer qui ne sera pas basé sur un modèle discret mais plutôt sur des agrégations ;
- ✓ EnerTer regroupe l'essentiel des variables entrant en jeu dans les consommations énergétiques du bâtiment en phase « exploitation »
- ✓ Il existe aujourd'hui une version spécifique aux bâtiments tertiaires
- ✗ EnerTer est la propriété d'un bureau d'études privé et n'est pas accessible librement.
- 🕒 Une rencontre avec le bureau d'études Energie Demain a été effectuée. Toutefois, les aspects méthodologiques de cet outil n'ont pas pu être approfondis.

primordial d'inclure dans le bilan global. Cependant, très peu de méthodologies permettent actuellement la prise en compte de ces impacts. Il faudra donc développer de manière importante la méthodologie afin de tenir pleinement compte de l'impact du réseau de transport public du Grand Paris sur le développement territorial.

1.4.4 Conclusions

Il existe plusieurs méthodologies qui permettent de prendre en compte certaines émissions et consommations de GES induites par la mise en place du Réseau de transport public du Grand Paris. Ces méthodologies devront cependant être combinées, adaptées et développées pour répondre de manière adéquate aux enjeux du projet.

Les principaux domaines qui devront être développés concernent :

- Les matériaux de construction : plusieurs méthodologies permettent de prendre en compte les émissions de GES liées à l'utilisation de matériaux de construction et proposent différents facteurs d'émissions. Cependant, étant donné l'envergure de l'infrastructure et des travaux nécessaires, il sera crucial de définir plus précisément les facteurs d'émissions liés aux matériaux de construction
- La mobilité en Ile-de-France : à nouveau, plusieurs méthodologies permettent d'évaluer les émissions induites par les déplacements en véhicules particuliers et en transports en commun. Cependant, ces méthodologies se basent sur des calculs simplifiés qui ne permettent pas de satisfaire la complexité de l'impact du projet. Il faudra donc développer une méthodologie plus détaillée permettant de prendre en compte de manière précise l'impact de la mise en service du réseau de transport public du Grand Paris sur la mobilité en Ile-de-France
- Le développement territorial : le réseau de transport public du Grand Paris aura un impact majeur sur le développement territorial et urbanistique de l'Ile-de-France. Cet impact aura des conséquences majeures sur les émissions de GES de l'Ile-de-France qu'il est

Partie 2 : Développement des lignes directrices de la méthodologie d'évaluation des émissions de GES spécifique au projet de réseau de transport public du Grand Paris

2.1 Introduction

Comme détaillé dans la partie 1, les différentes approches méthodologiques communément utilisées pour évaluer les émissions de GES ne permettent pas, dans leur état actuel, d'étudier en détails des projets d'infrastructures de l'envergure du réseau de transport public du Grand Paris et de prendre en compte l'ensemble des impacts d'un tel projet. Les nombreuses recherches qui ont permis de développer ces méthodologies constituent cependant une base de données importante sur laquelle le développement de l'approche méthodologique spécifique au projet de réseau du Grand Paris pourra s'appuyer.

Il s'agit donc dans cette deuxième partie de développer une méthodologie spécifique en combinant, adaptant et complétant les méthodologies existantes afin de répondre de manière adéquate aux enjeux du projet. Sur base de l'analyse des méthodologies existantes réalisée dans la partie 1 de la présente étude, il s'agit ici de développer les lignes directrices de la méthodologie spécifique au projet de réseau de transport public du Grand Paris. Celles-ci sont définies à partir des considérations générales des méthodologies d'évaluation des émissions de GES puis s'appuient sur des choix méthodologiques. Ensuite, les différentes thématiques spécifiques au projet du Grand Paris sont passées en revue et les modalités de leur intégration dans l'outil de calcul sont précisées.

2.2 Considérations générales

2.2.1 Périmètre du bilan

L'objectif du bilan des émissions de GES du projet du Grand Paris est double : Il s'agit, d'une part, d'avoir une vision éclairée sur l'ensemble des flux de GES induits par le projet afin d'identifier les opportunités de réduction de ces flux et, d'autre part, d'évaluer l'impact global du projet sur les changements climatiques.

Pour atteindre ces objectifs il paraît nécessaire d'adopter une approche globale permettant de prendre en compte l'ensemble des émissions directes et indirectes et donc d'évaluer non seulement les émissions dont le projet est responsable mais aussi les émissions que le projet nécessite ou induit sans être directement l'auteur.

Il s'agit donc d'une approche globale, similaire à celle préconisée par la méthodologie Bilan Carbone® et à celle du GHG Protocol de champ 3 (voir partie 1, § 4.1.1). Tout comme dans le Bilan Carbone®, la méthodologie proposée s'aligne donc au maximum avec la réalité physique et inclut les émissions dès que le niveau des connaissances scientifiques le permet. Ainsi, en plus des GES repris dans le protocole de Kyoto (CO₂, CH₄, N₂O, C_nH_mF_p, C_nF_{2n+2}, SF₆), les gaz de l'accord de Montréal, la vapeur d'eau stratosphérique, les C.O.V. et les NO_x seront intégrés lorsque cela sera possible.

Prise en compte des différents GES et unité de référence :

L'influence des différents GES sur le réchauffement du système climatique de la planète varie selon les propriétés radiatives de ces gaz et de leur durée de vie dans l'atmosphère. En effet, plus un gaz réfléchit les rayons infrarouges vers la terre et plus il perdure dans l'atmosphère, plus son impact sur le réchauffement du climat est important.

L'influence des différents GES sur le réchauffement du climat est donc comparée grâce à leur Pouvoir de Réchauffement Global (PRG). Le PRG_(n) est le rapport entre le forçage radiatif sur une durée de n années engendré par kg de gaz et la même grandeur par kg de CO₂. Le CO₂ a donc été choisi par convention comme gaz de référence pour la comptabilisation dans les bilans d'émissions. Le PRG du CO₂ est par conséquent toujours égal à 1, quel que soit le nombre (n) d'années considéré. Plus le PRG_(n) d'un autre gaz est élevé, plus l'effet de serre engendré sur n années par le relâchement d'un kg de gaz dans l'atmosphère est important.

En général, les méthodologies sont fondées sur les PRG₍₁₀₀₎ ce qui correspond donc à comparer l'impact d'un kg de gaz par rapport à un kg de CO₂ sur une durée de 100 ans. L'unité de calcul est alors l'équivalent CO₂. C'est l'unité que nous adopterons dans le cadre de la présente étude. Les valeurs de durée de vie, d'efficacité radiative et de PRG₍₁₀₀₎ sont données pour les principaux GES dans le tableau ci-dessous :

| Nom | Formule chimique | Durée de vie (années) | Efficacité radiative (W m ⁻² ppb ⁻¹) | PRG ₍₁₀₀₎ |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------|---|----------------------|
| Dioxyde de carbone | CO ₂ | - | 1.4 x 10 ⁻⁵ | 1 |
| Méthane | CH ₄ | 12 | 3.7 x 10 ⁻⁴ | 25 |
| Oxyde nitreux | N ₂ O | 114 | 3.03 x 10 ⁻³ | 298 |
| CFC-12 | CCl ₂ F ₂ | 100 | 0.32 | 10 900 |
| HCFC-22 | CHClF ₂ | 12 | 0.2 | 1810 |
| ... | ... | ... | ... | ... |

Tableau 6 : formule chimique, durée de vie moyenne, efficacité radiative et PRG des principaux GES. Source : IPCC 2007, WG1 The physical science basis, 2.10.2 Direct Global Warming Potentials.

Outre l'équivalent CO₂, une autre unité est couramment utilisée : l'équivalent carbone. Il correspond à la masse du carbone seul dans le composé CO₂. La masse atomique du carbone étant égale à 12.0107 et la masse moléculaire du CO₂ étant égale à 44.0099 (=12.0107+15.9994 x 2), le rapport entre les deux est de 12.0107/44.0099 = 0.2729. Une téq CO₂ est donc égale à 0.2729 téq C et à l'inverse, une téq C est égale à 3.6643 téq CO₂.

2.2.2 Procédure de calcul et facteurs d'émissions

La procédure classique en 4 phases a été retenue : (i) les postes importants d'émissions de GES sont identifiés, c'était l'objectif de la partie 1 de ce rapport, (ii) une méthodologie de calcul adaptée aux besoins et aux postes d'émissions identifiés est sélectionnée, dans le cas présent, une méthodologie spécifique a été développée pour pouvoir prendre en compte l'ensemble des enjeux du projet, (iii) les données relatives aux différents postes sont collectées et (iv) la méthodologie de calcul est appliquée, ces deux dernières phases seront réalisées dans le cadre des études d'impact environnemental du réseau de transport public du Grand Paris.

Pour estimer les émissions correspondant à un poste, on aura recours à des facteurs d'émissions (FE) et la méthode de calcul suivra donc un schéma commun de type :

$$\text{Données de l'activité} \times \text{Facteur d'émissions} = \text{Emissions de GES}$$

Les facteurs d'émissions convertissent les données techniques introduites par l'utilisateur (« inputs ») dans le modèle en équivalent carbone. Ils détermineront donc les données d'entrée nécessaires que l'utilisateur devra obtenir pour pouvoir procéder au calcul des bilans. Leur sélection devra donc se faire de façon stratégique afin de rendre l'obtention de données sur les différents postes d'émissions la plus aisée possible.

2.2.3 Type d'outil de calcul

Etant donné la complexité du projet et son évolution continue vers plus de précisions, il est crucial que l'outil puisse être modifié facilement par l'utilisateur afin de s'adapter aux éventualités futures. Un outil de calcul sous forme de classeur Microsoft Excel s'impose donc comme la meilleure solution par rapport aux objectifs et contraintes du projet.

L'évaluation des consommations et émissions de CO₂ devra pouvoir se faire, non seulement à l'échelle globale du projet, mais aussi à l'échelle de chaque tronçon. L'outil devra donc permettre d'exploiter des données de différents niveaux de précision. L'outil de calcul proposera donc plusieurs entrées possibles en fonction des données disponibles. L'outil sera ainsi applicable à l'échelle globale mais aussi à une échelle plus localisée en prenant en compte les émissions et consommations de CO₂ spécifiques aux différents tronçons.

Les tableurs Excel seront constitués d'une série de feuilles de calcul relatives aux différents postes d'émissions, aux facteurs d'émissions retenus et aux résultats des bilans.

Les différentes feuilles constitutives seront principalement :

- Une première feuille décrivant la structure et l'organisation de l'outil avec tous les renvois permettant de se diriger vers les feuilles désirées (voir Figure 55).



Figure 55 : page d'accueil de l'outil de calcul spécifique au Réseau de transport public du Grand Paris

- Les feuilles d'encodage des informations par l'utilisateur (inputs). Il y aura une feuille par thème (Etudes et travaux préalables, facteurs liés à la construction de l'infrastructure, émissions liées au fonctionnement de l'infrastructure, évolution de la mobilité, facteurs liés au développement du territoire).

Chaque feuille contiendra une série de cadres permettant le calcul à partir d'informations plus ou moins précises (ex : Figure 56). Un code couleur sera mis en place afin de bien montrer à l'utilisateur les cases à remplir avec les données d'entrée (en gris), les cases reprenant les facteurs d'émissions (en rouge) et les cases détaillant les résultats (en vert).

Les données, les facteurs d'émissions et les résultats seront détaillés par année (horizontalement). Les émissions de CO₂ calculées pour chaque poste d'émissions ainsi que au total pour la thématique en question seront présentées en bas du tableau.

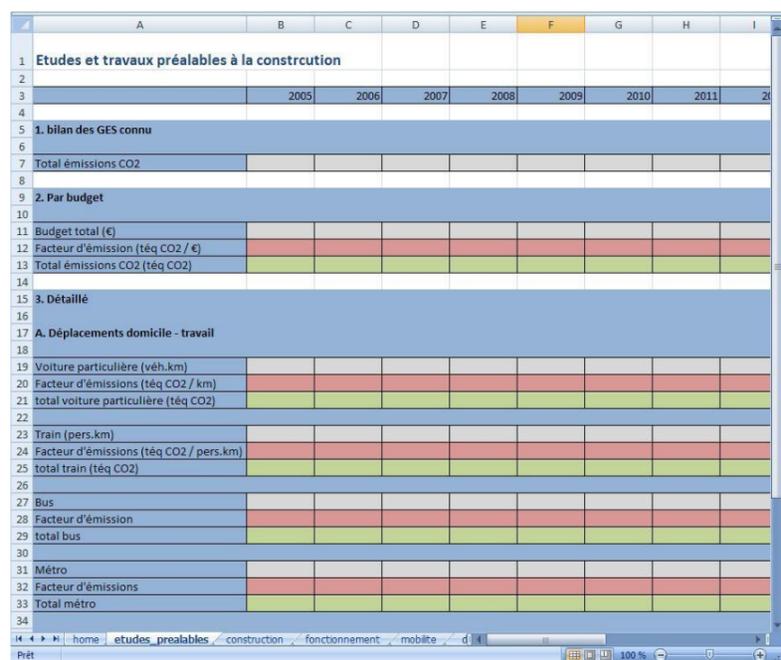


Figure 56 : représentation schématique du tableau de calculs des émissions de GES liées aux études et travaux préalables à la construction

Les feuilles suivantes du classeur Excel seront :

- Une feuille reprenant tous les facteurs d'émissions. Ceux-ci seront par ailleurs décrits et référencés dans un document annexe.
- Une feuille présentant le bilan global des émissions de GES pour l'entièreté du projet et son évolution tout au long de la durée de vie de l'infrastructure.
- Une feuille présentant les émissions de GES par thématique et l'importance des différentes sources. Cette feuille contiendra une série de graphiques présentant les différents postes d'émissions et permettant une analyse aisée des bilans.

2.3 Considérations spécifiques

2.3.1 Energies

2.3.1.1 Energie du réseau électrique

Comme précisé dans la partie 1 du rapport (§ 4.2.1) il n'y a pas une seule façon de définir un facteur d'émissions d'une énergie de réseau mais plusieurs possibilités :

- facteur d'émissions moyen,
- par distinction du producteur
- selon le profil horo-saisonnier de l'usage
- marginal : contenu en CO₂ du kWh marginal d'électricité (dernier kWh appelé ou premier kWh non utilisé) pour un usage donné (lié à l'ajustement temps réel de l'offre/demande avec le pilotage des différents moyens de production),

- marginal en développement, qui, par rapport au précédent, prend en compte les éléments prospectifs du parc de production, ...

Chacune de ces méthodes a ses avantages et ses inconvénients (exactitude, transparence, simplicité d'usage) et répond à un besoin d'évaluation du kWh électrique différent. Le mode de calcul du facteur d'émissions dépend donc du contexte de l'étude et du niveau de détail dont on dispose.

Les définitions des émissions marginales et des émissions marginales en développement sont adaptées pour piloter un réseau électrique (ou son développement) et chercher à optimiser quels moyens de production sont à mobiliser et quels moyens sont à arrêter. Des contraintes physiques supplémentaires sont prises en compte pour cette priorisation (inertie des centrales selon les technologies, ressources disponibles : hydraulique de barrage par exemple...). Par ailleurs, au-delà du point de vue comptable, il est inapproprié d'imputer à des nouveaux consommateurs un tel facteur d'émissions : ces nouveaux usages seront alimentés en fonction de leur profil horo-saisonnier par des moyens de production de base (pour les usages peu variables dans le temps), de pointe (pour les usages variables)... De plus, des technologies émergent pour réguler les consommations et atténuer ou déphaser des périodes de pointe : effacements (arrêts ou reports de consommation) et usage pilotés, couplés à un réseau de distribution de l'électricité « intelligent » (smart-grid). A moyen terme, il est envisageable de passer d'une logique de pilotage de la production à une logique de pilotage des consommations.

La définition du facteur d'émissions avec une approche par producteur, horo-saisonnier par usage ou moyen global est plus adaptée à notre situation et le choix entre ces variantes est moins aisé à trancher.

Le facteur d'émissions par producteur permet de tenir compte de la réalité du contrat d'approvisionnement : dans le cas où un consommateur ne souscrit pas au tarif historique (« tarif régulé ») mais contractualise directement avec un producteur (EDF, EON-SNET, Enercoop...), le producteur doit en retour approvisionner en temps réel la demande du consommateur. A défaut, l'opérateur de réseau (RTE) pallie à la demande et inflige une pénalité financière significative au producteur ; ce dispositif est suffisamment dissuasif pour que les producteurs ne soient pas régulièrement défaillants. Il y a donc correspondance physique réelle entre la consommation et les moyens de production. Cependant, la majorité des consommateurs restent en tarification historique. Le choix d'un producteur plutôt qu'un autre n'influence donc que mineure le réseau, d'autant plus que les producteurs excédentaires revendent leur production à des négociants opérateurs en énergie (Powéo, Direct-énergie, mécanismes d'offres RTE...). Le facteur d'émissions par producteur nécessiterait de connaître le mode d'approvisionnement en électricité du réseau de transport public du Grand Paris, des infrastructures associées (gares, bâtiments techniques), mais également du bâti, ce qui, à ce stade du projet, n'est pas le cas ; cette méthode n'est donc pas adaptée aux besoins de l'étude.

Le facteur d'émission horo-saisonnier selon le profil d'usage (chauffage hivernal, éclairage, usage intermittent, usage en base) nous paraît adapté pour tenir compte des moyens mobilisés à l'échelle du réseau. C'est d'ailleurs une des approches qui a été retenue dans le cadre des bilans d'émissions de GES rendus obligatoires suite au Grenelle 2 (décret n°2011-829). Si cette définition est applicable à l'heure actuelle, il est cependant très délicat de définir les valeurs correspondantes dans 20 ans : ces facteurs sont très liés à l'évolution du parc de production et aux technologies de régulation (effacement, smart-grid...).

On préférera donc en définitive le calcul par facteur d'émission moyen du réseau (l'autre approche possible dans les bilans d'émissions de GES rendus obligatoires par le décret n°2011-829). Ce facteur d'émission est défini par le rapport de l'ensemble des émissions annuelles du parc de production par l'ensemble des émissions de GES générées. Cette définition permet d'avoir une vision prospective en intégrant l'évolution des moyens de production au cours du temps. C'est également cette approche qui a été retenue par RFF dans le cadre des bilans d'émissions

des LGV.⁶⁴ Les valeurs récentes du facteur d'émissions moyen français varient entre 75 et 90 g de CO₂ par kWh produit (en sortie de centrale, hors perte en ligne et de transformation). Pour l'évolution d'ici 2050, nous proposons de prendre les mêmes hypothèses que celles retenues dans le cadre du Bilan Carbone de la LGV Rhin-Rhône, à savoir un facteur d'émissions de l'ordre de 60 g éq CO₂/kWh en 2020, qui est un chiffre prévisionnel RTE (Réseaux de Transport d'Electricité), et 50 g éq CO₂/kWh à horizon 2050, hypothèse qui avait été formulée par l'ADEME lors du travail avec RFF.

Les facteurs d'émissions correspondants sont représentés graphiquement ci-après. Concernant les valeurs historiques, certaines années n'ont pas pu être trouvées, ce qui explique les ruptures dans la courbe.

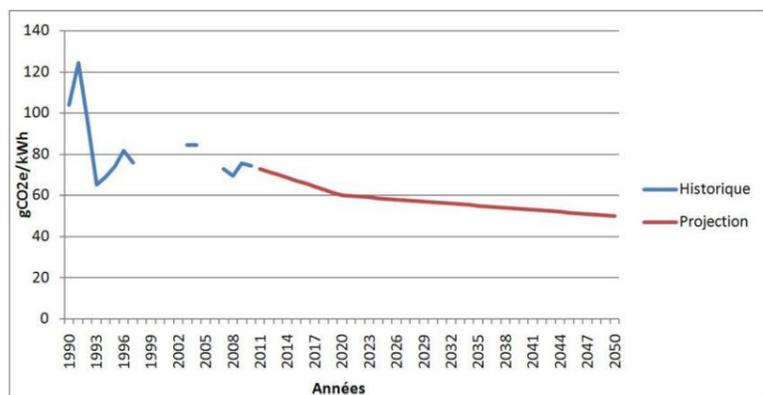


Figure 57 : facteur d'émissions moyen français de l'électricité (source : ADEME, RTE).

La prospective concernant le contenu carbone de l'électricité à l'horizon 2050 est un exercice périlleux, vu les incertitudes portant sur la filière nucléaire et sur l'évolution du parc thermique. Notons également la grande variabilité possible à court terme sur le contenu carbone moyen qui s'est vu, par exemple, diviser par deux entre 1991 et 1993. Les ordres de grandeur retenus nous semblent raisonnables et cohérents avec un maintien ou un renforcement des technologies faiblement émettrices de GES (nucléaire, renouvelable), le démarrage du captage et séquestration du carbone (CSC) et le pilotage des consommations et des réseaux, rendant possible une réduction de la pointe (approvisionnée généralement par des techniques fortement émettrices).

Il est également important de souligner la particularité du cas français en ce qui concerne l'électricité. Les chiffres proposés ci-dessus ne seraient absolument pas valables ailleurs en Europe. L'origine majoritairement nucléaire du kWh produit en France dans les centrales d'EDF ne se retrouve en effet dans aucun autre pays européen, et chez aucun autres gros producteurs. Le contenu carbone en Europe est de 337 g éq CO₂/kWh, très nettement supérieur à la moyenne française, mais devrait être amené à baisser fortement d'ici 2050 grâce au développement des énergies renouvelables. Le contenu carbone en France, déjà extrêmement bas, ne perdrait par contre qu'environ 20 g éq CO₂/kWh en 40 ans. Le graphique ci-dessous, qui présente les émissions des principaux producteurs européens en fonction de leur production, illustre la situation particulière d'EDF dans le paysage de l'électricité en Europe :

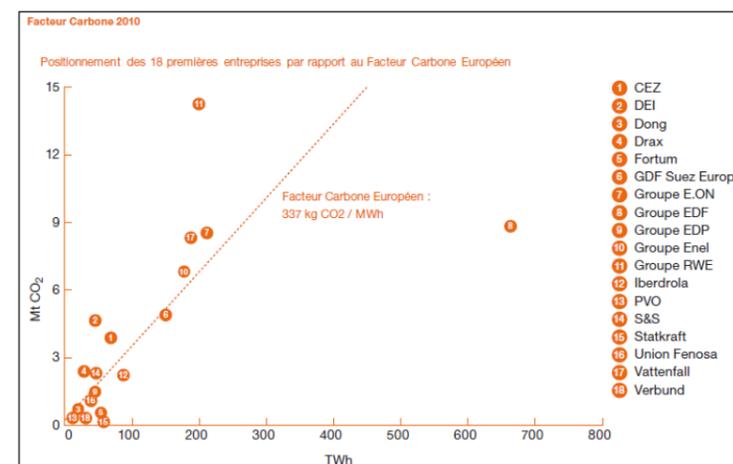


Figure 58 : facteurs d'émissions moyens des principaux producteurs d'électricité en Europe en 2010 (source : PwC – Changement climatique et électricité).

2.3.1.2 Carburants

La définition des facteurs d'émissions permettant la prise en compte de l'utilisation de carburants est primordiale dans le cadre de cette étude et doit être faite avec grande attention. En effet, plusieurs postes d'émissions (notamment l'utilisation des voitures et le chauffage des bâtiments) induisent l'utilisation de carburants divers (essence, mazout, gaz naturel,...) et seront influencés de manière importante par le projet du Grand Paris.

Les facteurs d'émissions relatifs à l'utilisation de carburants doivent donc être définis de manière précise afin de réduire au maximum les erreurs sur les résultats finaux. Outre les émissions libérées lors de la combustion, il sera aussi crucial d'intégrer les émissions liées à l'extraction, au raffinage et au transport de ces carburants. Les facteurs d'émissions devront également prendre en compte l'amélioration de l'efficacité énergétique des processus industriels ainsi que l'accroissement de la proportion de biocarburants utilisés.

Emissions actuelles :

Dans le cadre de la définition des facteurs d'émissions utilisés dans la méthode Bilan Carbone®, l'ADEME a procédé à un travail intéressant d'analyse des émissions liées à l'utilisation de carburants sur base des données de l'ADEME, de l'Observatoire de l'Energie, du Comité Professionnel du Pétrole, du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable et de la Commission Européenne. Les facteurs d'émissions trouvés sont les suivants :

| Carburant | Emissions de combustion | Emissions liées au raffinage | Extraction et transport amont | Emissions totales |
|----------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| | | | | kg éq. CO ₂ / kg |
| GPL | 2.931 | 0.328 | 0.223 | 3.482 |
| Essence | 3.197 | 0.321 | 0.223 | 3.741 |
| Gazole et Fuel | 3.135 | 0.113 | 0.223 | 3.471 |
| Gaz Naturel | 2.814 | 0.500 | | 3.314 |

Tableau 7 : Facteur d'émissions des carburants. Source : Guide des facteurs d'émissions, V6.1, ADEME 2010

⁶⁴ Bilan Carbone de la LGV Rhin-Rhône : <http://www.bilan-carbone-lgvrr.fr/userfiles/file/documents/BC5.pdf>

La méthode Defra (UK) propose également des facteurs d'émissions distinguant les émissions de combustion et les émissions indirectes. Les références sur lesquelles se basent ces facteurs sont différentes (UK GHG Inventory, AEA, 2009 et Digest et UK statistics, DECC, 2010) et ce travail permet donc une comparaison intéressante avec les facteurs préconisés par l'ADEME.

| Carburant | Emissions de combustion | Emissions indirectes | Emissions totales |
|---|-----------------------------|----------------------|-------------------|
| | kg éq. CO ₂ / kg | | |
| GPL | 3.157 | 0.602 | 3.759 |
| Essence avec biocarburants ¹ | 2.974 | 0.559 | 3.532 |
| Essence sans biocarburants | 3.062 | 0.544 | 3.606 |
| Diesel avec biocarburants ² | 3.044 | 0.633 | 3.677 |
| Diesel sans biocarburants | 3.157 | 0.602 | 3.759 |
| Gaz naturel | 2.747 | 0.344 | 3.091 |

Tableau 8 : Facteurs d'émissions des carburants. Source : Guidelines to Defra/DECC's GHG conversion factors for company reporting, Defra, 2011. ¹ 2.9% en volume de bioéthanol, ² 3.6% en volume de biodiesel.

On peut remarquer que les valeurs sont relativement cohérentes entre les deux méthodes. Nous avons donc retenu d'utiliser les valeurs de l'ADEME car ce sont celles qui sont le plus adaptées à la situation française et car elles sont acceptées et fréquemment utilisées en France. Les valeurs de l'ADEME sont définies sur base de travaux réalisés en 2005, nous les ferons donc évoluer dans le temps à partir de cette période (voir ci-dessous).

Evolution au cours du temps suite à l'amélioration des techniques industrielles :

Comme la plupart des procédés industriels, il est attendu dans le futur que de nouvelles technologies permettent d'améliorer l'efficacité énergétique des processus de production et d'acheminement des carburants. Ces améliorations ne concernent nullement les émissions de combustion et ne seront donc appliquées qu'aux émissions amonts, c'est-à-dire celles liées à l'extraction, au raffinage et au transport des carburants.

En ce qui concerne l'estimation de ces améliorations, nous utiliserons les mêmes taux que ceux de l'étude du Centre d'Analyse Stratégique présidée par J. Syrota sur les perspectives énergétiques de la France⁶⁵. Ces taux considèrent une amélioration de 0.3 à 0.45 % par an de l'efficacité énergétique des procédés industriels. Nous retiendrons une évolution de 0.3% par an à partir de 2005, et donc une réduction de 13.5 % des émissions liées à l'extraction au transport et au raffinage des carburants entre 2005 et 2050.

Evolution au cours du temps suite à l'intégration croissante de biocarburants :

Les biocarburants ou biofuels sont les carburants obtenus à partir de matières organiques non fossiles. Ils proviennent donc de la transformation de biomasse principalement végétale (parfois animale ou même bactérienne). On distingue les biocarburants de première génération issus de cultures à vocation strictement énergétique (colza, tournesol, maïs, betterave, palmier à huile, etc.) dont ont extrait le sucre, l'amidon ou l'huile et les biocarburants de seconde génération issus

de des sous-produits et déchets agricoles souvent ligno-cellulosiques (bois, feuilles, paille, etc.) et qui ne peuvent pas servir à l'alimentation humaine.

Deux familles de biocarburants sont actuellement développées en France :

- le biodiesel ou Esters méthyliques d'huile végétale (EMVH) : issu principalement du colza ou du tournesol, il est incorporé au gazole (autorisé jusqu'à 7 % en volume sans modification du moteur). Les EMVH peuvent également provenir de graisses animales (approximativement 10% de la production de biodiesel en 2010).
- le bioéthanol : alcool éthylique d'origine agricole, issu de betteraves sucrières ou de graines de céréales, il est incorporé à l'essence, soit en l'état, soit sous forme d'ETBE (Ethyl-tertio-butyl-ether) (tous deux jusqu'à 10 % en volume d'éthanol sans modification du moteur). Il peut également être utilisé dans des véhicules adaptés (jusqu'à 85 % d'éthanol dans le carburant).

Comme expliqué dans le paragraphe 4.2.2 de la partie 1, les quantités de GES prises en compte dans les calculs de bilan correspondent à la contribution à l'accroissement de la concentration atmosphérique en GES plutôt qu'aux émissions en tant que telles. Dans le cas des biocarburants, les émissions provenant de leur combustion sont issues de la photosynthèse et ne participent donc pas nécessairement à l'augmentation des concentrations de GES.

La question est (i) de savoir si les émissions de combustion sont contrebalancées entièrement par la photosynthèse (ex : gestion forestière durable, agriculture durable) ou si par contre, les émissions ne sont pas contrebalancées entièrement par la photosynthèse (ex : déforestation, appauvrissement du sol, ...) et (ii) d'estimer l'énergie nécessaire à la production des biocarburants.

C'était un des objectifs de l'étude « Analyses de Cycle de Vie (ACV) appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France » de l'ADEME (2010). Il ressort de cette étude que les biocarburants ont un impact sur les émissions de GES positif sous conditions et contrasté selon les filières de production. Les émissions provenant des éthanol varient entre 22.6 g éq CO₂ / MJ pour la canne à sucre et 43.5 g éq CO₂ / MJ pour le blé contre 101.8 g éq CO₂ / MJ pour l'essence fossile. Les esters incorporés dans le diesel et produits à partir de matières végétales varient quant à eux entre 20.2 g éq CO₂ / MJ pour le soja et 38.5 g éq CO₂ / MJ pour le Colza contre 96.0 g éq CO₂ / MJ pour le diesel fossile.

Ces émissions proviennent principalement de l'étape agricole (fabrication des engrais appliqués et émissions de protoxyde d'azote dans les champs). Il est important de noter que les calculs des émissions ont été faits sans intégrer les changements d'affectation des sols faute de travaux et d'informations précises sur le sujet.

Les bienfaits des biocarburants de première génération sont par ailleurs sujet à de vives controverses (i) pour leurs effets pervers sur le prix des aliments et sur les crises alimentaires⁶⁶ en raison de leur concurrence avec des produits agricoles alimentaires et (ii) pour les interrogations qui subsistent quant aux bienfaits réels en termes environnementaux. La prise en compte des changements d'affectation des sols pourraient notamment modifier grandement les résultats de l'étude de l'ADEME⁶⁷, voire potentiellement les inverser. Par ailleurs, leurs coûts de production sont élevés⁶⁸ et leur potentiel de substitution de plus larges quantités de carburants fossiles est limité. Il est vrai que s'il on accepte que l'être humain consomme actuellement plus que ce que la terre ne peut produire⁶⁹, il en découle que l'utilisation de surfaces agricoles pour la

⁶⁶ Les biocarburants accusés d'exacerber la crise alimentaire, Le Monde, 14/04/2008

⁶⁷ Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France, Synthèse, ADEME, 2009.

⁶⁸ N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels, Crutzen P. J., Mosier, A.R., Smith, K. A., Winiwarter, W., Atmospheric Chemistry and Physics, 2008.

⁶⁹ Tracking the ecological overshoot of the human economy, Wackernagel et al. 2002, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.

⁶⁵ Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 : rapport de la commission Energie présidée par Jean Syrota, Centre d'Analyse Stratégique, 2007.

production de biocarburant contribue à un appauvrissement supplémentaire des terres et donc à une augmentation des émissions de GES.

Malgré ces incertitudes, nous nous référons au rapport « Analyses de Cycle de Vie (ACV) appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France » de l'ADEME (2010) pour la prise en compte des biocarburants dans le bilan des émissions de GES. En effet :

- Les biocarburants de deuxième génération peu utilisés pour l'instant, vont être amenés à se développer de plus en plus et à constituer une proportion croissante des biocarburants. Ces biocarburants fabriqués à partir des résidus ou des déchets d'origine agricole, sylvicole, industrielle, urbaine ou ménagère, ont généralement un coût de production plus faible et apparaissent comme une voie plus prometteuse et plus efficace pour diminuer les émissions de GES liés à la production des biocarburants.
- L'impact du réseau de transport public du Grand Paris sur la consommation de carburants se fera principalement au niveau des transports en réduisant l'utilisation de la voiture particulière. La prise en compte d'un facteur d'émissions moins important pour les biocarburants que pour les carburants fossiles réduira donc les émissions évitées grâce au projet. Nous adoptons donc une approche conservatrice afin de ne pas inclure des impacts positifs non démontrés et qui pourraient être sujet à la controverse.

Bien qu'il soit possible d'utiliser délibérément des biocarburants avec des véhicules spécifiques, il semble peu probable que cette filière ne se développe de manière importante dans les 10 à 20 prochaines années. Les biocarburants sont par contre incorporés progressivement dans les carburants traditionnels, il est donc intéressant de prendre en compte cette incorporation dans le bilan des émissions de GES.

En 2006, 631 000 t de biodiesel et 235 000 t de bioéthanol ont été mis à la consommation en France, soit respectivement 1,77% et 1,75% de la consommation française de gazole et d'essences⁷⁰. En 2007 3.57 % de la consommation française de gazole et d'essence provenait des biocarburants⁷¹ et en 2009, 7.8 %⁷².

Les perspectives futures sont guidées par la directive 2009/28/CE sur la promotion des énergies renouvelables, adoptée le 23 avril 2009 qui remplace les règles précédentes (directive 2003/30/CE) par des objectifs contraignants pour les États membres. La part de marché des biocarburants sur le marché des carburants destinés aux transports doit être de 10 % à l'horizon 2020. Il apparaît donc qu'il y aura une forte diminution de croissance dans les années futures par rapport à celle observée entre 2006 et 2009.

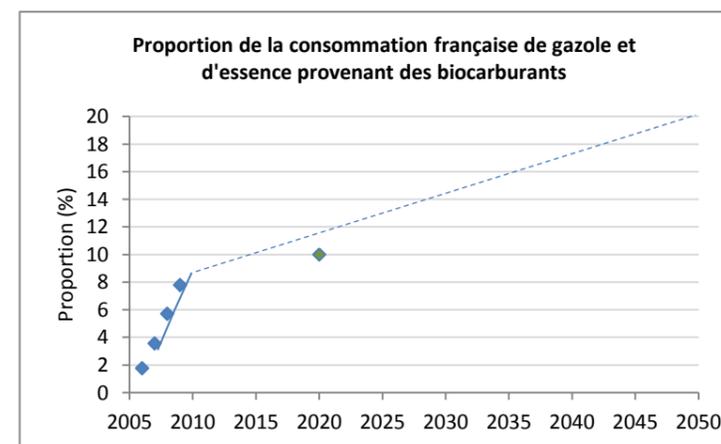


Figure 59 : Evolution observée et tendancielle de la proportion de la consommation française de gazole et d'essence provenant des biocarburants. La ligne continue relie les données observées, la ligne pointillée représente la tendance à venir la plus probable et (◆) représente les objectifs européens pour 2020. Source : Stratégie 2011.

Cette diminution de croissance s'explique notamment par les surfaces agricoles limitées pouvant être utilisées pour la production de biocarburants, par les impacts controversés sur l'environnement et par les craintes grandissantes relatives aux conséquences sur le prix des aliments. Le ministre Borloo, en charge de l'Ecologie a d'ailleurs exprimé la volonté de la France de faire une pause dans les biocarburants de première génération et de mettre le cap vers ceux de seconde génération⁷³. Les biocarburants de seconde génération étant plus difficiles à mettre en œuvre, on peut donc s'attendre à un ralentissement de la croissance des biocarburants déjà observable sur les chiffres de production pour les années 2009 et 2010 (voir Figure 60)

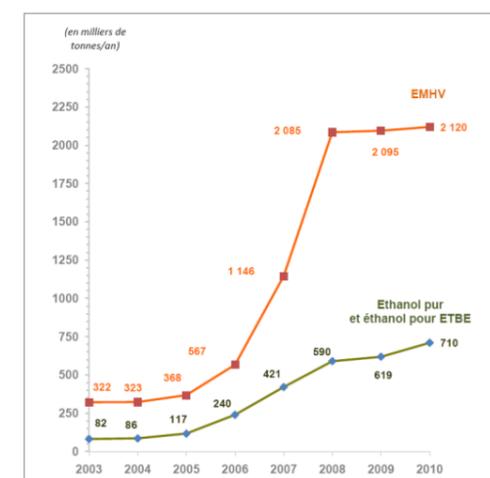


Figure 60 : Evolution de la production de biocarburants en France. Source http://www.ufip.fr/?rubrique=1&ss_rubrique=323&inner=328&ss_inner=419&id=f_17

Etant donné l'avance de la France par rapport aux objectifs européens (déjà plus de 7 % du gazole et de l'essence provenant des biocarburants en 2010), on peut s'attendre à atteindre l'objectif de 10 % avant 2020. Ensuite, l'évolution la plus probable est une prolongation de cette croissance dans le temps jusqu'à atteindre approximativement 20 % en 2050 (voir Figure 59).

⁷⁰ Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire. <http://agriculture.gouv.fr/la-politique-francaise-de>

⁷¹ Rapport annuel 2008 de la France à la Commission Européenne dans le cadre du suivi de la directive européenne 2003/30/CE dans Guide des Facteurs d'Emissions V6.1, ADEME 2010.

⁷² Union Française des Entreprises Pétrolières <http://www.ufip.fr>

⁷³ La France veut faire une pause dans les biocarburants de 1^{ère} génération, L'express, 23/04/2008, www.lexpress.fr.

Le calcul du facteur d'émissions pour les biocarburants est repris dans le tableau ci-dessous :

| Biodiesel | Origine | Emissions du champ à la roue g éqCO ₂ /MJ | Emissions moyennes g éqCO ₂ /MJ | Comparatif énergies fossile g éqCO ₂ /MJ |
|----------------|---------|--|--|---|
| Colza | 70 % | 38.5 | 31.22 | Diesel : 96 |
| Tournesol | 10 % | 26.3 | | |
| Huiles usagées | 20 % | 8.2 | | |
| Ethanol | Origine | Emissions du champ à la roue g éqCO ₂ /MJ | Emissions moyennes g éqCO ₂ /MJ | Comparatif énergies fossile g éqCO ₂ /MJ |
| Betterave | 35 % | 27.6 | 37.02 | Essence : 101.8 |
| Blé | 51 % | 43.5 | | |
| Maïs | 14 % | 37 | | |

Tableau 9 : Cultures d'origine et facteurs d'émissions des biocarburants en France. Sources : origines : Biocarburants 2010 : Quelles utilisations des terres en France, 2007, Office National Interprofessionnel des Grandes Cultures (ONIGG), Emissions : Analyses de Cycle de Vie (ACV) appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France, ADEME, 2010.

Les différences entre les émissions moyennes provenant des biocarburants (biodiesel et bioéthanol) et des énergies fossiles seront utilisées pour tenir compte de l'intégration progressive des biocarburants au cours du temps.

2.3.2 Recyclage et valorisation énergétique des déchets

2.3.2.1 Matériaux recyclés

L'utilisation de matériaux recyclés peut être prise en compte de différentes façons dans un bilan d'émissions. Le bénéfice en termes d'émissions de GES du recyclage peut être comptabilisé :

- en amont de l'utilisation, dans la logique d'une valorisation du choix à la construction d'un matériau recyclé plutôt que neuf,
- en aval de l'utilisation, à la gestion des déchets mis à recycler, dans la logique d'une valorisation de la volonté de recycler le matériau en fin de vie.

Dans le cas d'une infrastructure ferroviaire immobilisant le matériau pour plusieurs dizaines d'années, la première approche nous semble plus pertinente.

Cas des métaux

L'essentiel des matériaux utilisés pour la construction du métro et pouvant être recyclés concerne les métaux et en particulier l'acier et l'aluminium, pour lesquels la demande en matériaux recyclés dépasse actuellement l'offre, malgré de très bons taux de recyclage. En effet, les matériaux aujourd'hui en fin de vie ont été produits en majorité autour des années 70 et 80 (durée de vie de 30 à 40 ans), périodes pendant lesquelles les productions d'acier et d'aluminium étaient très inférieures aux productions actuelles. Mis à part dans le cas improbable d'une réduction importante de la consommation mondiale, une grande partie de la production d'acier et d'aluminium continuera donc à provenir de l'extraction de minerais.

La quantité totale de matériaux recyclés étant limitée par l'offre et non pas par la demande ; une demande de matériaux recyclés n'impliquera pas une plus grande production de matériaux recyclés.

Nous préconisons donc, pour l'acier et l'aluminium, de se limiter à un facteur d'émissions moyen, calculé en fonction des facteurs d'émissions de la matière neuve et de la matière recyclée (chiffres fournis par Bilan Carbone®) et de la part de matériaux recyclés dans la production totale. C'est le choix méthodologique qui a été fait par RFF pour son calculateur carbone LGV (facteur d'émissions de l'acier de 600 kg éq C par tonne).

Les graphiques ci-dessous présentent les différents facteurs d'émissions disponibles dans plusieurs outils pour l'acier et l'aluminium : ceux du Bilan Carbone®, basés sur une recherche bibliographique relativement exhaustive, ceux choisis par RFF et la FNTF pour leurs outils de calcul d'émissions, et enfin ceux de l'Université de Bath, qui compilent des données du Royaume-Uni et de l'Europe.

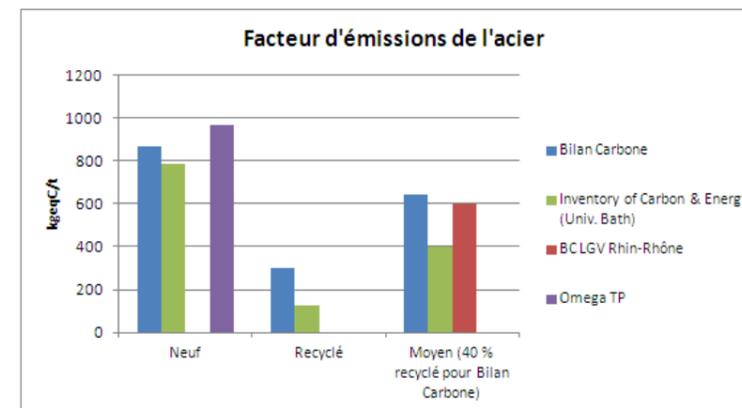


Figure 61 : facteurs d'émissions de l'acier.

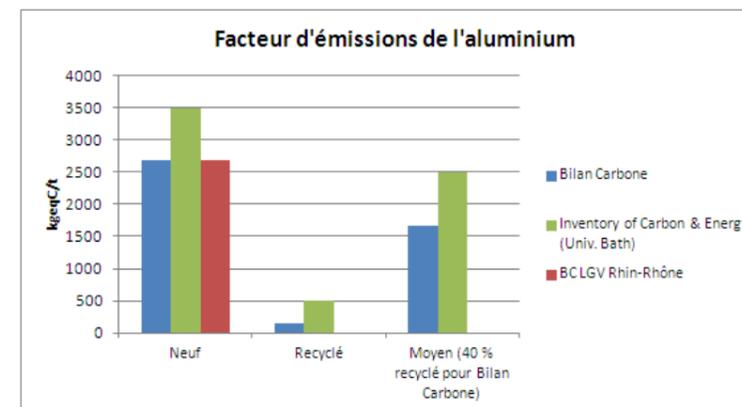


Figure 62 : facteurs d'émissions de l'aluminium

Les facteurs d'émissions moyens dans le cas du Bilan Carbone® ont été établis par interpolation à partir des facteurs d'émissions du neuf et du recyclé pour 40 % de matériaux recyclés, valeur observée en Europe, en ordre de grandeur, pour l'acier et l'aluminium.

Cas du béton

Le béton issu de la déconstruction des bâtiments et ouvrages d'art peut servir après tri et concassage de ressources en granulats. Ces granulats recyclés sont utilisés en quasi-totalité pour

des usages routiers, en particulier dans les couches de fondation. L'utilisation de granulats recyclés dans la fabrication de béton en est à ses balbutiements. Des études sont actuellement en cours pour préciser les utilisations possibles des granulats recyclés dans les différents types de bétons et évaluer le nombre de recyclages successifs qui peuvent être opérés sur les matériaux de démolition. Les premiers résultats⁷⁴ ont montré que les bétons utilisant une partie de granulats recyclés sont poreux avec des valeurs de perméabilité deux fois plus élevées que celles des bétons de granulats naturels, et que leurs propriétés physiques et mécaniques décroissent à mesure que le taux de granulats recyclés augmente dans la composition. L'utilisation de granulats recyclés ne semble donc pas possible pour la fabrication des bétons relativement techniques des infrastructures du réseau de transport public du Grand Paris. Par conséquent, les calculs d'émissions se feront à partir des facteurs d'émissions du béton neuf.

Le facteur d'émissions du béton neuf peut varier du simple au triple en fonction de ses caractéristiques (proportion de ciment principalement). A l'aide de retours d'expérience (littérature et entretiens techniques), trois ou quatre grandes catégories de bétons seront définies, correspondant aux volumes les plus importants, soit a priori le béton pour les tunnels, le béton pour les bâtiments (gares, bâtiments techniques) et le béton pour les ouvrages d'art. La base de données INIES⁷⁵ et la base de données de facteurs d'émissions de l'Université de Bath (Inventory of Carbon & Energy), entre autres, permettront d'associer des facteurs d'émissions à ces catégories.

Cas des déblais/remblais

La grande majorité des voies ferrées sera creusée au tunnelier, ce qui engendrera des volumes considérables de déblais, dont une partie (fonction de la qualité des sols rencontrés) pourra être utilisée comme remblais sur les tronçons de surface.

Nous estimons que la quantité de remblais nécessaire devrait être largement couverte par les déblais de bonne qualité des tunnels. Le bilan des émissions ne prendra donc pas en compte de l'utilisation de carrières. Les déblais non utilisés seront évacués en décharge, que l'on considérera dans la deuxième couronne francilienne.

Les quantités de liant hydraulique à ajouter aux déblais réutilisés, sélectionnés pour en minimiser l'utilisation, seront estimées à la suite d'entretiens techniques (avec la RATP ou Cofiroute par exemple, qui pourront nous renseigner sur la qualité des terrains creusés aux tunneliers en Ile-de-France).

2.3.2.2 Valorisation énergétique des déchets

La très grande majorité des déchets issus de la construction et du fonctionnement des infrastructures seront des déchets inertes, pour lesquels, n'étant ni combustibles, ni fermentescibles, la question de la valorisation énergétique ne se pose pas. Par conséquent, l'outil ne prendra pas en compte la possibilité de valoriser énergétiquement les déchets produits.

2.3.3 Amortissements et retours sur investissement

La logique d'amortissement consiste à répartir l'impact lié à la construction d'un bien sur sa durée d'utilisation. Elle s'applique relativement bien à l'évaluation des émissions de GES induites par la mise en place d'infrastructures de transport de petite ou moyenne taille comportant une phase de construction définie dans le temps et dont les émissions dues au fonctionnement et à l'entretien de l'infrastructure sont constantes dans le temps.

Cette approche est cependant beaucoup moins bien adaptée à des projets de grande envergure tel que celui du Grand Paris qui induisent des impacts sur les transports ou sur l'aménagement du territoire variables et prolongés dans le temps. En effet, de nombreux processus en jeu sont, comme nous l'avons vu, fortement dynamiques. Par exemple :

- Les effets induits sur le développement territorial et l'urbanisme seront répartis dans le temps et se propageront tout au long de l'existence de l'infrastructure. Les programmes de construction et de rénovation de logements débiteront, notamment, avant l'ouverture du métro, culmineront ensuite et s'atténueront finalement progressivement dans le temps. Les émissions annuelles évitées grâce au projet suivront donc à priori une trajectoire logarithmique, en forte croissance dans les premières années puis de plus en plus stable au cours du temps.
- Par opposition, les émissions provenant des véhicules particuliers et évitées grâce au projet seront maximales dans les premières années de mise en service du métro puisqu'au fur et à mesure le parc automobile devrait évoluer vers des véhicules plus économes et consommant de plus en plus d'énergies renouvelables.

Il paraît donc peu réaliste de tenter de calculer, comme cela a été fait pour d'autres projets⁷⁶, une quantité annuelle d'émissions de GES générée par la nouvelle offre de transport qui soit constante au cours du temps et de la comparer aux émissions annuelles évitées également constantes au cours du temps.

La logique d'amortissement implique par ailleurs de fixer arbitrairement la durée de vie des infrastructures. Or dans le cas des ouvrages d'art et des infrastructures de transport, la durée de vie considérée s'étend généralement sur plusieurs dizaines d'années, souvent 50 ou parfois 100 ans. Bien que ces durées de vie ne soient pas irréalistes pour une infrastructure de l'importance du Grand Paris, il n'en reste pas moins qu'il est impossible de prévoir les émissions qui seront évitées grâce au métro à l'horizon 2120.

Nous proposons donc d'adopter une méthode différente qui consiste à prendre en compte les émissions au moment même où elles se passent. Selon cette approche continue, on pourra donc évaluer pour chaque année les émissions induites et les émissions évitées par le projet, depuis les études préparatoires jusqu'à l'horizon 2050. L'horizon 2050 qui correspond à approximativement 25 ans de fonctionnement, apparaît comme la limite pour laquelle il est possible de prévoir relativement précisément les impacts sur les émissions de GES.

Le suivi au cours du temps des émissions induites par le projet et des émissions évitées par le projet permettra de faire apparaître le nombre d'années nécessaires pour que les émissions évitées atteignent les émissions induites ainsi que les tendances évolutives à plus long terme. La comparaison de différents scénarios de projet permettra également d'analyser l'influence sur les émissions induites et évitées ainsi que sur leur évolution au cours du temps.

⁷⁴ Dossier technique du LERM (Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux) ; www.lerm.fr

⁷⁵ Information sur l'Impact Environnemental et Sanitaire - www.inies.fr

⁷⁶ Par exemple : Prolongement du RER E à l'Ouest

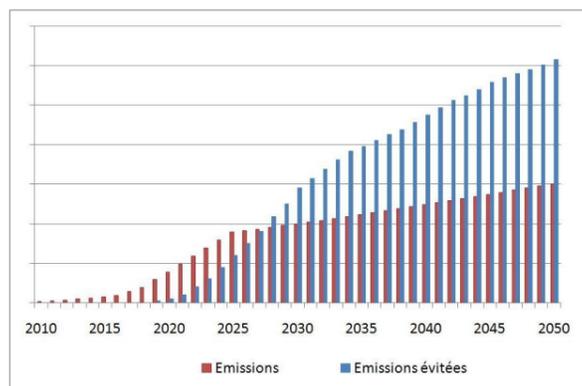


Figure 63 : Représentation schématique d'un graphique comparatif des émissions induites et évitées grâce au projet étudié entre 2010 et 2050.

Bien que la comparaison entre les émissions induites et les émissions évitées soit cruciale et permette, in fine, d'évaluer l'impact du projet sur les émissions de GES, nous éviterons de soustraire directement les émissions évitées des émissions induites. En effet, il est important de bien comprendre que le projet ne constitue pas un puits de carbone et ne permet pas d'enfuir dans le sol des quantités de GES précédemment émises. Les émissions induites sont des émissions libérées dans l'atmosphère tandis que les émissions évitées correspondent à une diminution des émissions supplémentaires qui auraient eu lieu si le métro n'avait pas été mis en place. Bien que ce concept soit relativement abstrait, il est important que le public comprenne que le projet n'a pas pour effet de retirer des quantités de GES de l'atmosphère mais qu'il contribue en revanche à diminuer les quantités supplémentaires que nous continuons à y ajouter.

2.3.4 Comparaison des scénarios

Une démarche d'analyse et de calcul des émissions de GES ayant avant tout comme objectif de permettre d'optimiser les activités et de réduire au maximum les émissions, il est primordial dans le cadre du projet du Grand Paris, de développer un outil permettant de comparer différents scénarios de projet et donc d'évaluer l'impact de mesures éventuelles sur le bilan des émissions de GES.

Le calculateur étant déjà relativement complexe puisqu'il nécessite l'entrée des données et décrits les facteurs d'émissions et les résultats année par année, il paraît difficile d'y ajouter la définition de différents scénarios de projet (un telle démarche rendrait le tableur difficile à lire et augmenterait les risques d'erreurs lors de la saisie des données et de l'interprétation des résultats). Nous proposons donc de créer un autre classeur Excel qui reprendra les résultats des bilans indépendants réalisés pour les différents scénarios et les comparera entre eux (voir

Figure 64).

L'utilisateur devra donc réaliser autant de bilan d'émissions de GES que de scénarios en démultipliant le tableur de base. Grâce au tableur comparatif, l'utilisateur pourra ensuite comparer les résultats des différents bilans de manière temporelle ou thématique.

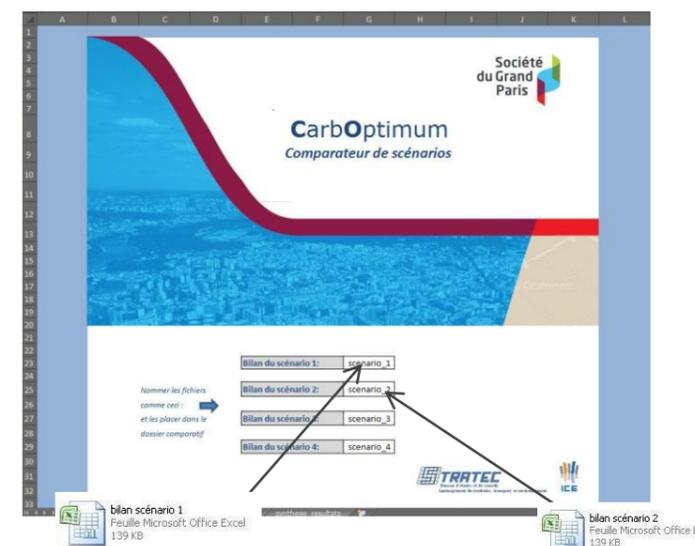


Figure 64 : Représentation schématique de la page d'accueil de l'outil de comparaison de différents scénarios de projet.

En insérant le nom des bilans à comparer, l'utilisateur pourra ainsi comparer rapidement différents scénarios entre eux. L'analyse sera effectuée temporellement (voir Figure 65) ou par thématique. En procédant de la sorte, il sera donc possible de quantifier l'impact de différentes mesures éventuelles en termes d'émissions de GES.

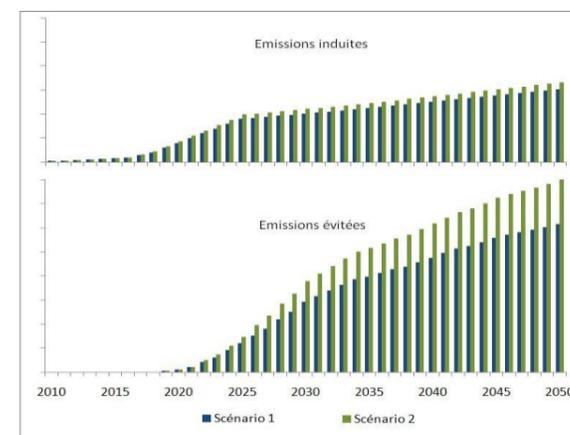


Figure 65 : Représentation schématique d'une comparaison temporelle des émissions induites et évitées grâce au projet de deux différents scénarios (variantes).

2.3.5 Actualisation des émissions

Les grandes infrastructures de transport public induisent une quantité importante d'émissions de GES en phase de conception et de construction. Ces émissions sont ensuite progressivement compensées tout au long de la durée de vie de l'infrastructure qui s'étale généralement sur plusieurs décennies.

Dans une telle situation, il est intéressant d'analyser comment les émissions de demain doivent être comparées avec les émissions d'aujourd'hui. Il s'agit donc de répondre à la question suivante : une tonne équivalente CO₂ émise lors de la construction est elle équivalente à une tonne économisée lors du fonctionnement du métro, dans 10, 20 ou 50 ans ? Si la réponse est non, il faut alors définir un taux d'actualisation des émissions qui permette de comparer les émissions dans le temps.

Cette question de l'équivalence dans les bilans d'émissions entre une tonne de CO₂ émise aujourd'hui et une tonne de CO₂ émise dans 10 ans peut paraître similaire à celle de l'évolution de la valeur tutélaire du carbone dans le temps qui a fait l'objet de nombreuses recherches et discussions, tant en France (un important travail de recherche a été fait à ce sujet par la commission présidée par Alain Quinet⁷⁷) qu'à l'étranger⁷⁸. Il est cependant crucial de bien différencier l'approche adoptée dans le cadre de la définition de la valeur tutélaire du carbone qui est une approche essentiellement socio-économique de celle à adopter dans le cadre de l'intégration des émissions dans un bilan d'émissions de CO₂ qui est une approche beaucoup plus environnementale des changements climatiques.

Point de vue socio-économique

Les travaux qui ont été réalisés sur la valeur tutélaire du carbone s'inscrivent généralement dans le cadre des calculs socio-économiques d'investissements publics. Ces calculs ont pour objectifs d'évaluer la rentabilité des investissements pour la collectivité. Pour pouvoir effectuer une telle évaluation, les coûts et bénéfices financiers liés à la construction et à l'exploitation doivent être pris en compte ainsi que les coûts et bénéfices non monétaires induits par ces investissements : gains de temps, sécurité, pollutions sonores et atmosphériques,... La prise en compte de l'environnement et de la lutte contre le changement climatique s'inscrit pleinement dans cette problématique⁷⁹. Les valeurs qui, comme celle du carbone, ne sont pas fournies directement par le marché, doivent alors être évaluées sur base des attentes de la société et sont alors dites « tutélaires ».

Dans le cadre des évaluations socio-économiques, les flux financiers qui se produisent à des dates différentes doivent être « actualisés » pour permettre de les comparer les uns avec les autres. L'actualisation consiste à pondérer les flux financiers au cours du temps afin de tenir compte de deux principes fondamentaux : (i) la préférence pour la jouissance immédiate : un euro aujourd'hui vaut plus qu'un euro demain, en effet, un euro aujourd'hui peut être investi et rapporter plus d'un euro demain et (ii) l'aversion au risque : un euro certain vaut plus qu'un euro espéré mais incertain.

La valeur actualisée d'un flux futur est alors calculée par la fonction :

$$V_a(F) = V_f(F) \cdot (1+t)^{-x}$$

Où

F est le flux

V_f(F) est la valeur du flux au moment où il apparaît

t est le taux d'actualisation

x est le temps entre la date d'actualisation et la date du flux

La valeur des coûts et bénéfices futurs est alors d'autant plus réduite que ces derniers apparaissent tardivement.

Ce modèle est imparfait et ne peut être appliqué à l'exploitation d'une ressource renouvelable. En effet, selon le modèle, une exploitation immédiate de l'entièreté de la ressource permettrait une maximisation des bénéfices pour la société. Pour pallier à ce problème, H. Hotelling a développé une loi d'optimisation de l'utilisation d'une ressource épuisable, selon laquelle, le prix de la ressource s'accroît au fur et à mesure que la ressource se raréfie afin qu'à l'épuisement de la ressource son prix soit tellement élevé que sa demande soit nulle⁸⁰. La règle d'Hotelling est donc une règle de préservation pour l'avenir qui garantit que le prix actualisé d'une ressource limitée n'est pas écrasé par l'actualisation.

Le cas du réchauffement climatique et des objectifs de réduction des émissions fixés par la collectivité peut être ramené au cadre théorique classique qui donne les règles à suivre pour assurer la gestion optimale d'une ressource épuisable⁸¹. Ainsi, la quantité d'émissions jugée acceptable peut être assimilée à la ressource non renouvelable. Au plus on se rapproche du seuil acceptable, au plus la valeur du carbone doit être élevée de sorte que lorsque le seuil est atteint, les émissions soient stabilisées.

C'est dans cet objectif que la plupart des valeurs du carbone (aussi appelées coût social du carbone, coût de réduction ou d'abattement des émissions, prix fictif, valeur économique ou valeur tutélaire du carbone) ont été définies de façon croissante dans le temps. La valeur tutélaire proposée par la commission présidée par Alain Quinet évolue ainsi fortement au cours du temps et passe de 32€ en 2010 à 200€ en 2050.

Lors de l'évaluation socio-économique à long terme d'un projet d'infrastructure de transport tenant compte du taux d'actualisation public de 4% proposé par le rapport Lebègue⁸² (sur base duquel la valeur tutélaire du carbone a été définie), la valeur d'une tonne de CO₂ ne variera alors que très peu dans le temps (voir Figure 66).

⁷⁷ La valeur tutélaire du carbone, Commission présidée par Alain Quinet, Centre d'analyse stratégique, 2009.

⁷⁸ Par exemples : Stern N. (2007) *The Economics of Climate Change*, UK House of Commons, 712p, Watkiss P. (2005), *The Social Cost of Carbon Review, Methodological Approaches for Using SCC Estimates in Policy Assessment*, AEA Technology Environment, research on behalf of DEFRA, Tol R.S.J. (2005) *The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties*, Energy Policy 33 2064-2074.

⁷⁹ Val tut carbone, quinet

⁸⁰ Hotelling H. (1931) *The economics of exhaustible resources*, Journal of Political Economy, 39 137-175.

⁸¹ La valeur tutélaire du carbone, Commission présidée par Alain Quinet, Centre d'analyse stratégique, 2009.

⁸² Rapport du groupe d'experts présidé par Lebègue D. (2005), *Révision du taux d'actualisation des investissements publics*, Commissariat général du Plan.

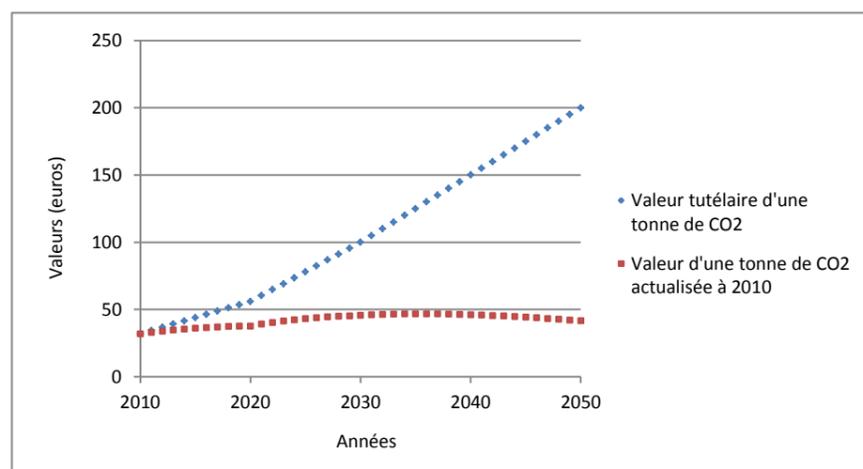


Figure 66 : Evolution de la valeur tutélaire du carbone (Commission présidée par Alain Quinet) au cours du temps et de la valeur actualisée à 2010 correspondante.

L'évolution progressive de la valeur tutélaire du carbone permet par ailleurs (i) d'exploiter en priorité les solutions d'abattement à faible coûts (la société a intérêt à exploiter en priorité les solutions de réductions des émissions à faibles coûts avant de mettre en œuvre des solutions plus coûteuses), (ii) de peser moins lourd sur la croissance et (iii) de faciliter les transitions économiques, sociales et professionnelles vers une société moins émettrice de GES⁸³. Ces préoccupations sont d'ordre purement socio-économique et la valeur du carbone reflète donc les attentes de la société et non pas l'importance des impacts réels sur l'environnement.

Par opposition, le calcul du bilan des émissions de GES d'un projet a comme objectif premier d'évaluer l'impact global du projet sur les changements climatiques. La comparaison entre les émissions induites en phases de construction et les émissions évitées en phase d'exploitation doit donc être réalisée sur base de considérations environnementales.

Point de vue environnemental

Les changements climatiques auront des impacts très divers sur les écosystèmes et de nombreuses incertitudes sur les conséquences futures subsistent encore actuellement. Cependant, de nombreuses études ont permis de montrer que changements climatiques ont une influence non linéaire qui comporte de nombreux seuils. En effet, les écosystèmes peuvent généralement supporter un certain niveau de changements environnementaux sans subir de modifications majeures. Par contre, lorsque le seuil de tolérance est atteint, les effets peuvent être importants et soudains. La figure ci-dessous représente schématiquement les principales influences et la hausse de température moyenne à laquelle elles débiteront.

Exemples d'incidences associées à la variation de la température moyenne à la surface du globe (Les incidences varieront selon le degré d'adaptation, le rythme du réchauffement et le mode de développement socioéconomique)

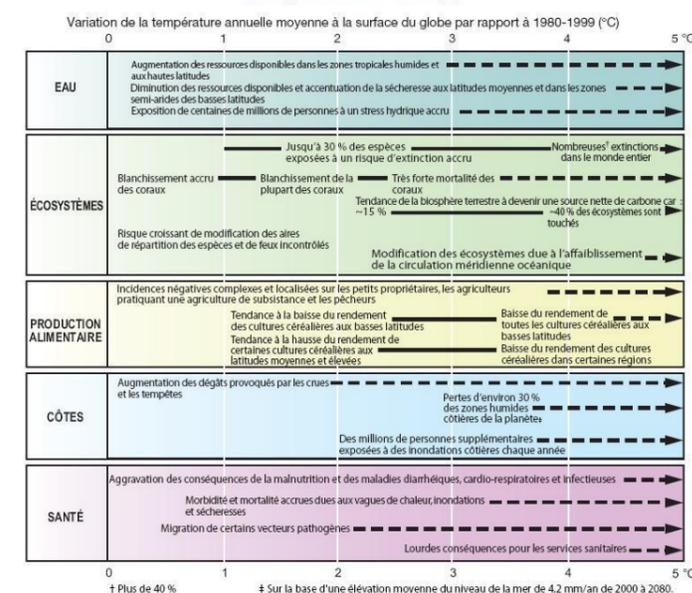


Figure 67 : Exemples d'incidences planétaires anticipées des changements climatiques selon l'ampleur de la hausse de la température moyenne à la surface du globe. Les traits noirs relient les diverses incidences entre elles, les flèches en pointillés indiquent que ces incidences se poursuivent avec le réchauffement. La disposition du texte permet de voir approximativement à quel niveau de réchauffement s'amorce l'effet mentionné. Source : GIEC 2007

Ainsi chaque degré supplémentaire d'élévation de la température amènera un ensemble de conséquences qui dépassera en ampleur tous ce que les degrés précédents auront amené. Il est donc intéressant de se demander si, du point de vue strictement environnemental, l'impact d'une tonne de CO₂ émise aujourd'hui sera identique à l'impact d'une tonne de CO₂ émise dans 10 ans.

Pour répondre à cette question, il est nécessaire de comprendre l'ensemble des processus impliqués entre l'émission d'une tonne de GES et les dommages environnementaux induits : (1) une tonne de GES émise va provoquer un accroissement de la concentration en GES dans l'atmosphère, (2) suite à cet accroissement, l'effet de serre sera plus important et causera une hausse de température, (3) finalement, la hausse de température induira des dommages sur l'environnement.

La comparaison de l'impact des émissions d'aujourd'hui et de demain devra donc se baser sur une analyse de l'évolution de chacun de ces 3 processus au cours du temps.

1. Influence des émissions de GES sur les concentrations présentes dans l'atmosphère et évolution au cours du temps.

Lorsqu'une quantité de GES est émise dans l'atmosphère elle s'ajoute aux quantités déjà présentes et participe donc à l'accroissement de la concentration. Cependant cette participation n'est pas éternelle puisque tous les GES se dégradent ou sont réabsorbés progressivement par l'océan ou la terre jusqu'à disparaître complètement. La vitesse à laquelle les différents GES sont dégradés ou réabsorbés est très variable, par exemple, le temps de vie moyen du CH₄ est de 12 ans et celui du N₂O est de 114 ans⁸⁴.

⁸³ La valeur tutélaire du carbone, Commission présidée par Alain Quinet, Centre d'analyse stratégique, 2009.

⁸⁴ Rapport 4 de l'IPCC (2007) WG1, chapitre 2 : Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing.

Le cas du CO₂ est plus complexe car ce composé entre dans de nombreux cycles naturels qui sont influencés par les concentrations présentes dans l'atmosphère et par la température du globe, c'est ce que l'on appelle le feedback naturel sur les concentrations atmosphériques. Par exemple, une augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ aura un effet stimulant sur la photosynthèse⁸⁵. Ainsi, plus la concentration en CO₂ sera grande, plus la séquestration du CO₂ par la végétation terrestre sera importante. Par opposition, la proportion de CO₂ absorbée par les océans diminuera à mesure que les concentrations augmenteront à cause d'une saturation de l'effet tampon (équilibre entre H₂CO₃, HCO₃⁻ et HCO₃⁼)⁸⁶. De même, l'augmentation de la température de l'eau réduira la solubilité du CO₂⁸⁷. Une tonne de CO₂ émise aujourd'hui pourrait donc être plus ou moins vite réabsorbée par la terre ou les océans qu'une tonne de CO₂ émise dans plusieurs années lorsque les concentrations atmosphériques et les températures seront plus élevées.

Plusieurs programmes de recherche ont analysé cette question mais dans l'état actuel des connaissances, aucun accord sur la durée de vie du CO₂ n'a encore été trouvé⁸⁸. L'estimation de l'évolution de la durée de vie du CO₂ au cours du temps est particulièrement délicate pour plusieurs raisons :

- D'abord parce qu'il n'y a pas d'accord sur la durée de vie actuelle du CO₂. Le rapport de l'IPCC de 1990 spécifiait que le CO₂ avait une durée de vie comprise entre 50 et 200 ans tout en spécifiant que la complexité des processus concernés ne permettait pas de donner une valeur précise. Le rapport de 2007, lui, précise que la moitié du CO₂ qui s'accumule dans l'atmosphère sera réabsorbé après approximativement 30 ans, que 30 % resteront dans l'atmosphère pour plusieurs siècles tandis que les 20 % restants, perdureront dans l'atmosphère pendant plusieurs milliers d'années (voir Figure 68).

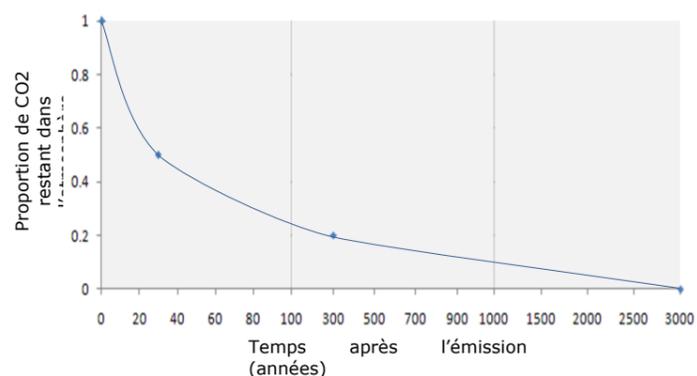


Figure 68 : Représentation schématique de la proportion de CO₂ émis actuellement qui restera dans l'atmosphère au cours du temps.

- Dans le cas où l'on accepte qu'une certaine quantité de CO₂ perdurera pendant plusieurs centaines voire milliers d'années dans l'atmosphère, il est très difficile d'évaluer les dommages induits par ce carbone résiduel puisque les impacts du changement climatique à si long terme sont impossibles à prévoir. Par ailleurs, la différence entre les dommages causés par une tonne de CO₂ émise aujourd'hui ou dans 10 ans serait négligeable par rapport aux dommages induits sur une échelle de temps de plusieurs milliers d'années.

⁸⁵ Par exemple : Taub, D. (2010) Effects of Rising Atmospheric Concentrations of Carbon Dioxide on Plants. Nature Education Knowledge 1(8):21

⁸⁶ Rapport 3 de l'IPCC (2001) WG1, chapitre 3 : The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide.

⁸⁷ Rapport 3 de l'IPCC (2001) WG1, chapitre 3 : The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide.

⁸⁸ Rapport 4 de l'IPCC, Frequently asked question, FAQ 10.3 If emissions of Greenhouse Gases are reduced, how quickly do their concentrations in the atmosphere decrease ?

- Pour analyser la hausse des concentrations atmosphériques de CO₂ induite par l'émission d'une tonne de CO₂ ainsi que son évolution au cours du temps il est nécessaire de recourir à des modèles prenant en compte les feedbacks attendus. Ces modèles présentent deux désavantages : (i) ils sont imparfaits et ne peuvent donner que des fourchettes assez larges de valeurs (ii) les résultats reposent sur les scénarios d'émissions choisis. Or l'évolution des émissions dans le temps est difficile à prédire surtout pour des échelles de temps lointaines de plusieurs dizaines voire centaines d'années.

2. Influence de la hausse des concentrations de GES dans l'atmosphère sur la température globale moyenne.

L'augmentation des concentrations de GES présents dans l'atmosphère provoque une augmentation de l'effet de serre et donc une augmentation de la température moyenne terrestre. Cependant, la hausse de température n'est pas une fonction linéaire de la concentration en GES. En effet, plus la concentration en GES déjà présents dans l'atmosphère est grande, plus la proportion de rayonnements infrarouges interceptés sera grande et donc au moins la proportion de rayonnements sur laquelle la quantité de GES supplémentaire influera sera grande. Ainsi, plus la concentration de GES présents dans l'atmosphère sera grande, moins la hausse de température associée à une unité de concentration supplémentaire sera importante. Ce phénomène est par ailleurs compensé partiellement par certains processus naturels comme la fonte des glaces qui permet une temporisation de la hausse des températures.

Les modèles utilisés par l'IPCC permettent d'approximer la courbe de la relation entre la hausse moyenne des températures et le niveau de stabilisation des concentrations de GES (Figure 69). Cette relation suit une trajectoire logarithmique qui montre que plus le niveau des concentrations est élevé, moins l'augmentation de température induite par une quantité similaire de GES sera grande (a>b sur la figure). Une hausse des concentrations atmosphérique en CO₂ se produisant à l'heure actuelle induira donc une hausse de température plus importante qu'une augmentation de même amplitude se produisant dans 10 ans.

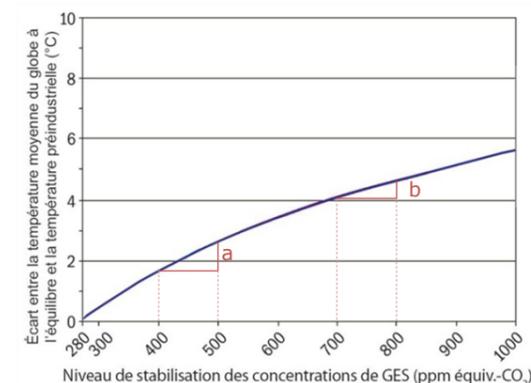


Figure 69 : Hausse de température moyenne à l'échelle du globe en fonction du niveau de stabilisation des concentrations de GES en équivalent CO₂. Source : rapport 4 de l'IPCC (2007), rapport de synthèse. La différence de hausse de température entre les niveaux de stabilisation à 400ppm et 500ppm (a) est plus importante que la différence de température entre les niveaux de stabilisation à 700 et 800 ppm (b).

3. Impact de la hausse des températures sur l'environnement.

Comme expliqué au début de ce paragraphe, l'influence de la hausse des températures sur l'environnement est un processus non linéaire qui comporte de nombreux seuils. En effet, les écosystèmes peuvent généralement supporter un certain niveau de changements environnementaux sans subir de modifications majeures. Au fur et à mesure que l'amplitude des changements environnementaux s'agrandira, les seuils de tolérance seront progressivement atteints engendrant des effets pouvant être soudains et importants.

Ces effets se propageant dans le temps et s'additionnant progressivement, il est attendu que chaque degré supplémentaire d'élévation de la température amène un ensemble de conséquences qui dépassera en ampleur tout ce que les degrés précédents auront amené. Une hausse des températures moyennes d'un degré se produisant aujourd'hui engendrerait donc des impacts sur l'environnement d'une amplitude moins importante que la même hausse de température se produisant dans 20 ans lorsque les températures seront plus élevées.

La question de l'évaluation quantitative des impacts induits par les changements climatiques ainsi que de leur évolution au cours du temps a suscité beaucoup d'intérêt durant les dernières années. De nombreux travaux de recherche ont d'ailleurs tenté de définir le « coût social du carbone », la plupart du temps, en traduisant les impacts en valeurs monétaires⁸⁹. Ces travaux posent évidemment de nombreuses questions puisqu'ils nécessitent une analyse quantitative d'une multitude de problèmes économiques, sociaux et environnementaux. Il est, par exemple, délicat d'estimer la valeur d'une vie humaine et de la comparer avec la disparition d'une espèce ou avec l'altération d'un écosystème. Les valeurs résultantes peuvent également varier de manière très importante en fonction des impacts inclus dans l'analyse et de la prise en compte des nombreuses incertitudes qui subsistent sur les impacts attendus, particulièrement à l'échelle de plusieurs décennies.

Les deux rapports les plus complets en ce qui concerne l'évolution des coûts marginaux au fur et à mesure que les températures augmentent sont probablement ceux réalisés dans le cadre de l'IPCC (2001)⁹⁰ et dans le cadre de la revue de Stern (2007)⁹¹ sur l'économie des changements climatiques. Dans ces rapports, les impacts ont été évalués en termes de Produit Intérieur Brut mondial (Figure 70). Les courbes révèlent l'importance des impacts attendus mais aussi une accélération au fur et à mesure que la température augmente.

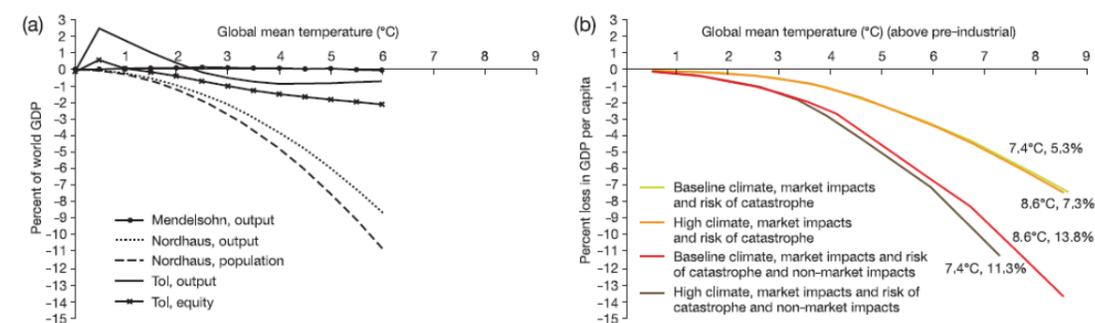


Figure 70 : Estimation des dommages induits par les changements climatiques en pourcentages du PIB (GDP) en fonction de la hausse moyenne des températures. Sources : (a) IPCC 2001, (b) Stern 2007. (a) modèle de Mendelsohn : estimation des impacts pour seulement 5 secteurs : l'agriculture, la foresterie, l'énergie, l'eau et les zones côtières⁹², modèle de Nordhaus : estimation des impacts pour une plus grande variété de secteurs marchands et non marchands, y compris sur la mortalité humaine en ne tenant pas (output) et en tenant (equity) compte de la répartition équitable entre les populations⁹³, modèle de Tol : estimation des impacts pour une plus grande variété de secteurs marchands et non marchands y compris les coûts liés aux catastrophes induites en ne tenant pas (output) et en tenant (equity) compte de la répartition équitable entre les populations⁹⁴. (b) le modèle différencie la prise en compte des impacts sur les secteurs marchands et les secteurs non marchands selon deux différents scénarios : le scénario « baseline climate » (scénario de base conforme aux impacts attendus par le third assessment report de l'IPCC) et le scénario « high climate » (scénario tenant compte de feedbacks intensifiant les impacts).

Du point de vue environnemental, on peut donc conclure que les dommages causés par une tonne de CO₂ émise dépendent de trois processus : (i) l'augmentation des concentrations induite par l'émission de CO₂, processus encore mal connu et difficilement modélisable, (ii) l'augmentation de la température engendrée par la hausse de la concentration atmosphérique en CO₂, processus qui s'atténue au fur et à mesure que les concentrations augmentent et (iii) les dommages engendrés par la hausse de température, processus qui s'intensifie au fur et à mesure que les concentrations augmentent.

Dans l'état actuel des connaissances, il semble donc que la solution la plus adéquate est de considérer de manière égale une tonne de CO₂ émise aujourd'hui et une tonne de CO₂ émise dans le futur. Le taux d'actualisation « physique » des émissions sera donc considéré comme nul.

2.4 Prise en compte des thématiques spécifiques au Grand Paris

2.4.1 Etudes préalables à la construction

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

Les études et travaux préparatoires seront multiples et variés et il n'est pas réaliste de préconiser la réalisation d'un bilan des émissions de GES pour chacun d'entre eux. La méthodologie proposera donc trois niveaux de calculs selon la connaissance précise ou non des émissions (une

⁸⁹ Voir Tol et al. (2005) pour une revue d'une centaine d'études. Tol R.S.J., (2005), *The marginal damage costs of carbon dioxide emissions : an assessment of the uncertainties*, Energy Policy 33 2064-2074.

⁹⁰ Third assessment report of the IPCC (2001) WG2 : Impacts, Adaptation and Vulnerability.

⁹¹ Stern, N. (2007), *The economics of climate change : the Stern review*, Cambridge University Press

⁹² Mendelsohn R.O. et al. (1998) *Country-specific market impacts of climate change*, Climate Change 45 553-569.

⁹³ Tol R.S.J. (2002) *Estimates of the damage costs of climate change – part II : dynamic estimates*, Environmental and Resource Economics 21 135-160

⁹⁴ Nordhaus W.D. et Boyer J.G. (2000), *Warming the world : The economics of the greenhouse effect*, Cambridge.

représentation schématique de la feuille de calcul est représentée en Figure 56). Les trois méthodes de prise en compte des émissions sont développées ci-dessous :

Cas 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 émissions seront alors simplement insérées telles quelles dans le bilan du projet. Lorsque les bureaux ne connaissent que leurs émissions annuelles (la plupart des cas), celles-ci seront simplement distribuées de façon équivalente entre l'ensemble des activités du bureau selon leur chiffre d'affaire.

Cas 2 : études et travaux dont les émissions de GES et les activités précises ne sont pas connues :

Les émissions seront alors évaluées sur base du coût financier des études et travaux en utilisant un facteur d'émissions général pour les études et services prestés par les entreprises. Les facteurs d'émissions pour services tertiaires disponibles dans la littérature ne sont cependant pas très nombreux.

Dans le guide des facteurs d'émissions de l'ADEME, l'utilisation d'un facteur d'émission = 110 g éq CO₂ par euro est préconisée. Ce ratio est calculé sur base de la consommation énergétique et du chiffre d'affaire des télécoms et de la poste en France et n'est considéré comme valable que pour les services impliquant une infrastructure⁹⁵. Le tableur de la méthode inclut par ailleurs un facteur d'émissions pour les services faiblement matériel = 36 g éq CO₂ / €.

La méthode Defra propose des facteurs d'émissions plus détaillés :

| Product category | CO2 Kg éq.CO ₂ /€ | CH4 Kg éq.CO ₂ /€ | N2O Kg éq.CO ₂ /€ | HFCs Kg éq.CO ₂ /€ | PFCs Kg éq.CO ₂ /€ | SF6 Kg éq.CO ₂ /€ | Total GHG Kg éq.CO ₂ /€ |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Post & telecommunications | 0.4816 | 0.0430 | 0.0172 | 0.0774 | 0.0103 | 0.0034 | 0.6192 |
| Auxiliary financial services | 0.2064 | 0.0258 | 0.0086 | 0.0086 | 0.0011 | 0.0006 | 0.2494 |
| Research & development | 0.3956 | 0.0602 | 0.0258 | 0.0086 | 0.0017 | 0.0009 | 0.4988 |
| Legal, consultancy, other business activities | 0.1462 | 0.0172 | 0.0086 | 0.0086 | 0.0007 | 0.0004 | 0.1806 |

Tableau 10 : Emissions de GES de services tertiaires. Source: 2011 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting, 1€=0.86£

Ces facteurs d'émissions couvrent les champs 1, 2 et 3 du GHG protocol. Ils sont plus élevés que ceux préconisés par l'ADEME.

Une évaluation préliminaire des émissions de GES produites par Stratec donne, par ailleurs, un ratio de 34 grammes de CO₂ par euro de chiffre d'affaire. Ce ratio tient compte de l'énergie consommée, des déplacements domicile-travail et des déplacements spéciaux, des immobilisations et des intrants.

Le facteur d'émissions calculé sur base des activités de Stratec (2010) correspond bien au facteur d'émissions issu du tableur bilan carbone[®] pour les services faiblement matériels. Il paraît donc relativement adéquat pour les études demandant peu de travail sur le terrain ainsi que pour le travail de gestion et de suivi du projet réalisé par la SGP. Il pourrait, par contre, sous évaluer les émissions liées à des études nécessitant plus de travail de terrain et l'utilisation de machines

⁹⁵ Guide des facteurs d'émissions V6.1, ADEME, 2010

spécifiques (GPS, théodolite,...). Il est également associé à une incertitude élevée de l'ordre de 50 %. Afin de garder une attitude prudente nous proposons donc de doubler ce facteur d'émissions et de retenir un facteur global = 68 grammes éq. CO₂ par euro.

Les études et travaux préalables à la construction de l'infrastructure étant pour la plupart réalisés sur la période relativement courte précédant la construction (approximativement entre 2010 et 2018), il ne semble pas nécessaire de faire évoluer ce facteur dans le temps.

Cas 3 : études et travaux dont les activités précises sont connues

Les émissions seront alors calculées plus précisément pour chacun des postes identifiés précédemment :

- Déplacements domicile-lieu de travail des employés :

En général peu d'information est disponible sur les déplacements domicile-lieu de travail des employés. Par ailleurs, le principal facteur qui influencera la quantité d'émissions de GES est le mode de déplacement de ces employés (à pied ou en vélo, transports en commun ou véhicule particulier).

Au minimum, l'utilisateur devra donc préciser le nombre d'employés utilisant chaque mode de transport. Si disponible, l'utilisateur pourra également préciser les distances moyennes parcourues par les employés.

Les facteurs d'émissions seront par ailleurs définis en tenant compte de l'amortissement des véhicules et de leur consommation.

- Consommation énergétique des bâtiments (chauffage et électricité) :

Les émissions pourront être évaluées sur base des surfaces de bureaux utilisées (m²) à l'aide d'un facteur d'émissions moyen ou sur base des consommations réelles des différentes énergies (gaz naturel, électricité, mazout ou chauffage urbain).

Fuite de climatisation : par défaut on considère que les bureaux sont localisés en France métropolitaine dans une zone de climat relativement tempéré et n'ont pas recours à la climatisation. L'utilisateur pourra cependant préciser en cas contraire le pourcentage des surfaces utilisées ayant recours à la climatisation. Les émissions de GES seront alors comptabilisées selon un facteur général basé sur la quantité moyenne de gaz s'échappant des systèmes de climatisation par unité de surface de bureau.

- Intrants et consommables bureautiques

Ces émissions sont particulièrement variées et difficiles à comptabiliser. Elles correspondent principalement dans le cas des études relatives au projet du Grand Paris, à la petite fourniture de bureau, le papier, les cartouches d'encre, etc. Nous proposons de ne prendre spécifiquement en compte que l'utilisation de papier. Le reste des intrants et consommables bureautiques pourront être pris en compte en fonction des dépenses des entreprises spécifiques à ce poste.

- Amortissement du matériel utilisé

Ces émissions sont aussi variées que le matériel utilisé. Pour ce qui est du matériel informatique, nous nous référons aux facteurs proposés par l'ADEME pour l'utilisation de photocopieurs, d'ordinateurs et d'imprimantes (facteurs d'émissions par unité utilisée). En ce qui concerne les outils spécifiques (théodolites, GPS, etc.), étant donné que la plupart de ce matériel s'apparente, tout comme le matériel informatique, à du matériel électronique, nous proposons de prendre en

compte les émissions en suivant le facteur d'émissions proposé par l'ADEME concernant le matériel informatique en général. Ce facteur permet la conversion en émissions de GES de l'utilisation de matériel informatique sur base des dépenses pour l'acquisition du matériel.

- Voyages et déplacements spéciaux

Etant donné la grande variabilité du nombre de déplacements et des modes de transport favorisés par les différents bureaux, l'utilisateur devra préciser le nombre de voyageur.km parcourus par mode de transport (voiture, bus, train, TGV ou avion).

- Amortissement des bâtiments

L'amortissement des bâtiments et des parkings sera pris en compte sur base des superficies utilisées (m²). Le facteur d'émissions sera évalué sur base d'une construction de bureaux en béton et de parking pour une durée de vie moyenne de 40 ans.

Comme évoqué précédemment, nous avons retenu de ne pas faire varier les facteurs d'émissions dans le temps. La majorité des études se dérouleront en effet sur un laps de temps assez court, compris entre 2010 et 2018. Les variations attendues sur cette période sont donc faibles (2 à 3 pourcents maximum) et largement inférieures au degré d'incertitude des facteurs d'émissions utilisés pour évaluer les flux de GES (évalué entre 25 et 50%). Il nous paraît donc adéquat ici de considérer des facteurs d'émissions comme constants dans le temps.

En ce qui concerne les leviers d'action, comme mentionné dans la partie 1 de ce rapport, il n'en existe que peu qui permettent de modifier sensiblement les émissions liées aux études préalables à la construction. La plupart des études sont en effet indispensables et imposées par la législation. Le maître d'ouvrage pourra encourager un travail peu émetteur en GES au sein de ses structures et au sein des différents bureaux d'études. Cependant, la courte période durant laquelle seront réalisées les études préalables ne permet pas des investissements importants qui pourraient engendrer une diminution importante des émissions. Pour ces raisons, nous considérerons que l'amélioration maximale grâce à des mesures d'encouragement d'un travail peu émetteur en GES permettrait une réduction de 5% des émissions totales. L'utilisateur pourra préciser si de telles mesures seront prises dans quel cas les émissions seront minorées de 5%.

2.4.2 Construction de l'infrastructure

Le bilan des émissions liées à la construction de l'infrastructure regroupera plusieurs postes qui vont de l'énergie et des ressources utilisées au niveau des chantiers à la fabrication des matériaux utilisés en passant par le transport pour acheminer matériaux, matériels et personnes travaillant sur le chantier.

Les paragraphes suivants détaillent, pour chaque poste, le type de données à introduire dans l'outil pour la réalisation du bilan.

2.4.2.1 Consommations énergétiques sur chantier

Les consommations énergétiques sur chantier comprennent les consommations de carburants des engins de BTP (terrassement, tunnelier), des chariots et groupes électrogènes ainsi que la consommation d'électricité provenant du réseau électrique. Les deux principaux sous-postes de consommation sont les engins de terrassement et les tunneliers, auxquels on pourra ajouter les consommations des bases-vies.

Tunnelier

La consommation énergétique des tunneliers dépend du terrain rencontré et du diamètre de coupe. Le diamètre intérieur des tunnels du réseau de transport public du Grand Paris devrait être de 8 à 9 mètres. Par conséquent, le tunnelier de référence choisi pour le calcul des émissions aura un diamètre compris entre 8 et 10 mètres.

Afin de prendre en compte la dureté du terrain, celle-ci pouvant varier d'une section de l'infrastructure à l'autre, ou au sein d'une même section, deux ou trois ratios de consommation d'électricité par mètre linéaire creusé seront définis en fonction de la géologie rencontrée.

Les ratios de consommation du tunnelier, le contenu carbone de l'électricité et les longueurs des portions de tunnels par dureté du terrain permettront d'obtenir les émissions de GES spécifiques à chaque ligne de l'infrastructure.

Engins de terrassement

La consommation des engins de terrassement sera prise en compte à partir du volume de matériaux terrassés, associé à un ratio de consommation de carburant (fioul) par m³ terrassé et au facteur d'émissions du fioul. C'est la méthode utilisée dans le calculateur LGV (RFF-SNCF-ADEME). Le ratio de consommation par m³ est d'environ 1 litre de fioul par m³ terrassé.

Les volumes de terrassement, de déblais et de remblais seront estimés à partir de la littérature et de retours d'expériences. Des entretiens techniques avec la RATP permettront en particulier de prendre connaissance du retour d'expérience des travaux de la ligne 14 du métro parisien dont les caractéristiques sont proches des infrastructures prévues pour le réseau de transport public du Grand Paris. Si le tracé des tronçons de surface, au moment de l'étude d'impact, est assez précis, il pourra être envisagé de valider ces volumes par un calcul rapide grâce à un logiciel SIG.

2.4.2.2 Autres postes des chantiers

Les autres postes de la partie construction du bilan, hormis la problématique du recyclage vue précédemment, seront traités de façon classique. Les données nécessaires à l'établissement du bilan sont rassemblées dans le tableau ci-dessous. Les facteurs d'émissions correspondant à chacune de ces données d'entrée sont facilement disponibles, par exemple dans les bases de données de Bilan Carbone[®], et plutôt consensuels.

| Poste | Données nécessaires |
|--|---|
| Consommations énergétiques sur chantier | Volumes terrassés + ratio de consommation par m ³ Km de tunnel par type de terrain + ratio de consommation tunnelier associé Nombre de bases-vies + ratio de consommation électrique par base-vie |
| Fabrication des matériaux | Tonnage des matériaux utilisés par kilomètre de voies Tonnage des matériaux utilisés par gare, SMR, CDR, SMI Tonnage de matériaux utilisés pour les centres de maintenance Tonnage de matériaux par mètre linéaire d'ouvrage d'art (pont, tunnel, viaduc...) Nombre de gares Kilomètres de voies Mètres linéaires d'ouvrage d'art |
| Transport des matériaux et du matériel | Provenance des matériaux et matériels Modes de transport d'acheminement et distance par mode Nombre de transfert du matériel entre chantiers Modes de transport pour le transfert du matériel Distance entre chantier |
| Procédés | Carbonatation si possible : tonnage de béton (données Fabrication) Nombre de bases-vies climatisées |
| Déchets | Volume de déchets par type Destination des déchets Modes de transport d'expédition des déchets |
| Transport de personnes Domicile-Travail | Nombre de personnes travaillant en moyenne sur le chantier Durée du chantier Part de la VP dans les déplacements Domicile-Travail Taux d'occupation des VP Distance moyenne au chantier |
| Transport de personnes Grands déplacements | Part des employés en grand déplacement Part de la VP dans les retours hebdomadaires Taux d'occupation des VP Distance moyenne du retour hebdomadaire |
| Transport de personnes Déplacements professionnels | Nombre de véhicules professionnels Kilométrage annuel |
| Transport de personnes Visiteurs chantier | Nombre de visites chantier Distance moyenne au chantier |

Tableau 11 : Postes d'émissions et données nécessaires concernant la construction de l'infrastructure

2.4.2.3 Disponibilités des données

Les données nécessaires rassemblées dans le tableau ci-dessus devraient être celles qui seront rentrées dans l'outil de calcul. Cependant, il est probable que dans le cadre des études d'impact, la plupart des données listées ne soient pas disponibles ; un certain nombre d'hypothèses devront donc être posées pour pouvoir malgré tout, et grâce à des calculs intermédiaires, disposer des données nécessaires à l'établissement du bilan. Les paragraphes ci-dessous reprennent les éléments du tableau pour expliciter comment les données d'entrée de l'outil non disponibles pourront être calculées.

Fabrication des matériaux

Les tonnages de matériaux par kilomètres de voies seront établis grâce aux chiffres de la littérature et à des entretiens techniques auprès d'experts.

La composition d'une voie ferrée est assez constante et les quantités moyennes de matériaux nécessaires également. Seront donc évalués les tonnages sur un kilomètre linéaire :

- du béton nécessaire au soutènement des tunnels ;
- de la plateforme, à partir des épaisseurs des couches posées et des matériaux utilisés habituellement pour les voies en tunnel et en surface (béton, remblai, couche de forme, sous-couche...) ;
- des traverses, à partir de la masse de béton d'une traverse et du nombre de traverse par kilomètre (a priori 1666 sur les tronçons SNCF, mais à valider lors d'un entretien technique avec la RATP) ;
- des rails (a priori 60 kg d'acier par mètre, chiffre à valider auprès des experts consultés) ;
- des caténaires et des réseaux de télécommunication...

ce qui permettra de définir un facteur d'émissions associé à la construction d'un kilomètre de lignes.

En l'absence de données concernant les gares, les bâtiments techniques et les ouvrages d'art, les quantités de matériaux nécessaires à leur construction seront estimés :

- pour les gares, à partir des retours d'expériences de la ligne 14 du métro parisien et des prolongations des autres lignes ;
- pour les bâtiments techniques, à partir des caractéristiques des bâtiments les plus récents déjà mis en œuvre sur le réseau de la RATP ;
- pour les ouvrages d'art, à partir des données de la littérature et en particulier des recueils de statistiques concernant la construction des ouvrages d'art du Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes⁹⁶, recueils qui donnent pour une année donnée le nombre, le type et la portée des ouvrages d'art, en particulier ferroviaires.

Fret

Si aucune indication n'est donnée au sujet des modes de transport utilisés pour approvisionner les chantiers, des entretiens techniques avec RFF et la RATP devraient permettre de réaliser une analyse des parts modales observées dans les travaux récents d'infrastructures ferroviaires (par exemple prolongation des lignes de métro de la RATP, renouvellement des voies du Transilien).

Déchets

Le poste Déchets concernera principalement les déblais non réutilisés pour la plateforme. La localisation des décharges pour déblais en Ile-de-France permettra d'évaluer les distances parcourues pour leur évacuation, et la faisabilité ou non d'utiliser les voies navigables.

Transport de personnes

Pour le poste transport de personnes, il est certain que les distances et parts modales exactes ne seront pas connues. Cependant, des chiffres moyens sur ce type de grands travaux doivent être accessibles. Un retour d'expériences auprès de RFF et de la RATP sera particulièrement utile. Le Bilan Carbone de la LGV Rhin-Rhône propose des chiffres qui à défaut de données plus précises pourront être utilisés dans notre cas.

2.4.2.4 Détails par section de l'infrastructure

De façon à préciser le plus possible le bilan des émissions et pouvoir le désagréger au mieux par section de l'infrastructure, il sera particulièrement intéressant d'obtenir pour chaque section :

⁹⁶ Pour l'année 2006 : http://www.piles.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/0855w_constructionOA2006_cle5bdd44.pdf

- La répartition entre portions enterrées et portions de surfaces ;
- Pour les portions enterrées, le type de terrains rencontrés ;
- Les types de gares prévues (et leur nombre) : surfaces, structures (métallique, béton), implantations (enterrée, en surface, sous-viaduc)... ;
- Le type de bâtiments prévus pour les sites de maintenance et de remisage des trains (SMR), les centres de dépannage rapide des trains (CDR) et les sites de maintenance des infrastructures (SMI) : surfaces et structures ;
- Le type d'ouvrages d'arts prévus (et leur nombre/longueur).

Ces données détaillées permettront d'évaluer les tonnages de matériaux nécessaires pour la construction de chaque type de bâtiments/voies/ouvrages et de définir un facteur d'émission (à l'unité, au kilomètre ou au mètre linéaire) associé.

Si ce niveau de détails n'est pas encore disponible au moment de la réalisation du bilan des émissions, des éléments types seront définis avec la Société du Grand Paris.

A nouveau, la construction de l'infrastructure se déroulera sur un période relativement courte, inférieure à 10 ans. 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, nous proposons de garder des facteurs d'émissions constants au cours du temps.

2.4.2.5 Mesures d'accompagnement

La construction de l'infrastructure peut faire l'objet de mesures directes relatives à la configuration du métro et à la conduite du chantier et permettant de limiter les émissions de la phase. Il peut s'agir par exemple d'intégrer la dureté des terrains rencontrés dans les critères d'analyse permettant de déterminer les portions de voies enterrées ou non et dans la définition du tracé définitif des sections. On pense également à la gestion des déblais (réutilisation ou évacuation) et à l'optimisation de l'acheminement et de l'évacuation des matériaux et la préférence à donner aux modes les moins émissifs (transport ferroviaire ou par voies d'eau).

En complément de ces mesures directes de réduction des émissions, une mesure d'accompagnement intéressante pour la Société du Grand Paris est le fonds d'arbitrage carbone.

Fonds d'arbitrage carbone

Un fonds d'arbitrage carbone est un outil économique permettant, grâce à un budget réservé, de financer le différentiel de coût entre les solutions de conception classiques et des solutions alternatives peu émissives en gaz à effet de serre mais un peu plus coûteuses. Afin d'optimiser l'effet de levier du fonds d'arbitrage carbone, les solutions alternatives sont sélectionnées en fonction du coût de la tonne équivalent CO₂ évitée.

A chaque étape, le fonds d'arbitrage carbone permet d'identifier, quitte à financer des projets R&D, les solutions les moins émissives, d'évaluer le coût de la tonne de CO₂ évitée et de financer les solutions au surcoût limité. Par conséquent, choisir une solution classique fortement émissive doit désormais être justifié par le fait qu'aucune autre solution finançable par le fonds n'est disponible. La mise en œuvre d'un tel fonds permet donc une prise en compte effective des émissions de CO₂ dans la conception du projet.

Dans le cadre de la construction de la ligne LGV Bretagne-Pays-de-Loire, Eiffage a prévu la création d'un tel fonds, doté d'un budget de 6,4 millions d'euros. Le plafond en-dessous duquel il est considéré que le surcoût peut être absorbé par le fonds d'arbitrage a été fixé dans ce cas à 40 euros la tonne équivalent CO₂ évitée.

2.4.3 Fonctionnement de l'infrastructure

De nombreux flux de carbone seront liés directement au fonctionnement de l'infrastructure de transport. Il s'agit notamment de la consommation d'énergie de traction du métro, de l'énergie nécessaire au fonctionnement des gares, des émissions de GES liés à l'entretien de l'infrastructure et des métros, etc. L'outil de calcul prendra en compte les différentes composantes en jeu identifiées dans la partie 1 de ce rapport de manière successive, dans des cadres séparés. Nous passons donc en revue, ci-dessous, ces différentes composantes et la façon dont elles pourront être prises en compte.

L'énergie de traction nécessaire au mouvement des métros

L'énergie nécessaire pour la traction pourra être évaluée de deux façons différentes en fonction des informations disponibles.

Dans le premier cas, l'utilisateur devra préciser la consommation électrique attendue. C'est la solution que nous préconisons et qui permettrait la plus grande précision en particulier pour ce qui concerne les technologies utilisées. En effet, la consommation énergétique des métros est un poste stratégique dans le bilan des émissions de GES et peut varier de manière importante en fonction des spécificités technologiques du métro. L'évaluation de la consommation attendue nécessite cependant une connaissance approfondie de nombreux paramètres qui ne seront probablement pas entièrement définis au stade de l'étude d'impact.

L'outil contiendra donc un deuxième niveau de précision pour lequel la consommation énergétique et les émissions qui en découlent seront évaluées sur base des véh.km parcourus. L'utilisateur devra donc préciser au minimum les véh.km parcourus et pourra également préciser le nombre de places disponibles par métro, 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.).

Le facteur d'émissions sera évalué sur base des consommations observées du réseau de métro actuel et des données disponibles dans d'autres études. Nous nous référerons notamment à l'étude du Predit (2007) sur le calcul des facteurs d'émission des modes de transport en commun urbains. Dans cette étude, l'énergie de traction est évaluée à 123 g éq CO₂ par véh.km pour des métros d'approximativement 110 places. L'étude propose également un facteur d'émissions de 4.1 g éq CO₂ par voyageur.km en tenant compte d'un taux de remplissage d'approximativement 30%. Ce taux d'émissions est similaire à celui de l'étude sur l'efficacité énergétique des modes de transport (Deloitte, 2008) qui préconise un facteur d'émission de 4 g éq CO₂/voy.km. Le volet transport et énergie du SDRIF évalue quant-à lui les émissions du métro à 3.5 g éq CO₂ par voy.km⁹⁷.

Sur base de ces données nous proposons l'utilisation d'un facteur de base de 123 g éq CO₂. C'est un facteur moyen pour l'ensemble des métros parisiens défini à nouveau de manière prudente car il est très probable que les nouveaux métros consommeront moins que la moyenne générale. Ce facteur de base variera si l'utilisateur apporte des précisions quant à la capacité des métros, à leur type de système de roulement et à la technologie utilisée.

D'après les données de l'étude du Predit sur la consommation des métros, bien que pour les métros plus anciens (59-72) il y ait une différence notable de consommation entre un système de roulement sur pneu et sur fer, cette différence se minimise pour les métros plus récents (77-89) (voir Figure 71). La question est cependant sujette à controverse, une consommation supérieure de plusieurs dizaines de pourcents en cas de système de roulement sur pneu étant parfois

⁹⁷ SDRIF, Transport et énergie en Ile-de-France, 2006

avancée⁹⁸. Dans l'outil nous proposons donc de minorer le facteur d'émission de base de 15%, par rapport à la situation moyenne actuelle, en cas d'utilisation d'un système de roulement sur fer.

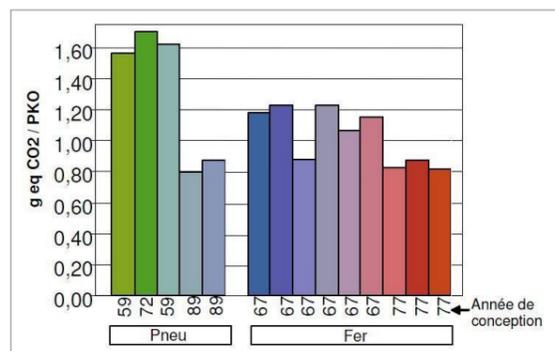


Figure 71 : Emissions de GES relatives à l'énergie de traction des métros Parisiens exprimées en g eq CO2 par place offerte . km

L'utilisation de technologies avancées permettrait quant à elle de réduire la consommation énergétique d'approximativement 30%⁹⁹. Nous proposons de prendre en compte une réduction de 25% des émissions lorsque l'utilisateur précise que des technologies avancées seront utilisées.

Le facteur d'émissions variera finalement dans le temps en tenant compte de l'évolution des émissions de GES nécessaires pour la production d'électricité (voir 2.3.1.1).

Notons que l'énergie de traction est calculée sur base de la consommation des métros et inclut implicitement l'énergie consommée pour les différentes fonctions à bord (freinage, chaleur ou froid, etc.).

Consommation en énergie des gares

La consommation en énergie des gares, des bâtiments d'accueil du public et des bâtiments techniques (maintenance) consomment également de l'électricité. Cette consommation sera évaluée sur base des surfaces dédiées à ces espaces. L'utilisateur devra donc préciser les surfaces des bâtiments dédiés aux différentes fonctions. Un facteur d'émission par type de bâtiment regroupant l'éclairage, le chauffage et la ventilation sera défini par défaut.

En ce qui concerne le chauffage, nous proposons de ne considérer son utilisation que pour les bâtiments aériens. Les gares souterraines sont en effet généralement gardées à température grâce à l'énergie du sous-sol. L'utilisateur devra donc préciser la proportion des surfaces aériennes et souterraines. Pour les bâtiments aériens, l'utilisateur pourra alors également préciser la qualité de l'isolation thermique.

En ce qui concerne la consommation et les fuites de climatisation, nous considérerons par défaut que les bâtiments n'auront pas recours à la climatisation. En cas contraire, l'utilisateur pourra préciser les surfaces en question.

Emissions induites par les activités de gestion, de marketing, de contrôle, de pilotage, etc.

Les données susceptibles d'être disponibles sur ce poste au stade de l'étude d'impact sont modestes. Nous proposons donc de prendre en compte ces émissions sur base des dépenses prévues dans le budget prévisionnel du projet du Grand Paris. Pour permettre un affinement futur de l'évaluation des émissions de GES, nous proposerons un inventaire plus détaillé identique à celui développé dans la partie études et travaux préalables à la construction.

Emissions liées à l'entretien et au renouvellement de l'infrastructure

En ce qui concerne l'entretien courant, un facteur d'émissions global sera défini par unité de surface pour chaque type de bâtiments et par unité de longueur du métro. Nous évaluerons les émissions sur base du nombre de personnes affectées à l'entretien et sur base du budget prévisionnel. Le facteur d'émissions tiendra compte des déplacements domicile-travail du personnel, du matériel utilisé et des intrants.

Le renouvellement ponctuel de gros matériel et les opérations lourdes de rénovation seront précisés et comptabilisés de façon identique à la partie construction. Ce poste ne devrait pas être particulièrement important car la plupart des matériaux auront une durée de vie supérieure aux 30 ans qui séparent la mise en service et l'horizon 2050.

2.4.4 Mobilité en Ile-de-France

Dans le processus d'estimation de l'impact carbone, un modèle de transport s'avère très précieux pour évaluer les effets systémiques des mesures envisagées qu'il s'agisse des impacts directs des modifications des infrastructures de transport, des impacts indirects de localisation de l'habitat et des activités et plus généralement des impacts des mesures susceptibles d'affecter le comportement des usagers (modification de l'environnement urbain, mesures réglementaires).

Dans notre cas d'étude nous disposons d'un modèle de type à « 4 étapes », dénommé MODUS, propriété de la DRIEA, complété par un modèle de transport public de la RATP. Ces modèles sont basés sur un découpage de l'Ile-de-France en « zones de trafic ». Chaque zone est un générateur et/ou un attracteur de déplacement. Les points ci-dessous s'attachent à décrire le fonctionnement général et les données d'entrée et de sortie du modèle. Pour la description complète et détaillée du modèle et de ses paramètres, il convient de se référer à son mode d'emploi disponible sur demande auprès de la DRIEA.

Etape 1 : Génération / attraction

Le modèle de la DRIEA est en mesure d'estimer sur base d'une distribution de la population et des activités (étape de génération/attraction), les départs et arrivées journaliers, un jour ouvrable moyen, par zone de trafic (et également par motif de déplacement). Le calibrage des émissions et attractions a été effectué par régression linéaire entre les déplacements de l'Etude Globale Transport (EGT) et les caractéristiques socio-économiques des zones de trafic.

⁹⁸ Paris – Le futur métro, avec ou sans pneus ?, France Soir, 2010, www.francesoir.fr/pratique/transport/paris-futur-metro-avec-ou-sans-pneus-58370.html

⁹⁹ Metro automatique et économie d'énergie, Siemens, 2009

Données d'entrées

L'étape de génération/ attraction nécessite comme données d'entrées des hypothèses sur la localisation et l'évolution de la population et des activités (population, population active, emplois, emplois commerciaux, emplois tertiaires, emplois dans les loisirs, places étudiantes).

Données de sortie

Cette étape produit pour chaque zone de trafic le nombre de déplacements émis et attirés un jour moyen selon les motifs suivants : domicile→travail, travail→domicile, domicile → achats/aff.perso, achats/aff.perso→domicile, basé travail et non basé domicile, domicile→loisir, loisir→domicile. Une désagrégation supplémentaire en captif et non captif est réalisée à posteriori, ce qui donne au total 16 catégories.

Etape 2 : Distribution

Ensuite, (étape de distribution) le modèle génère l'ensemble des relations entre les zones de trafic, soit la matrice des couples de déplacement origine/destination. Cette matrice représente une image des déplacements tous modes à la pointe du matin. Son analyse permet de donner des indications sur les tendances en termes de déplacements entre grands territoires. Cela permet par exemple de vérifier si les déplacements de périphérie à périphérie sont en augmentation et si Paris intra-muros est toujours le pôle d'attraction principal. A ce stade, aucune information n'est encore disponible concernant le mode de transport utilisé, ni l'itinéraire choisi.

L'étape de distribution se base sur un modèle de type « gravitaire » qui répartit les déplacements en fonction des générateurs/ attracteurs (données d'entrées fournies par l'étape précédente) et de l'offre de transport disponible (via le calcul des utilités des déplacements, voir point sur le choix modal). Le modèle gravitaire a été calé sur base des observations récoltées dans le cadre de l'EGT, il reproduit la situation observée sur base des données d'entrée générateur/attracteur et de l'offre de transport. Les résultats du modèle gravitaire doivent ensuite subir une ultime correction pour recalculer les totaux des déplacements, à l'origine et à la destination des zones de trafic, sur les valeurs des générateurs et attracteurs de l'étape 1. Cette opération est réalisée à l'aide d'un algorithme de Fratar.

Données d'entrée

Cette étape nécessite en entrée les données de sortie de l'étape 1 (les générateurs/attracteurs) et les utilités qui caractérisent l'offre de transport (public et privée).

Données de sortie

Cette étape produit les matrices de déplacements origine/destination pour un jour moyen, pour l'ensemble des 16 catégories d'usagers.

Etape 3 : Choix modal

L'étape suivante est le choix modal. Le modèle de choix modal est un algorithme de calcul qui détermine pour chaque paire origine/destination, la probabilité de choisir un mode plutôt qu'un autre en fonction d'une série de paramètres comme le temps de parcours, d'attente, de marche, le nombre de correspondances, le prix, ... par motif de déplacement. L'ensemble de ces paramètres pondérés forme l'utilité d'un déplacement. Si l'utilité d'un déplacement en transport public est plus grande que l'utilité par la route, alors la probabilité d'emprunter les transports publics sera plus grande pour ce déplacement. La matrice de déplacements tous modes est

ensuite confrontée à la matrice des probabilités pour donner des matrices par mode : soit une matrice pour les déplacements en voiture particulière, en transport public, en mode doux (marche, vélo, etc.). Les matrices doivent ensuite subir quelques ultimes ajustements :

- Le passage des matrices journalières à des matrices heure de pointe du matin et heure de pointe du soir (sur base des taux de passages de l'EGT) ;
- La conversion des voitures en UVP « Unités de Véhicules Particulier » ;
- L'ajout de zones externes ;
- L'ajout des flux poids lourds (multiplication par 1.1 des matrices sur base des chiffres de l'EGT ou exploitation du modèle poids lourds¹⁰⁰ qui peut alors être mis à jour) ;
- L'ajout des flux des zones externes (l'évolution des déplacements liés à l'extérieur de l'Ile-de-France doit être évaluée séparément) ;
- L'ajout des flux des générateurs spécifiques (l'évolution des déplacements liés aux générateurs particuliers doit être évaluée séparément).

Données d'entrées

Les données d'entrée sont donc d'une part la matrice de demande, résultat de l'étape 2 de distribution et d'autre part les caractéristiques de l'offre de transport (réseau de transport public et du réseau routier). Les données d'entrée concernant l'offre de transport (les utilités) sont issues en partie des modèles de réseaux qui sont des représentations virtuelles des réseaux de transport public et routier et en partie des hypothèses sur les autres mesures mises en œuvre. Nous retiendrons que les utilités sont caractérisées par :

- Les indicatrices de mode (constantes modales) qui permettent de donner un poids différent à chaque mode (définies par le calibrage) ;
- Les pénalités à courte distance pour les modes motorisés qui concrétisent l'usage facilité pour les modes doux sur les courtes distances (définies par le calibrage) ;
- Les temps de parcours : le temps passé hors du véhicule et les temps de déplacement du matin et du soir (issus des modèles d'affectations) ;
- Le coût kilométrique d'utilisation de la voiture (issu des modèles d'affectations) ;
- La tarification du transport public (issu des modèles d'affectations) ;
- Le stationnement, caractérisé par un surcoût pour les automobilistes dépendant des conditions de stationnement (issu des modèles d'affectations).

Certains coefficients de pondération de la fonction d'utilité, comme la valeur du temps (qui permet de transformer le prix en un temps perçu) peuvent être modifiés s'il est possible de prévoir leur évolution.

Données de sortie

L'étape choix modal produit des matrices de déplacements par mode de transport et catégorie d'usager, à la pointe du matin et du soir.

¹⁰⁰ La DRIEA dispose également d'un modèle poids lourds dont les caractéristiques ne nous ont pas été fournies mais qui vraisemblablement est en mesure de produire des matrices de déplacements de camions sur base de caractéristiques socio-économique des zones desservies (emplois, PIB) et de l'offre de transport (congestion). Comme le développement économique qui accompagnera le déploiement du Réseau de transport public du Grand Paris sera non négligeable, il importe de bien prendre en compte les augmentations résultantes sur le trafic marchandise.

Etape 4 : Affectation sur les réseaux

L'affectation consiste à simuler le choix d'itinéraire des usagers sur base des matrices de déplacement et de réseaux de transport virtuels.

Pour le réseau de transport public, les lignes sont modélisées avec leur fréquence et leur temps de parcours. Pour le réseau routier, les voiries de niveau supérieur sont modélisées avec leur capacité.

A ces réseaux sont associés des algorithmes de choix d'itinéraire qui permettent de calculer une probabilité de choisir un itinéraire plutôt qu'un autre en fonction principalement du temps de parcours, (y compris le temps d'attente et de marche pour le modèle de transport public) mais également du prix. Dans le cas du réseau routier, les temps de parcours sont bien évidemment fonction de la congestion (la relation est exprimée par ce que l'on appelle des courbes « vitesses/débit »).

Données d'entrées

Les données d'entrée sont les matrices de déplacement par mode issues de l'étape 3 (par catégorie, pour la pointe du matin et du soir) et les caractéristiques des réseaux.

Données de sortie

Les données de sortie des affectations sont principalement des statistiques de fréquentation des réseaux :

- voyageur.km, voyageur.heure,
- montées/descentes aux arrêts,
- nombre de correspondances,
- temps de marche, temps d'attente,
- vitesses par tronçon de voirie,
- flux de voyageurs/véhicules par tronçon de voirie.

L'intérêt de la modélisation à 4 étapes

Le processus de modélisation montre que la fréquentation des réseaux est une variable hautement dépendante des nombreux paramètres d'entrée du modèle qui tentent de caractériser le réel. L'étape 1 de génération / attraction prend en compte les phénomènes attendus de densification autour des gares, l'étape 2 prend en compte la réduction des déplacements induits par le rapprochement des lieux d'émissions et d'attraction, l'étape trois estime les parts modales des différents modes de transport sur bases de la demande exprimée en étape 2 et de l'offre améliorée par le projet de métro, l'étape 4 simule les itinéraires utilisés et la fréquentation des réseaux.

L'intérêt de la modélisation se situe également dans sa capacité à prendre en compte les impacts des mesures d'accompagnement qui seront nécessaires à la réussite du projet (mesures réglementaires sur les prix, sur l'occupation du sol,...).

La connaissance de la fréquentation des réseaux va permettre de quantifier plus finement les postes émetteurs de carbone suivants :

- Les émissions du trafic automobile (voir point suivant sur la modélisation des émissions de GES de la circulation automobile)

- Les émissions du réseau de transport public (hors métro du GP) par l'analyse des nouveaux besoins induits par l'évolution de la demande et l'insertion du métro.

La modélisation des émissions de GES de la circulation automobile

Le calcul précis des émissions de GES liées à la circulation automobile nécessite de connaître de nombreux paramètres comme le type de moteur, la vitesse (accélération/décélération), la charge tractée, le type de revêtement, etc. Ce type d'information ne peut à l'évidence pas être récolté et projeté précisément pour l'ensemble du parc automobile et du territoire, il faut donc simplifier. La simplification ne peut cependant pas oublier les variables importantes que sont la vitesse et la consommation des moteurs. L'approche suggérée consiste à utiliser la méthode COPERT IV¹⁰¹ pour le calcul des émissions et d'y associer les vitesses et les véhicule.km issus des modèles de trafic, distribués par catégorie de véhicule. L'évolution technologique des motorisations sera prise en compte par des hypothèses d'évolution du parc par catégorie de véhicule (catégories COPERT IV) issue des travaux d'Airparif¹⁰².

2.4.5 Développement territorial

2.4.5.1 Méthodologie générale de la feuille de calcul « développement territorial »

Comme toutes les autres feuilles de calcul thématiques de l'outil, l'onglet « développement territorial » calculera, pour chaque année d'ici à 2050, les variations d'émissions de tonnes équivalent CO₂ entre :

- une occupation du sol évoluant d'ici à 2035, induite par la mise en œuvre de mesures d'aménagement du territoire menées en parallèle du réseau de transport public du Grand Paris et par l'arrivée de nouvelles populations et de nouveaux emplois en Ile-de-France grâce à ce projet ;
- une occupation du sol qui se créerait en fonction du développement de l'occupation du sol qui s'effectuerait en Ile-de-France d'ici à 2035 dans une situation de référence, sans projet et sans la population et les emplois supplémentaires induits par ce projet.

La Figure 72 schématise la méthodologie générale proposée pour le calcul de ces émissions.

De manière générale, le bilan global des émissions sera calculé pour l'entièreté du projet de développement territorial. Il pourra également être ventilé par année ou par poste d'émissions. Ces postes d'émissions, décrits et analysés dans la partie 1 de l'étude, sont rappelés au point 0. Cette partie justifie également les composantes retenues pour le calcul des émissions de ces postes, désignées ici par le terme « valeurs de passage ». Les valeurs de passage seront calculées par l'outil ou par l'utilisateur pour toutes les années comprises entre 2005 et 2050 sur base des données d'entrée (« inputs ») encodées par l'utilisateur. L'onglet « développement territorial » convertira, année après année, ces valeurs de passage en téq CO₂ par le biais de différents facteurs d'émissions. Les facteurs d'émissions seront définis en phase 2 sur base du travail de recherches bibliographiques et feront l'objet d'un guide détaillé et référencé de définition des facteurs d'émissions. Pour ce faire, la partie 0 liste et décrit les différents facteurs d'émissions qu'il s'agira d'intégrer dans la feuille « développement territorial ». En anticipation de la phase suivante, la partie 0 propose dès aujourd'hui l'utilisation de différents facteurs

¹⁰¹ COPERT IV, European Environmental Agency, <http://www.emisia.com/copert/General.html>

¹⁰² AirParif est en mesure avec ses propres outils d'estimer les émissions de GES de la circulation automobile sur bases de données de véhicules x km (véhicules légers et camions) et des vitesses moyennes issus du modèle de transport.

d'émissions extraits d'études récentes en France ou à l'étranger. Pour les facteurs d'émissions pour lesquels des valeurs ne sont pas publiées, la manière dont ceux-ci seront calculés dans la phase 2 est décrite.

La feuille « développement territorial » possède toutefois trois spécificités par rapport aux autres onglets de calcul de l'outil Bilan GES qu'il est important de garder à l'esprit.

La première c'est que les inputs nécessaires aux calculs des émissions de CO₂ requièrent différents calculs préalables pour l'utilisateur. Le calcul et l'encodage de ces inputs par l'utilisateur permettra à l'outil de convertir ces inputs en tonnes équivalent CO₂ via les facteurs d'émissions.

Les calculs préalables relèvent de la définition des scénarios d'urbanisation dans une situation avec et sans projet, c'est-à-dire la construction à proprement parler des scénarios d'occupation du sol avec ou sans projet et des hypothèses sous-jacentes (densité, localisation de la construction, etc.). Cette étape fera l'objet d'un travail et de recommandations approfondis dans le cadre des études d'impacts du réseau de transport public du Grand Paris. Cet exercice s'effectuera sur base des projections communales de population et d'emploi dans une situation 2035 avec projet transmises par le Maître d'Ouvrage et à l'aide de différentes hypothèses spatialisées d'aménagement du territoire implémentées dans un outil de Système d'Information Géographique.

Dans le cadre de la présente étude, il ne s'agit pas de définir précisément les hypothèses et les limites méthodologiques de cet exercice mais bien de mettre à disposition un outil qui permette de fournir des résultats quantitatifs (en téq CO₂) issus des résultantes des hypothèses d'occupation du sol prédéfinies et qui seront les « inputs » de l'outil. En cela, l'onglet « développement territorial » constituera un outil d'aide à la décision pour tester de manière quantitative les recommandations d'usage du sol construites dans le cadre de la réalisation des études d'impact et qui varieront dans l'exercice. La partie 0 décrit les grandes lignes méthodologiques de ces calculs préalables et la manière dont l'utilisateur pourra calculer les « inputs » de l'outil. Cette méthode sera évidemment affinée au cours des études d'impact. Pour rappel, un guide d'utilisation de l'outil détaillera davantage, en phase 2, les conditions d'élaboration et de validité de ces inputs. La partie 2.4.5.4 décrit, quant à elle, la manière dont l'outil calculera pour chaque année la valeur de ces inputs et définira ainsi des « valeurs de passage ».

La seconde spécificité de cette feuille de calcul réside dans les hypothèses d'évolution de l'occupation du sol en Ile-de-France après 2035. En effet, les projections communales de population et d'emploi dans les situations avec et sans projet seront définies pour l'horizon 2035 (c'est l'horizon que les études d'impacts devront analyser). C'est donc à cet horizon que les utilisateurs de l'outil disposeront de données relativement précises pour un scénario avec et un scénario sans projet. L'occupation du sol évoluera évidemment après 2035, mais il est difficile de prédire, sans étude approfondie dans quelle mesure l'évolution aura un lien de cause à effet avec la mise en œuvre du réseau de transport public du Grand Paris. Nous considérerons donc que les impacts induits du réseau de transport public du Grand Paris sur l'évolution du parc bâti et sur l'urbanisation ne seront observés que jusqu'en 2035.

Les émissions de CO₂ liées aux impacts induits du projet sur le développement territorial seront toutefois calculées dans l'outil jusqu'à l'horizon 2050 :

- d'une part, par souci de cohérence avec les autres feuilles de calcul, car le bilan global d'émissions de GES s'effectuera à cet horizon ;
- et, d'autre part, car, même en tenant compte d'une hypothèse conservatrice de non influence de l'évolution du parc bâti et de l'urbanisation entre 2035 et 2050, le projet sera toujours responsable des réductions de consommations énergétiques sur cette période. En effet, ces réductions seront générées grâce à l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments construits ou rénovés avant 2035 et par les réductions d'émissions de GES générées par les coûts de maintenance et d'opérations des VRD et des services publics qui desservent ces bâtiments.

La troisième et dernière spécificité de cet onglet est que l'utilisateur aura la possibilité d'intégrer, s'il le souhaite, des « inputs bonus ». Ces données d'entrée optionnelles permettront à l'utilisateur de voir l'effet de certains « leviers d'action » sur les émissions de CO₂ liées au développement territorial. Les leviers d'action en question ne sont pas directement du ressort des pouvoirs publics et ne font pas partie intégrante des stratégies d'aménagement du territoire, mais pourront être fortement influencés par les lignes directrices définies dans les CDT¹⁰³. Parmi ces leviers d'action, on peut citer, par exemple, la promotion de l'obtention d'une certification environnementale pour les nouveaux bâtiments (Cf. rapport de Phase 1 partie 1, page 72). L'intégration de ces « inputs bonus » dans le calcul des émissions et leurs influences sur les calculs des émissions sont explicitées dans la partie 0 pour les postes d'émissions concernés (encarts spéciaux). La méthodologie de calcul de ces « inputs bonus » est explicitée par la suite.

¹⁰³ Contrat de Développement Territorial

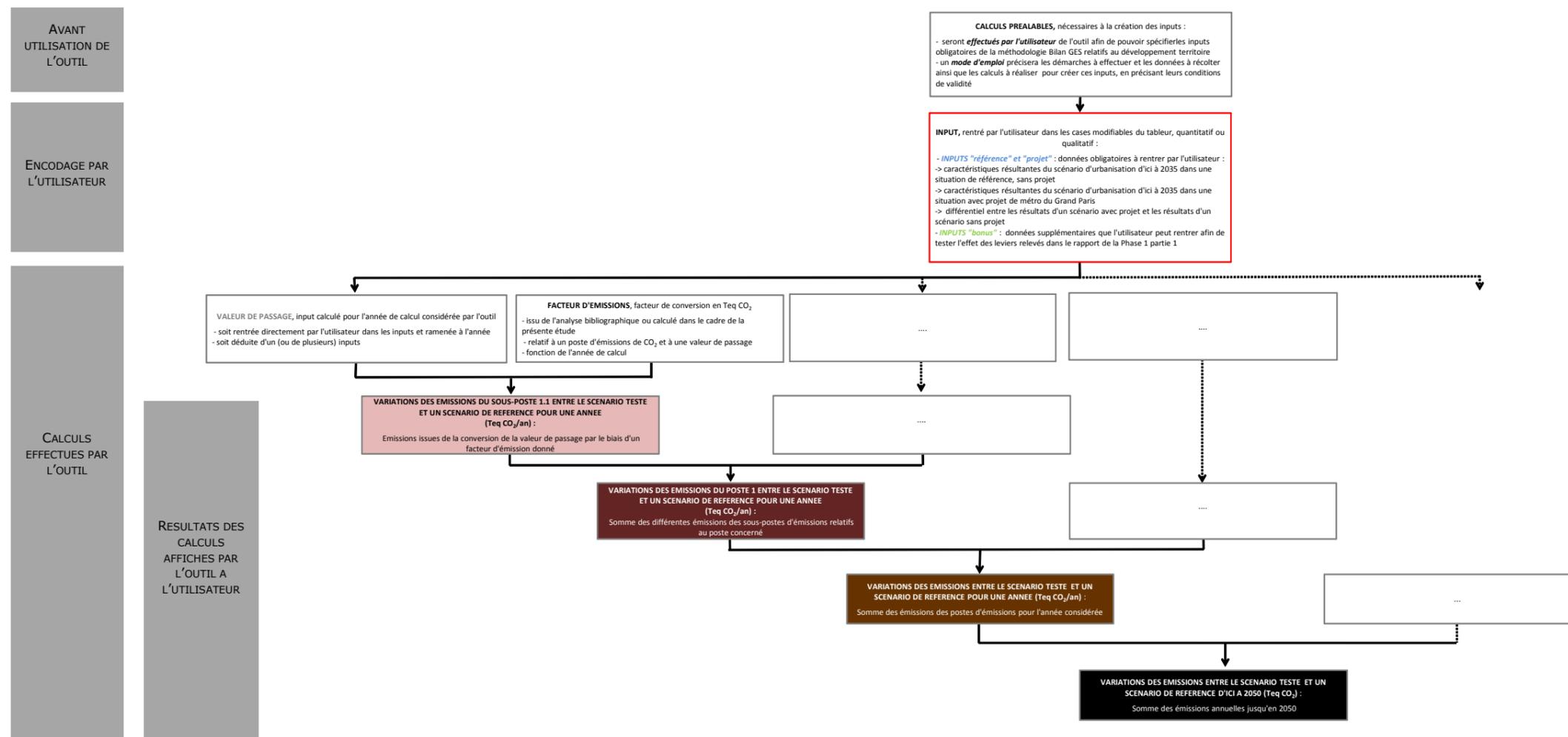


Figure 72 : Structure générale de la feuille « développement territorial » (Source : Stratec, 2011)

2.4.5.2 Calcul des émissions annuelles de chaque poste d'émissions : valeurs de passage et facteurs d'émissions proposés

Pour rappel, les trois postes d'émissions de gaz à effet de serre liés au développement territorial retenus sont :

- **Poste n°1 (P1) : la construction des bâtiments (résidentiels ou tertiaires), des voiries et des réseaux divers.** P1 comporte comme sous-postes :
 - la fabrication, l'acheminement et l'utilisation des matériaux pour le chantier des bâtiments (SP 1.1) ;
 - les coûts de viabilisation des zones urbanisées (SP 1.2) ;
 - le changement d'utilisation des terrains lors de la construction des bâtiments (SP 1.3) ;
- **Poste n°2 (P2) : l'exploitation des bâtiments,** qui comporte comme sous-postes :
 - la consommation de chauffage des bâtiments (SP 2.1) ;
 - les coûts de maintenance et d'opération des VRD et des services publics qui desservent les bâtiments (SP 2.2) ;
- **Poste n°3 (P3) : la mobilité des individus** influencée par les formes urbaines.

Pour rappel, ces postes ont été retenus :

- d'une part, parce que les émissions de CO₂ qu'ils impliquent sont quantitativement importants ;
- d'autre part, parce qu'il existe aujourd'hui des marges de manœuvre pour influencer positivement les émissions de ces postes ;
- et enfin car le projet de réseau de transport public dispose, par le biais des CDT, de leviers d'action pour profiter de ces marges de manœuvre et influencer positivement les émissions de ces postes.

Le bilan comparatif des émissions de téq CO₂ entre le scénario d'urbanisation testé et un scénario d'urbanisation de référence s'effectuera en tenant compte uniquement de ces 3 postes d'émissions et, ce, chaque année durant la période 2005-2050. Les émissions annuelles de CO₂ calculées pour le Poste n°1 et le Poste n°2 seront la somme des émissions des sous-postes qui les composent. Chacun de ces sous-postes sera calculé par le biais d'un ou de plusieurs facteurs d'émissions permettant de convertir une valeur de passage (annuelle) en tonnes équivalent CO₂ (Cf. Figure 72, page 74).

Le Tableau 12 (page 75) liste les différentes valeurs de passage (en lignes) retenues pour le calcul des émissions annuelles des postes d'émissions (en colonne) et les facteurs d'émissions (cases) qui permettront la conversion en téq CO₂. Les paragraphes suivants permettent de rentrer dans les détails de ce tableau pour chaque sous-poste d'émissions c'est-à-dire : les valeurs de passage retenues et les facteurs d'émissions à intégrer dans le calcul.

| Poste | | P1 | | | P2 | P2 | P3 |
|-------------------|--|---|------------------------|----------------------------------|---|--|---|
| | | Construction des bâtiments, des voiries et des réseaux divers | | | Exploitation des bâtiments | Exploitation des bâtiments | Mobilité des individus influencée par les formes urbaines |
| Valeur de passage | | SP1.1 | SP1.2 | SP1.3 | SP2.1 | SP2.2 | |
| | | Chantier des bâtiments | Coûts de viabilisation | Changement d'occupation des sols | Consommation de chauffage des bâtiments | Coûts d'exploitation des services publics (déplacements + maintenance) | |
| VP I | Variation des surfaces résidentielles neuves entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE A | | | | | |
| VP II | Variation des surfaces tertiaires neuves entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE B | | | | | |
| VP III | Variation des surfaces résidentielles renouvelées entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE C | | | | | |
| VP IV | Variation des surfaces tertiaires renouvelées entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE D | | | | | |
| VP V | Variation des surfaces détruites entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE E | | | | | |
| VP VI | Pourcentage supplémentaire d'immeubles collectifs construits en scénario avec projet par rapport au scénario de référence | FE F | | | | | |
| VP VII | Parc résidentiel par période de construction en 2035 dans un scénario avec projet et un scénario de référence | | | | FC I | | |
| VP VIII | Parc tertiaire par période de construction en 2035 dans un scénario avec projet et un scénario de référence | | | | FC J | | |
| VP IX | Variation des surfaces rurales consommées pour l'urbanisation en extension entre un scénario avec projet et un scénario de référence | | | FE G | | | |
| VP X | Variation de la densité humaine nette sur la zone d'étude entre un scénario avec projet et un scénario de référence | | | | | | FE L |
| VP XI | Variation de la longueur de VRD construite pour les surfaces neuves entre un scénario avec projet et un scénario de référence | | FE H | | | FE K | |
| VP XII | Variation de la mixité fonctionnelle nette sur la zone d'étude entre un scénario avec projet et un scénario de référence | | | | | | FE M |

P1 = Poste d'émissions de CO₂ relatif au développement territorial n°1
 SP1.1 = Sous-poste n°1 relatif au Poste d'émissions n°1 d'émissions de CO₂
 VP I = Valeur de passage n°I, valeur de l'input pour l'année de calcul considérée, prise en compte pour le calcul des émissions du poste en question
 FE A = Facteur d'Emission relatif à l'influence de la Valeur de Passage concernée sur le poste d'émissions de CO₂ donné n°A
 Valeur de passage non prise en compte dans le calcul des émissions du poste considéré (pas d'influence ou influence faible)

Tableau 12 : interactions entre les postes d'émissions et les valeurs de passage retenus pour la feuille de calcul « développement territorial ». Ce tableau synthétise les paragraphes détaillés par sous-poste d'émissions présentés dans les pages suivantes (Source : Stratec, 2011)

Poste n°1 : la construction des bâtiments, des voiries et des réseaux divers

Sous-Poste 1.1. La fabrication, l'acheminement et l'utilisation des matériaux pour le chantier des bâtiments

On sait qu'aujourd'hui que, globalement, l'offre en surfaces bâties franciliennes est inférieure à la demande en occupation (c'est surtout le cas pour le logement). L'urbanisation liée au réseau de transport public du Grand Paris est l'occasion d'entraîner un mouvement important de rénovations et de démolitions/reconstructions. Par ailleurs, pour accueillir les accroissements de population et d'emploi prévisibles à l'horizon 2035, le parc bâti francilien devra nécessairement évoluer de manière conséquente pour accroître l'offre en logements et en bâtiments tertiaires. La mise en place du réseau de transport public du Grand Paris constitue dans ce cas un outil essentiel pour structurer cette urbanisation nouvelle. Les émissions de CO₂ qu'induit ou que permettra d'éviter le projet dans le SP1.1. seront la somme des émissions liées aux constructions, aux rénovations et aux démolitions qui s'effectueront sur le parc bâti d'ici à 2035 par rapport à un scénario de référence.

Remarque : entre 2035 et 2050, il est fait l'hypothèse que les mouvements du parc bâti n'auront plus un lien de cause à effet avec le projet de réseau de transport public du Grand Paris. Les variations des émissions de CO₂ sur le SP1.1. entre les scénarios avec et sans projet seront donc nulles entre 2035 et 2050.

| Poste | | P1 |
|-------------------|---|---|
| | | Construction des bâtiments, des voiries et des réseaux divers |
| Sous-Poste | | SP1.1 |
| | | Chantier des bâtiments |
| Valeur de passage | | |
| VP I | Variation des surfaces résidentielles neuves entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE A |
| VP II | Variation des surfaces tertiaires neuves entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE B |
| VP III | Variation des surfaces résidentielles rénovées entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE C |
| VP IV | Variation des surfaces tertiaires rénovées entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE D |
| VP V | Variation des surfaces détruites entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE E |
| VP VI | Pourcentage supplémentaire d'immeubles collectifs construits en scénario avec projet par rapport au scénario de référence | FE F |

Le total des surfaces construites, rénovées ou démolies d'ici à 2035 sera calculé préalablement par l'utilisateur (Cf. point 0) et pour chaque année entre 2005 et 2035 soit par l'utilisateur soit automatiquement par l'outil (Cf. point 2.4.5.4). Ainsi, on obtiendra, pour l'année de calcul, la différence de m² SHON :

- construits, rénovés ou détruits. On sait, en effet, que des fourchettes d'émissions de CO₂ différentes sont valables pour ces mouvements de parc bâti ;
- et par type d'affectation (logement, bureaux, etc.) des surfaces construites ou rénovées. La Réglementation Thermique en vigueur à l'année de construction ou de rénovation du bâtiment, à laquelle celui-ci devra se conformer, va définir des niveaux d'isolation de l'enveloppe à atteindre à minima, qui diffèrent selon l'affectation du bâtiment.

Un autre input spécifiera également le pourcentage d'immeubles collectifs construits (VP VI) par rapport à un scénario de référence. L'augmentation du nombre d'immeubles collectifs va permettre d'obtenir des réductions d'émissions de CO₂ significatives lors de la construction du fait d'une surface d'enveloppe (et donc de volume de matériaux à mettre en œuvre) moindre par rapport à des bâtiments non mitoyens.

| |
|--|
| P1 = Poste d'émissions de CO ₂ relatif au développement territorial n°1 |
| SP1.1 = Sous-poste n°1 relatif au Poste d'Émissions n°1 d'émissions de CO ₂ |
| VP I = Valeur de passage n°, valeur de l'input pour l'année de calcul considérée, prise en compte pour le calcul des émissions du poste en question |
| FE A = Facteur d'Émission relatif à l'influence de la Valeur de Passage concernée sur le poste d'émissions de CO ₂ donné n°A |

Concernant la définition des facteurs d'émissions relatifs aux calculs du SP1.1., on pourra prendre comme référence pour l'année 2005 les valeurs proposées par le Guide des facteurs d'émissions de l'ADEME pour les coûts de construction afin de définir **FE A** et **FE B** :

| Type de bâtiment | kg équivalent carbone par m ² | |
|-----------------------|--|--|
| | Construction métallique (hangar...) | Construction béton (immeuble de bureaux) |
| Logements | 40 | 119 |
| Bâtiments agricoles | 60 | 179 |
| Bâtiments industriels | 75 | 225 |
| Garages | 60 | 179 |
| Commerces | 50 | 150 |
| Bureaux | 43 | 128 |
| Enseignement | 40 | 120 |
| Santé | 40 | 120 |
| Loisirs | 46 | 138 |

Tableau 13 : kg équivalent carbone par m² de bâtiment construit selon l'affectation du bâtiment et les matériaux utilisés pour sa structure (Source : Guide des facteurs d'émissions, Bilan Carbone Entreprises et Collectivités, ADEME, janvier 2007)

Comme le Tableau 13 permet de le souligner, les émissions de CO₂ induites par la construction d'un bâtiment dépendent davantage de la nature des matériaux utilisés pour sa structure que de l'affectation future de ce bâtiment. Or, il sera difficile pour l'utilisateur de définir précisément la nature des matériaux mis en œuvre pour l'ensemble des nouveaux bâtiments d'ici à 2035, d'autant plus que ce choix relève de décision individuelle et ne peut être directement influencé ni par la réglementation thermique ni par un CDT. Nous proposons donc de calculer la valeur initiale des facteurs d'émissions A et B en se basant sur les pourcentages moyens des différents matériaux qu'on retrouve actuellement dans les structures des logements, des bureaux, des commerces, etc. Ces pourcentages permettraient de calculer une valeur actuelle pondérée du facteur d'émissions. Quant à l'évolution des facteurs d'émissions A et B dans le temps, elle aura la forme d'une courbe croissante par palier. En effet, la réglementation thermique (RT) se renforçant tous les ans par la mise en application d'une nouvelle RT, nous proposons que les émissions de CO₂ créées par la construction d'un m² SHON évolue proportionnellement aux objectifs de la RT en vigueur. Il s'agira également d'appliquer un facteur d'amortissement à cette courbe en supposant que les techniques de construction seront de moins en moins émissives. La lecture des études de Peuportier¹⁰⁴ sur l'analyse du cycle de vie des bâtiments et sur l'énergie grise des bâtiments, permettra de déterminer l'évolution de ces valeurs dans le temps. Par ailleurs, la partie 1 de la phase 1 avait permis de souligner l'influence de la part d'immeubles collectifs dans les surfaces construites sur les émissions de CO₂ induites (variation de la quantité de matériaux mis en œuvre). Afin de tenir compte de cette valeur de passage, il est donc proposé d'appliquer un facteur d'émission **FE F** égal à la valeur de FE A (pour le résidentiel) ou de FE B (pour le tertiaire) pour l'année considérée, moins un pourcentage de réduction qui sera défini dans la phase 2 de l'étude.

Concernant les facteurs d'émissions **FE C** et **FE D**, spécifiques à la rénovation, il s'agira d'appliquer, de la même façon, un pourcentage de variation des valeurs annuelles des facteurs d'émissions A et B. L'évolution de FE C et FE D dans le temps sera décrite par une courbe semblable à celle de FE A et FE B. En effet, les coûts de rénovation seront également sujet à un renforcement de la Réglementation Thermique applicable dorénavant à la rénovation et, en parallèle, à l'amélioration des techniques de construction mises en œuvre. En ce qui concerne le facteur d'émission **FE E**, il permettra de calculer les émissions de CO₂ créées par la démolition des bâtiments et celles créées par le transport et l'évacuation des déchets de cette destruction. Comme les émissions de CO₂ issues du processus de destruction d'un bâtiment représentent une part relativement faible par rapport à celles liées à sa construction (de 1 à 3%¹⁰⁵), il est proposé d'utiliser un facteur d'émission commun à tous les types d'affectation de bâtiments (par souci de simplification). Ainsi, il est fait l'hypothèse que les émissions seront uniquement influencées par

¹⁰⁴ Par exemple: Peuportier, B., Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context, Energy and Building, 2001

¹⁰⁵ Source : The influence of construction materials on life-cycle energy use and carbon dioxide emissions of medium size commercial buildings, N.P.Fernandez, July 2008

la surface SHON détruite. Pour la détermination de ce facteur, et son évolution dans le temps, on pourra se référer aux études de Peuportier sur l'analyse du cycle de vie des bâtiments.

Ce facteur sera ensuite multiplié par le total des surfaces construites ou rénovées en passif.

L'« input bonus » n°1

A noter également qu'un « input bonus » sera disponible pour l'utilisateur pour agir sur ce sous-poste d'émissions, en l'occurrence l'introduction de bâtiments (nouveaux ou rénovés, résidentiels ou tertiaires) construits en haute performance énergétique.

Pourquoi l'intégration de cet « input bonus » ?

Car le rapport de partie 1 a permis de souligner les gains non négligeables en termes d'émissions de CO₂ que l'introduction de bâtiments à haute (ou très haute) performance énergétique permettait de créer à moyen terme : près de 100kWh/m² économisés annuellement uniquement sur le poste de chauffage par rapport à une maison « standard » (Cf. Figure 73).

Toutefois, l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments engendre également en phase de construction des émissions de CO₂ plus importantes du fait de la nature et de la quantité des matériaux à mettre en œuvre pour atteindre ces performances énergétiques plus élevées (Cf. Figure 73). D'où l'intérêt d'intégrer cette composante dans le calcul en phase exploitation et construction du bâtiment afin de voir l'impact réel de telles mesures sur l'ensemble de la durée de vie d'un (puis de plusieurs) bâtiment(s).

Comment calculer ses effets sur les émissions du sous-poste dans l'outil ?

HPE, HPE EnR, THPE, BEPOS, etc. sont autant de labels aujourd'hui développés qui permettent d'appliquer une amélioration énergétique aux bâtiments neufs ou rénovés par rapport à la RT. Pour simplifier, nous considérons que l'«input bonus» sera lié à la mise en œuvre de bâtiments passifs (label BEPAS). Le label BEPAS est aujourd'hui en France un label très ambitieux mais on peut supposer que dans les années à venir il sera équivalent à un label de type « haute performance énergétique » (HPE). C'est un label que les CDT pourraient encourager à mettre en œuvre.

Cet input « bonus », s'il est spécifié par l'utilisateur, influencera respectivement les facteurs d'émissions FE A, FE B, FE C et FE D. Concrètement, un pourcentage supplémentaire d'émissions de CO₂ pour la construction ou la rénovation viendra s'ajouter à la valeur du facteur d'émission. La définition de ce pourcentage pourra se référer aux chiffres de la Figure 73 ci-dessous (exprimés en kWh ep/m²/an), issus des travaux du projet européen REGENER.

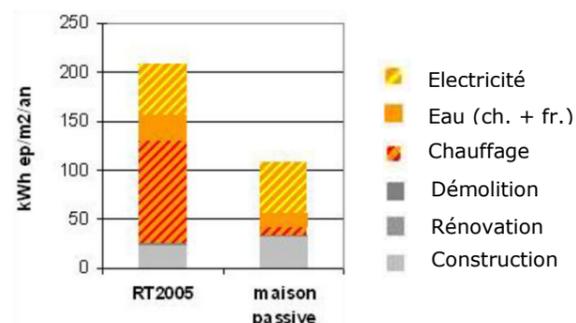


Figure 73 : Comparaison de l'énergie primaire par unité de surface consommée sur une durée de 80 ans entre une maison d'Ile-de-France respectant les normes standards (Réglementation Thermique 2005) et une maison passive (Source : Projet européen REGENER, Analyse de cycle de vie des bâtiments, B. PEUPORTIER, Ecole des Mines de Paris, 1995-1996)

Sous-Poste 1.2. Les coûts de viabilisation des zones urbanisées (SP 1.2)

Pour rappel, les émissions liées aux travaux de viabilisation représentent les investissements initiaux de construction des voiries et réseaux divers (eaux usées, électricité, téléphone, etc.) nécessaires à l'extension des zones d'habitat et d'activités tertiaires. Comme nous l'avons vu (CF. Phase 1, partie 1, page 50), les émissions de GES créées par ces coûts de viabilisation sont fonction de la longueur des infrastructures à construire ainsi que des techniques de construction mises en œuvre pour raccorder le nouveau bâti au réseau existant.

Dans la méthodologie de calcul du futur outil, nous proposons d'inclure la longueur des VRD à construire et non pas les techniques de construction car il sera très difficile au niveau des études d'impact de définir précisément quelle technique sera mise en œuvre pour la construction de chaque kilomètre de VRD construit d'ici à 2035.

Sous cette hypothèse, les variations d'émissions de CO₂ pour le SP1.2. entre un scénario de projet et un scénario de référence seront calculées à partir de la différence de kilométrage de nouveaux VRD à construire pour les surfaces neuves entre ces deux scénarios.

| | | |
|-------------------|---|---|
| | | P1 |
| | Poste | Construction des bâtiments, des voiries et des réseaux divers |
| Valeur de passage | Sous-Poste | SP1.2 |
| | | Coûts de viabilisation |
| VP XI | Variation de la longueur de VRD construite pour les surfaces neuves entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE H |

- P1 = Poste d'émissions de CO₂ relatif au développement territorial n°1
- SP1.1 = Sous-poste n°1 relatif au Poste d'émissions n°1 d'émissions de CO₂
- VP I = Valeur de passage n°1, valeur de l'input pour l'année de calcul considérée, prise en compte pour le calcul des émissions du poste en question
- FE A = Facteur d'Emission relatif à l'influence de la Valeur de Passage concernée sur le poste d'émissions de CO₂ donné n°A

La différence entre les kilomètres de VRD à construire dans le cas d'un scénario avec projet et dans le cas d'un scénario de référence sera calculée préalablement par l'utilisateur à l'horizon 2035 (Cf. point 2.4.5.3) et définie pour chaque année entre 2005 et 2035 soit par l'utilisateur soit par l'outil (Cf. point 2.4.5.4).

Remarque : entre 2035 et 2050, il est considéré que les nouveaux VRD construits (et donc les nouveaux bâtiments que ces VRD alimenteront) n'auront plus un lien de cause à effet avec le projet de réseau de transport public du Grand Paris. Les variations des émissions de CO₂ sur le SP1.2. entre les scénarios avec et sans projet seront donc nulles entre 2035 et 2050.

Le facteur d'émission **FE H** permettra de convertir, pour chaque année de calcul, ces kilomètres de VRD nouveaux en tég CO₂.

Le manuel d'utilisation de l'outil Bilan Carbone Territoire¹⁰⁶ préconise différents facteurs d'émissions relatifs aux émissions liées à la construction des voiries et des parkings. Ces facteurs d'émissions sont fonction de la largeur et de la longueur des infrastructures routières, de la catégorie de voie ainsi que de la structure utilisée :

| Catégorie de voie ¹⁰⁷ | Structure de la voie routière | | |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------|----------|
| | ciment | semi rigide | bitumeux |
| TC1 | 85 | 40 | 15 |
| TC2 | 87 | 45 | 20 |
| TC3 | 92 | 45 | 25 |
| TC4 | 100 | 54 | 28 |
| TC5 | 105 | 57 | 32 |
| TC6 | 115 | 60 | 37 |
| TC7 | 125 | 65 | 40 |

Tableau 14 : kg éq C/m² voirie construite selon la catégorie de voirie et sa structure (Source : guide d'utilisation de l'outil Bilan Carbone Territoire, ADEME, juin 2010). Ces facteurs doivent être divisés par 0.274 pour la conversion en kg éq. CO₂/m².

Ainsi, si l'on part du principe d'utiliser un facteur commun à tous les types de route, fonction uniquement du kilométrage de voirie, il est possible de considérer celui spécifique à une route de ville bitumeuse de 8 mètres de large en moyenne, et prévue pour un trafic faible de camions (TC2). Ainsi, d'après le Tableau 14, on obtient un facteur d'émissions égal à 586 téq. CO₂.

Il s'agira, durant la Phase 2, de trouver également des valeurs relatives aux émissions créées par la construction des réseaux divers (égouts, électricité, etc.) pour calculer un facteur d'émission résultant FE H, fonction du kilométrage de l'ensemble des VRD construits.

En ce qui concerne l'estimation de l'amélioration des émissions créées par ces coûts de construction, nous utiliserons les mêmes taux que ceux de l'étude du Centre d'Analyse Stratégique¹⁰⁸ qui considère une réduction de 0.3 à 0.45% par an de ces taux. Nous utiliserons les mêmes hypothèses que précédemment¹⁰⁹ et retiendrons une réduction de 0.3% par an du facteur d'émission FE H à partir de 2005.

Sous-Poste 1.3. Le changement d'utilisation des terrains lors de la construction des bâtiments (SP 1.3)

Pour rappel, ce sous-poste représente les variations du stock de carbone contenu dans le sol et la biomasse et la suppression de l'utilisation potentielle de ces surfaces pour la production de biocarburants ou de matières combustibles (bûches, plaquettes,...) lors d'un changement d'utilisation de ces terrains (construction de bâtiments).

Les variations d'émissions de CO₂ pour le SP1.3. seront donc calculées à partir de la différence de surfaces rurales consommées par l'urbanisation définie d'ici à 2035 pour un scénario avec projet et un scénario sans projet.

Une réduction des émissions du SP1.3. en situation de projet, signifierait donc que la densification des constructions et la préservation des espaces ruraux définies par les stratégies

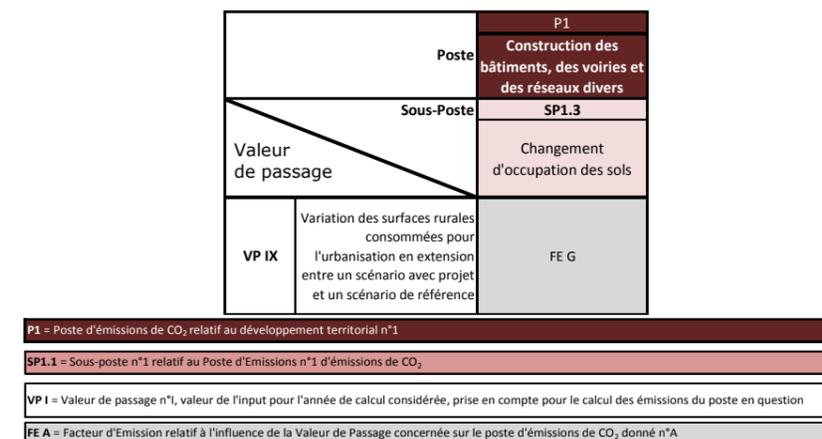
¹⁰⁶ ADEME, juin 2010

¹⁰⁷ Cf. nomenclature des travaux publics : « TC1 correspond à une voie prévue pour accueillir moins de 35 poids-lourds par jour (dans chaque sens), et TC7 à une voie prévue pour en accueillir de 2500 à 5000. Les parkings "normaux" (par exemple les parkings de grandes surfaces) sont construits comme des voies de classe TC2, et les parkings "intensifs" (par exemple les aires de stationnement sur autoroute) sont assimilables à des voies de classe TC3. » (Guide d'utilisation de l'outil Bilan Carbone Territoire, ADEME, 2010)

¹⁰⁸ Source : Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 : rapport de la commission Energie présidée par Jean Syrota, Centre d'Analyse Stratégique, 2007

¹⁰⁹ Cf chapitres précédents

d'aménagement menées en parallèle au projet auront permis de préserver le stock de carbone contenu aujourd'hui dans la biomasse et le sol de ces espaces et de continuer à utiliser ces ressources naturelles pour produire de l'énergie renouvelable.



La différence de consommation de surfaces rurales dans le cas d'un scénario avec projet et dans le cas d'un scénario de référence sera calculée préalablement par l'utilisateur à l'horizon 2035 (Cf. point 2.4.5.3) et distribuée pour chaque année entre 2005 et 2035 soit par l'utilisateur soit par l'outil (Cf. point 2.4.5.4).

Remarque : entre 2035 et 2050, il est considéré que la consommation de nouveaux espaces ruraux dues à l'urbanisation en extension n'aura plus un lien de cause à effet avec le projet de réseau de transport public du Grand Paris. Les variations des émissions de CO₂ sur le SP1.3. entre les scénarios avec et sans projet seront donc nulles entre 2035 et 2050.

Il s'agira ensuite, à partir de la différence annuelle d'hectares ruraux consommés, d'appliquer un facteur d'émission **FE G**.

En ce qui concerne le déstockage du carbone, c'est-à-dire la libération de CO₂ induite par un changement d'affectation du sol, on se référera notamment aux chiffres publiés par le GIEC (Figure 74).

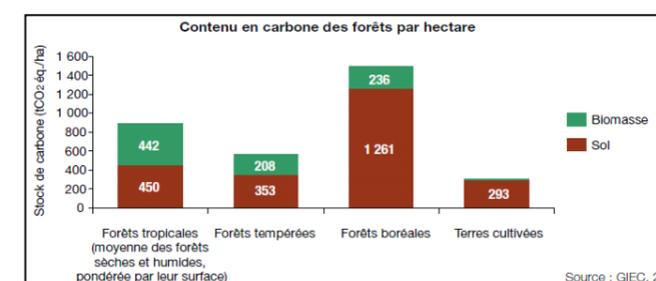


Figure 74 : Stocks de carbone contenus dans la biomasse et le sol selon le type d'occupation du territoire (Source : GIEC, 2000)

Une autre étude réalisée par bio Intelligence Service (2008)¹¹⁰ basée sur différentes références internationales donne les chiffres suivants :

| Type de sol | sol | surface | total |
|----------------|---------------------------|---------|-------|
| | T éq CO ₂ / ha | | |
| Forêt tempérée | 230 | 268 | 497 |
| Pairie | 230 | 23 | 253 |
| Culture | 171 | 18 | 189 |

Tableau 15 : Contenu en carbone de différents types de surfaces naturelles.
Source : Bio Intelligence Service, 2008.

Ces valeurs représentent les émissions de CO₂ libérées en une fois lors de la libération du carbone par déstockage de la matière organique contenue dans le sol et la végétation et seront prises en compte dans le calcul pour l'année *n* d'urbanisation du terrain.

Pour les années suivantes *n+1*, *n+2*, etc. il conviendra d'ajouter les émissions annuelles qui ne pourront être évitées grâce à l'utilisation de ces surfaces pour produire de l'énergie renouvelable (biocarburants et bio combustibles).

Utilisation des forêts pour la production d'énergie renouvelable

Le remplacement de surfaces boisées par des surfaces urbanisées libère du carbone par déstockage de la matière organique contenue dans le sol et la végétation mais supprime également l'utilisation potentielle de ces forêts pour la production de matières combustibles (bûches, plaquettes,...). La forêt s'apparente, en effet à une usine écologique de production d'énergie renouvelable qui, non seulement, immobilise une quantité de carbone mais produit également continuellement de la biomasse pouvant être exportée pour la production de chaleur par combustion. Il convient donc de tenir compte des émissions annuelles qui ne pourront être évitées à cause de la diminution de production de ces matières combustibles.

La quantité de matière combustibles exportées annuellement par hectare de forêt est très variable en fonction de l'espèce et du type de matières extraites pour être utilisée comme combustible (bûches, plaquettes, ...). D'après l'Inventaire Forestier National, la production de bois est globalement pour la France de 5.3 m³ par ha ce qui correspond approximativement à 4.4 tonnes par ha et par an (poids humide). Mais les nouveaux systèmes de production dédiés spécifiquement à la production de biomasse peuvent produire jusque 10 à 20 tonnes de matières sèches / ha / an.

Nous considérerons que la production d'un hectare de forêt produira en moyenne 5 tonnes de matières humides (40% humidité) par ha et par an. Cette valeur assez faible correspond à un système de production non intensif car il est peu probable que toutes les surfaces en question soient converties en cultures intensives. Le contenu énergétique de ces matières est évalué à 2.8 MWh / tonne¹¹¹. Un hectare de forêt permet donc la production de 14 MWh / ha / an.

Les chaudières à plaquettes ou à granulés étant en expansion continue et leur rendement étant similaire (de 75 à 90%¹¹²) à ceux des chaudières traditionnelles, on peut considérer que la quantité d'énergie utile obtenue à partir du bois-énergie sera similaire à celle provenant d'une quantité de gaz de contenu énergétique égal.

En posant l'hypothèse que cette énergie non produite en cas d'urbanisation des surfaces forestières serait remplacée par l'électricité, le gaz naturel et le mazout en proportions similaires à celles de la répartition actuelle entre ces énergies pour le chauffage des habitations

(approximativement 16% mazout, 51% gaz, 33% électricité), on obtient alors un total de 2,58 tonnes éq CO₂ évitées. Il ne faut pas oublier de déduire de ces émissions évitées, les émissions nécessaires à la transformation et au transport du bois-énergie qui s'élèvent à 204 kg éq CO₂ (calculé à partir du facteur d'émissions 14,6kg éq CO₂ / MWh¹¹³). Au final, on obtient donc 2.38 tonnes éq CO₂ évités par hectare et par an grâce à la non suppression de surfaces forestières.

Utilisation des surfaces agricoles pour la production de biocarburants

La production de biocarburants est limitée par les surfaces agricoles disponibles pour leur culture. On peut donc considérer que toutes les surfaces préalablement agricoles qui seront transformées en surfaces urbanisées représentent une diminution des quantités de biocarburants pouvant être produits. La société étant dépendante de la consommation d'énergies fossiles, il convient donc de tenir compte dans le bilan des émissions de GES des émissions annuelles qui ne pourront pas être évitées suite à la transformation de surfaces agricoles en surfaces urbaines.

Pour calculer les émissions qui ne pourront être évitées nous devons analyser les quantités de biocarburants qui auraient pu être produites par hectare de surface et puis calculer les émissions évitées en utilisant ces biocarburants plutôt que des carburants fossiles.

Selon l'ONIGG¹¹⁴, les rendements pour une culture destinée aux biocarburants sont de 1,45 tonnes de biodiesel / ha / an et de 3,32 tonnes de bioéthanol / ha / an. Ceci est cohérent avec les valeurs présentées par l'ADEME et reprises dans le tableau ci-dessous :

| Culture pour biodiesel | t EMHV / ha ¹ | Proportion de la production (%) ₂ | T EMHV / ha moyen |
|-------------------------|--------------------------|--|----------------------|
| Colza | 1.32 | 87.5 | 1.28 |
| Tournesol | 0.96 | 12.5 | |
| Culture pour bioéthanol | T éthanol / ha | Proportion de la production (%) | T éthanol / ha moyen |
| Betterave | 5.76 | 35 | 3.58 |
| Blé | 2.25 | 51 | |
| Maïs | 2.992 | 14 | |

Tableau 16 : Rendements de la production de biocarburants par culture et en moyenne pour la France.
Sources : ¹ Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France, ² Biocarburants 2010 : Quelles utilisations des terres en France, 2007, Office National Interprofessionnel des Grandes Cultures (ONIGG).

Sur base des valeurs du tableau, s'il on considère une répartition entre les cultures dédiées à la production de biodiesel et celles dédiées au bioéthanol similaire à celle de la France (respectivement 87% et 13% des surfaces), 1 hectare permet donc la production de 1.11 tonnes de biodiesel et 0.47 tonnes de bioéthanol par année de culture. On peut considérer par ailleurs que ces cultures ne peuvent représenter que deux tiers des utilisations de la rotation agricole (la troisième année pouvant être utilisée pour la jachère, par exemple) et donc qu'un hectare permettrait de produire en moyenne 0.74 tonne de biodiesel et 0.31 tonne de bioéthanol par an. Ceci correspond en équivalent énergétique à 0.58 tonne de diesel fossile et à 0.19 tonne d'essence fossile. En comptant, comme nous l'avons vu, que le biodiesel permet une réduction de 67.5% des émissions par rapport au diesel et le bioéthanol une réduction de 63.6% par rapport à l'essence, et en reprenant les émissions totales estimées pour l'utilisation de carburants (3.741 kg éq CO₂/kg essence et 3.471 kg éq CO₂/kg diesel), on obtient un total de 1.82 tonnes éq CO₂ / ha / an d'émissions qui auraient pu être évitées.

¹¹⁰ Bio Intelligence Service, 2008, *Elaboration d'un référentiel méthodologique pour la réalisation d'ACV appliquées aux biocarburants de première génération en France*, ADEME, MEDAD, MAP, ONIGC, IFP.

¹¹¹ Guide des facteurs d'émissions v6.1, ADEME, 2010

¹¹² Le bois-énergie, ADEME, www.ademe.fr/midi-pyrenees/a_2_02.html

¹¹³ Guide des facteurs d'émissions V6.1, ADEME, 2010.

¹¹⁴ Biocarburants 2010 : Quelles utilisations des terres en France, 2007, Office National Interprofessionnel des Grandes Cultures (ONIGG).

Poste n°2 : l'exploitation des bâtiments

Sous-Poste 2.1. La consommation de chauffage des bâtiments

Comme vu précédemment (Cf. SP1.1), l'urbanisation liée au réseau de transport public du Grand Paris est susceptible d'entraîner un mouvement plus important de constructions, de rénovations et de démolitions/reconstructions par rapport à une évolution « au fil de l'eau » dans le cas d'une situation 2035 sans projet. Or, comme la partie 1 de l'étude a permis de le souligner¹¹⁵, la période de construction du bâtiment est le facteur d'influence déterminant en ce qui concerne les consommations énergétiques des bâtiments.

Les réductions d'émissions de CO₂ pour le SP2.1. seront calculées pour un scénario de projet par rapport à un scénario de référence et représentent les économies annuelles en consommation de chauffage réalisées grâce à un taux de renouvellement accentué du parc bâti qui permet d'améliorer globalement les performances énergétiques du parc d'ici à l'horizon 2050.

Remarque : s'il est supposé ici que la mise en œuvre du réseau de transport public du Grand Paris n'influencera plus directement l'évolution du parc bâti après 2035, ce projet continuera à générer les réductions de consommations énergétiques sur cette période grâce à l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments construits ou rénovés avant 2035 dans un scénario avec projet par rapport à un scénario de référence.

Pour le calcul des variations des émissions de CO₂ pour le SP2.1., il est proposé de considérer uniquement l'affectation des bâtiments et leur période de construction comme composantes des calculs.

Nous l'avons vu¹¹⁶, d'autres caractéristiques urbaines ou architecturales influencent les besoins énergétiques du bâtiment, comme la compacité ou le taux de mitoyenneté. Par exemple, il est admis aujourd'hui qu'un tissu urbain plus dense avec une forte proportion d'habitat collectif nécessite en général des techniques d'isolation moins performantes qu'un tissu diffus pour obtenir les mêmes consommations de chauffage (toutes choses étant égales par ailleurs). Toutefois, si ces bâtiments ont été construits durant une période identique, après 1975, leur consommation annuelle en chauffage sera globalement identique quelles que soient leurs caractéristiques architecturales ou le tissu urbain dans lequel ils se situent, car cette consommation doit respecter a minima les objectifs définis par la Réglementation Thermique en vigueur à l'époque de leur construction (Cf. Figure 75). En d'autres termes, si les composantes architecturales et urbaines ont une influence sur les émissions de CO₂ liées à la construction de ces bâtiments¹¹⁷ (Cf SP1.1.), elles n'en ont pas sur celles liées aux consommations de chauffage pour l'exploitation des bâtiments récents. C'est pourquoi elles n'ont pas été retenues comme composantes de calcul pour le SP2.1.

| | | |
|-------------------|---|---|
| | | P2 |
| | | Exploitation des bâtiments |
| | | SP2.1 |
| Valeur de passage | | Consommation de chauffage des bâtiments |
| VP VII | Parc résidentiel par période de construction en 2035 dans un scénario avec projet et un scénario de référence | FC I |
| VP VIII | Parc tertiaire par période de construction en 2035 dans un scénario avec projet et un scénario de référence | FC J |

| |
|---|
| P1 = Poste d'émissions de CO ₂ relatif au développement territorial n°1 |
| SP1.1 = Sous-poste n°1 relatif au Poste d'Émissions n°1 d'émissions de CO ₂ |
| VP I = Valeur de passage n°, valeur de l'input pour l'année de calcul considérée, prise en compte pour le calcul des émissions du poste en question |
| FE A = Facteur d'Émission relatif à l'influence de la Valeur de Passage concernée sur le poste d'émissions de CO ₂ , donné n°A |

La structure détaillée du parc bâti par m² SHON, par type d'affectation et par période de construction dans le cas d'un scénario avec projet et dans le cas d'un scénario de référence sera calculée préalablement par l'utilisateur à l'horizon 2035 (Cf. § 2.4.5.3). La structure de ces deux parcs sera définie pour chaque année entre 2005 et 2050 soit par l'utilisateur soit par l'outil à partir des valeurs 2005 et 2035 (Cf. § 2.4.5.4 pour la méthode de calcul).

Il est proposé, dans un but de simplification, d'utiliser les mêmes facteurs d'émissions pour les m² SHON d'une même tranche d'âge et d'une même affectation qu'ils soient en ou hors de l'Ile-de-France.

Concrètement, l'onglet « développement territorial » va calculer les émissions de CO₂ émises durant l'année de calcul pour le chauffage des m² SHON du parc bâti selon leur affectation et leur période de construction. Le bilan global de ces émissions annuelles va être calculé, d'une part, pour l'ensemble des surfaces d'un parc bâti défini dans le cas d'un scénario avec projet et, d'autre part, pour les surfaces d'un parc bâti défini dans un scénario de référence. La soustraction de ces deux résultats permettra de quantifier les variations des émissions de CO₂ pour le SP2.1.

Remarque 1 : entre 2035 et 2050, la structure des parcs bâtis dans un scénario avec et sans projet sera identique à celle définie pour 2035 car il est supposé que la mise en œuvre du réseau de transport public du Grand Paris n'influencera pas directement l'évolution de ce parc après 2035.

Remarque 2 : les parcs bâtis ainsi définis pour chaque année représenteront les surfaces totales nécessaires à l'accueil d'un nombre d'habitants et d'emplois équivalent. En d'autres termes, il est considéré que les bâtiments supplémentaires qui seront construits à l'horizon 2035 dans le scénario avec projet seront, dans le cas du scénario de référence, des bâtiments déjà existants hors de l'Ile-de-France.

Remarque 3 : les surfaces vacantes du parc bâti ne sont pas prises en compte dans ce calcul. Il est considéré, par exemple, que les nouvelles surfaces construites durant une année entre 2005 et 2035 seront directement occupées.

D'une part, les facteurs « de consommation » **FC I** et **FC J** permettront de convertir les m² du parc bâti, définis pour l'année de calcul, en kWh consommés pour le chauffage annuel des bâtiments résidentiels (FC I) et tertiaires (FC J) qui ont la même tranche d'âge.

Pour définir les valeurs actuelles de consommation de chauffage par m² résidentiel (**FC I**), il est possible de se référer aux valeurs présentées dans la Figure 75, issues d'un travail de modélisation du parc résidentiel francilien. Pour les consommations actuelles de chauffage des bâtiments tertiaires (**FC J**), étant donné que très peu de chiffres sont disponibles sur le sujet à l'heure actuelle, on pourra se référer aux chiffres nationaux du Tableau 17 et du Tableau 18, issus du guide de l'ADEME.

¹¹⁵ Cf partie 1 de la phase 1

¹¹⁶ Cf partie 1 de la phase 1

¹¹⁷ Le bâti en zone diffuse nécessitera des coûts de construction plus importants au départ pour atteindre les mêmes performances d'isolation du fait d'une enveloppe plus importante

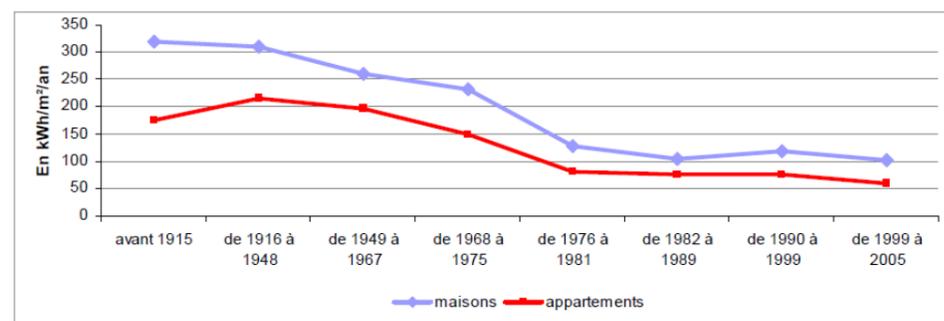


Figure 75 : La consommation conventionnelle des maisons et appartements, par tranche d'âge en kWh/m²/an (énergie finale pour le chauffage) (Source : ENERTER 2005 (Energie Demain)/INSEE in L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, 2010)

| Nature d'activité | Fioul (kWh/m ²) |
|------------------------|-----------------------------|
| Commerces | 197 |
| Bureaux | 248 |
| Enseignement | 161 |
| Santé - action sociale | 292 |
| Autres branches | 259 |

Tableau 17 : Consommation moyenne par m² de fioul pour le chauffage selon la nature de l'activité tertiaire (Source : Guide des facteurs d'émissions, Bilan Carbone Entreprises et Collectivités, version 5.0, ADEME, janvier 2007 sur base des chiffres de l'Observatoire de l'Energie, 2001)

| Dépense moyenne en kWh/m ² - Gaz naturel | | |
|---|-----------------------|-----------|
| Branche | Sous-Branche | Chauffage |
| Bureaux | Ensemble | 177 |
| | <1000m ² | 191 |
| | >=1000m ² | 163 |
| Enseignement | Ensemble | 108 |
| | Primaire | 157 |
| | Secondaire | 86 |
| | Supérieur - Recherche | 127 |
| Santé | Ensemble | 134 |
| | Hôpitaux publics | 148 |
| | Cliniques | 117 |
| | Restant | 126 |
| Commerces | Ensemble | 142 |
| | Grandes surfaces (2) | |
| | Petits commerces (1) | 260 |
| | Grands commerces (2) | |
| Cafés Hôtels Restaurants | Ensemble | 220 |
| | Restaurants | 244 |
| | Débits de boisson | 175 |
| | Hôtels | 203 |

Tableau 18 : Consommation moyenne par m² de gaz naturel pour le chauffage selon la nature de l'activité tertiaire (Source : Guide des facteurs d'émissions, Bilan Carbone Entreprises et Collectivités, version 5.0, ADEME, janvier 2007 sur base des chiffres du CEREN, 1990-2003)

Pour l'évolution des valeurs de ces facteurs dans le futur, il est suggéré de se référer aux objectifs de consommations annuelles de chauffage définis par la Réglementation Thermique pour chaque m² résidentiel ou tertiaire construit ou rénové. La RT évolutive fixe (et fixera), en effet, par type d'affectation du bâtiment, une limite de consommation maximale en énergie primaire pour les consommations conventionnelles de chauffage. Cette limite est déclinée par énergie : combustibles fossiles ou chauffage électrique (y compris les pompes à chaleur). Les

valeurs définies par les différentes RT jusqu'en 2035 permettront ainsi de caler la courbe d'évolution des deux facteurs FE I et FE J jusqu'en 2050 (courbe à palier, pas de temps de 5 ans).

L'« input bonus » n°1

Cet « input bonus », déjà présenté au SP1.1., sera disponible pour l'utilisateur et agira sur ce sous-poste d'émissions. Il s'agit de la possibilité d'introduire dans le parc des bâtiments (nouveaux ou rénovés, résidentiels ou tertiaires) construits en en haute performance énergétique.

Pourquoi l'intégration de cet « input bonus » ?

Pour tester l'introduction progressive dans le parc de bâtiments visant une ambition énergétique qui va au-delà du simple respect des exigences thermiques en vigueur, que les CDT pourraient encourager, et ses effets à moyen terme sur la réduction des émissions de CO₂ liées au chauffage.

Comment calculer ses effets sur les émissions du sous-poste dans l'outil ?

Comme pour le SP1.1., nous considérons que cet input « bonus » sera lié à la mise en œuvre de bâtiments passifs (label BEPAS). Cet input optionnel, s'il est spécifié par l'utilisateur, influencera les facteurs de consommation FC I et FC J dans le sens où un bâtiment passif, par définition, « s'auto-suffit » et ne consomme aucune autre énergie pour le chauffage que celle qu'il produit au travers des énergies renouvelables. Concrètement, un FC I ou un FC J égal à 0 sera appliqué au pourcentage de m² de bâtiment passif spécifié par l'utilisateur.

D'autre part, il s'agira de répartir les kWh consommés pour le chauffage calculés pour une année selon le type d'énergie utilisée. Pour cela, il est nécessaire de :

- répartir le total des kWh calculés pour les m² résidentiels en énergie finale pour le chauffage par type d'énergie utilisée (en %) ;
- calculer un facteur de consommation FC J pondéré par la consommation conventionnelle en énergie primaire définie par la RT par type d'énergie et le pourcentage annuel d'utilisation de cette énergie pour le chauffage des bâtiments.

Nous proposons que la définition de la répartition actuelle de différentes énergies pour le chauffage du résidentiel soit définie à partir des valeurs présentées à la Figure 76, par période de construction et typologie (maison individuelle/habitat collectif).

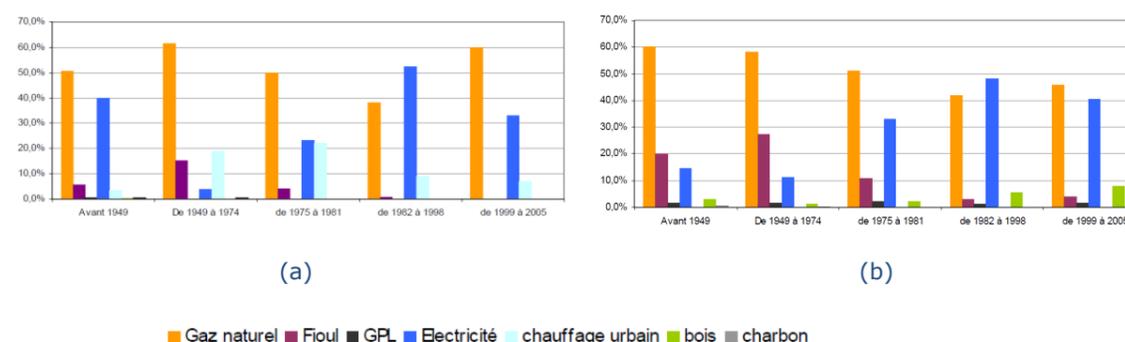


Figure 76 : Part des énergies utilisées en Ile-de-France pour le chauffage selon l'époque de construction en (a) logement collectif et (b) en maison individuelle. Source : ENERTER 2005 (Energie Demain)/INSEE in L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, 2010)

Concernant le secteur tertiaire, nous proposons d'utiliser les statistiques françaises ci-dessous, issues du CEREN :

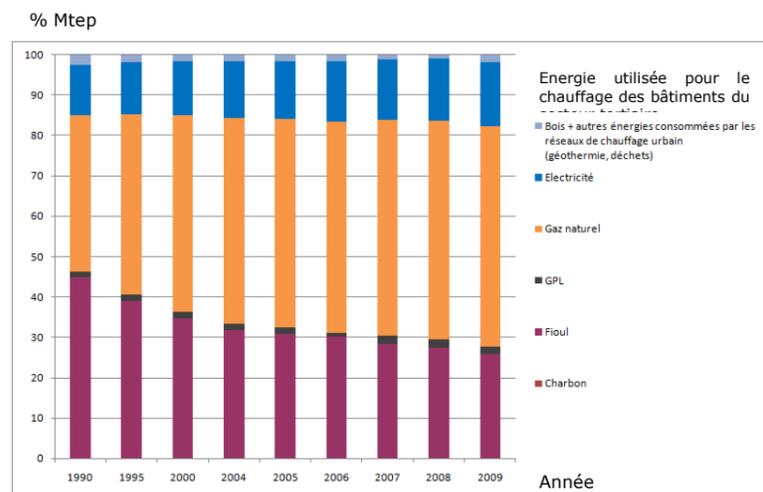


Figure 77 : Part des consommations de différentes énergies dans le poste chauffage des bâtiments du secteur tertiaire¹¹⁸ entre 1990 et 2009 en France (en % de Mtep) (Source : CEREN, données mises à jour en juin 2011)

Pour déterminer l'évolution des répartitions des différentes énergies pour le chauffage dans le temps, il est proposé de se référer aux études du Commissariat général du Plan et de l'Observatoire de l'Energie concernant les perspectives d'évolution des parts de marché des énergies de chauffage.

La définition de l'évolution des parts des énergies dans le chauffage dans le temps et, ce, pour le résidentiel et le tertiaire fera l'objet d'un point détaillé dans le rapport de Phase 2.

Ainsi, on obtiendra pour chaque année des kWh/énergie consommés pour le chauffage de l'ensemble des surfaces du parc bâti dans le cas d'un scénario avec projet et dans le cas d'un scénario de référence. Pour convertir ces kWh en téq CO₂, les facteurs d'émissions définis pour chaque année pour ces énergies seront utilisés. La somme des téq CO₂ émises par type d'énergie permettra d'obtenir le bilan global d'émissions de CO₂ pour les deux scénarios pour le SP2.1. La différence entre ces deux bilans soulignera les variations des émissions de CO₂ créées.

Sous-Poste 2.2. Les coûts de maintenance et d'opération des VRD et des services publics qui desservent les bâtiments

Les réductions potentielles d'émissions de CO₂ qui seront calculées pour le SP2.2. entre un scénario de projet et un scénario de référence résultent des émissions supplémentaires de CO₂ créées par l'allongement des distances de VRD à entretenir et par l'allongement des déplacements des services publics¹²⁰ nécessaires à la préservation de la qualité de l'offre de services publics dans les nouveaux espaces urbanisés.

¹¹⁸ Le secteur tertiaire est ici défini selon la nomenclature NACE. Sont compris : les commerces, les activités d'hébergement et de restauration, de réparation et d'installation de machines et d'équipements, d'entreposage, les services auxiliaires des transports, les activités de poste et de courrier, de transports et d'entreposage.

¹¹⁹ « Du fait de la part importante des logements collectifs, la région est propice au développement des réseaux de chaleur. Ainsi, 14% des logements franciliens ont recours au chauffage urbain contre seulement 5% à l'échelle nationale. » Source : Tableau de bord de l'énergie en Ile-de-France, ADEME, 2006

¹²⁰ Distribution du courrier, ramassage des poubelles, nettoyage des voiries, etc.

Nous l'avons vu¹²¹, le taux de mitoyenneté, le pourcentage d'immeubles collectifs ainsi que les dimensions du parcellaire (largeur à front de voirie et profondeur des parcelles) influencent les distances des déplacements des services publics qui desservent les bâtiments.

| | | |
|-------------------|---|--|
| | | P2 |
| | Poste | Exploitation des bâtiments |
| Valeur de passage | Sous-Poste | SP2.2 |
| | | Coûts de maintenance et d'opérations des VRD et des services |
| VP XI | Variation de la longueur de VRD construite pour les surfaces neuves entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE K |

Il est proposé d'utiliser la longueur des VRD à construire pour les surfaces neuves comme valeur de passage du calcul des émissions du SP2.2., représentative de l'ensemble des facteurs d'influence précités.

La différence entre les kilomètres de VRD à construire dans le cas d'un scénario avec projet et dans le cas d'un scénario de référence sera calculée préalablement par l'utilisateur à l'horizon 2035 (Cf. § 2.4.5.3) et distribuée par l'outil pour chaque année entre 2005 et 2050 (Cf. point 2.4.5.4). Cette différence, par hypothèse, n'évoluera pas entre 2035 et 2050 et sera égale à la valeur encodée pour 2035.

| |
|---|
| P1 = Poste d'émissions de CO ₂ relatif au développement territorial n°1 |
| SP1.1 = Sous-poste n°1 relatif au Poste d'Emissions n°1 d'émissions de CO ₂ |
| VP I = Valeur de passage n°, valeur de l'input pour l'année de calcul considérée, prise en compte pour le calcul des émissions du poste en question |
| FE A = Facteur d'Emission relatif à l'influence de la Valeur de Passage concernée sur le poste d'émissions de CO ₂ donné n°A |

Un facteur d'émission **FE K** permettra de convertir ces kilomètres en téq CO₂ annuelles. Sa valeur devra être définie durant le travail de définition des facteurs d'émissions prévue en Phase 2.

Poste n°3 : la mobilité des individus influencée par les formes urbaines

La partie 3.2.5.3. du rapport de Phase 1 partie 1 a permis d'insister sur l'influence des formes urbaines sur les comportements de mobilité des individus qui y résident, qui y travaillent ou qui y circulent. Sans rentrer dans les détails précédemment développés, rappelons toutefois qu'en général :

- l'augmentation de la densité de population et d'emploi autour des nœuds de transport en commun est un incitant au report modal vers les transports en commun ;
- l'augmentation de la mixité fonctionnelle, c'est-à-dire le rapprochement de l'habitat de l'emploi et/ou des services (écoles, hôpitaux, commerces), permet de réduire les distances de déplacement en favorisant les déplacements de proximité.

L'onglet « développement territorial » ne calculera pas les variations d'émissions de CO₂ créées par la mobilité des individus puisque celles-ci seront déjà calculées dans la feuille « mobilité en Ile-de-France ». En effet, comme nous l'avons vu au § 2.4.4, le modèle de trafic tient déjà compte, dans ses calculs, de l'influence de la mixité et de la densité sur le choix modal effectué par les individus et sur les distances parcourues.

Toutefois, cette méthodologie de calcul présente deux limites :

- la première c'est que le modèle de trafic calculera des résultats de véhicules.km pour des densités et des mixités qui seront fixées préalablement et qu'il ne sera pas possible de faire varier (sauf si on recommence tout l'exercice de modélisation plusieurs fois) ;
- la seconde c'est que les variations de véhicules.km obtenus pourront s'expliquer par différentes raisons : effet de la mixité et de la densité, certes, mais également effet

¹²¹ Cf. partie 1 de la phase 1

d'amélioration de l'offre en transport en commun, d'augmentation de population, etc. De telle sorte qu'il ne sera pas possible d'en déduire l'influence de la densité et de la mixité prises séparément.

Pour s'affranchir de ces limites, il est proposé ici d'effectuer une analyse de sensibilité optionnelle sur base des deux variables que sont la densité et la mixité. Ce calcul ne sera pas pris en compte dans le bilan final du projet (pour éviter les double-comptes) et servira uniquement à titre informatif.

| | | |
|-------------------|--|---|
| | | P3 |
| Poste | | Mobilité des individus influencée par les formes urbaines |
| Sous-Poste | | |
| Valeur de passage | | |
| VP X | Variation de la densité humaine nette sur la zone d'étude entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE L |
| VP XII | Variation de la mixité fonctionnelle nette sur la zone d'étude entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE M |

Les inputs « bonus » de cette analyse de sensibilité seront la densité humaine nette et la mixité fonctionnelle pour un scénario avec projet et un scénario de référence d'ici à 2035 (Cf point 0 pour la méthodologie de calcul proposée à l'utilisateur). A partir de là, la densité et la mixité seront calculées année par année et constitueront les valeurs de passage VP X et VP XII (Cf. point 2.4.5.4 pour le calcul de ces valeurs annuelles).

Remarque : après 2035, ces variations n'évolueront plus et seront égales à la valeur encodée pour 2035.

| |
|---|
| P1 = Poste d'émissions de CO ₂ relatif au développement territorial n°1 |
| SP1.1 = Sous-poste n°1 relatif au Poste d'Emissions n°1 d'émissions de CO ₂ |
| VP I = Valeur de passage n°, valeur de l'input pour l'année de calcul considérée, prise en compte pour le calcul des émissions du poste en question |
| FE A = Facteur d'Emission relatif à l'influence de la Valeur de Passage concernée sur le poste d'émissions de CO ₂ donné n°A |

Cette densité et cette mixité annuelle avec et sans projet seront multipliées par deux facteurs d'émissions, **FE L** et **FE M**. Ceux-ci seront définis sur base des valeurs de la Figure 78 et de la Figure 79. Ils permettront de convertir la densité et la mixité en téq CO₂. Il s'agira ensuite de multiplier ces valeurs par un nombre de trajets annuels moyen par individu pour ses déplacements domicile-travail. Le bilan des téq CO₂ obtenu sera donné à titre informatif à l'utilisateur et représentera les émissions de CO₂ des déplacements domicile-travail évités et, ce, uniquement grâce à la mise en œuvre des politiques d'aménagement menées en parallèle du réseau de transport public du Grand Paris.

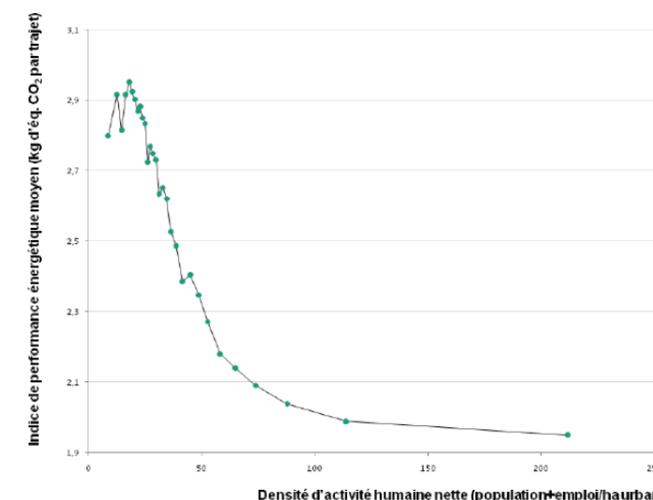


Figure 78 : Evolution des émissions de CO₂ liées aux déplacements domicile-travail par classe de densité (Source : Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des gaz à effets de serre, LEPUR, Université de Liège)

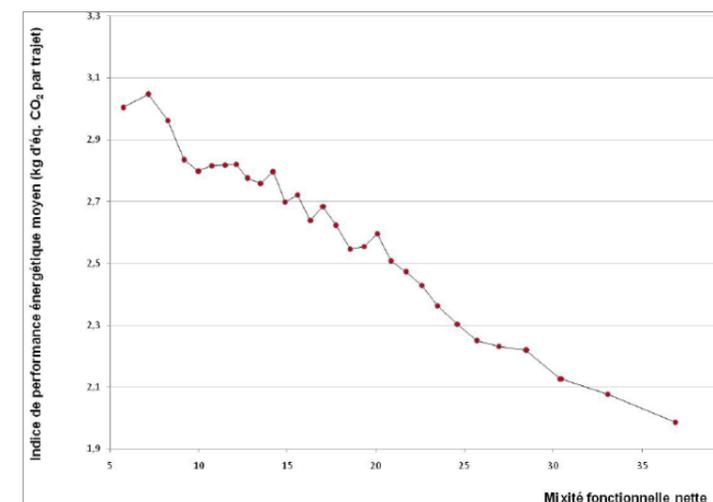


Figure 79 : Evolution des émissions de CO₂ liées aux déplacements domicile-travail par classe de mixité fonctionnelle nette (Source : Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des gaz à effets de serre, LEPUR, Université de Liège)

2.4.5.3 Inputs nécessaires et grandes lignes méthodologiques proposées pour les calculs préalables

Sur les pages suivantes est repris un premier aperçu de la structure de la feuille de calcul et la liste des *inputs* que l'utilisateur devra obligatoirement encoder pour que l'ensemble des émissions de CO₂ des postes du développement territorial retenus puissent être calculées. Ces inputs sont les caractéristiques résultantes d'un scénario d'urbanisation d'ici à 2035 pour une situation avec ou sans projet (Cf point 2.4.5.1) en Ile-de-France à population et emplois identiques. Les cases à encoder par l'utilisateur seront de couleur grisée.

Input n°1 : Structure détaillée du parc bâti dans le scénario de référence

| Surfaces résidentielles | | 2005 | 2035 |
|-------------------------|---------------------|------------|------------|
| Total | m ² SHON | 50 | 50 |
| < 1949 | m ² SHON | 10 | 10 |
| [1949-1974] | m ² SHON | 10 | 10 |
| [1975-1981] | m ² SHON | 10 | 10 |
| [1982-1998] | m ² SHON | 10 | 10 |
| [1999-2005] | m ² SHON | 10 | 10 |
| [2006-2013] | m ² SHON | - | 0 |
| [2013-2020] | m ² SHON | - | 0 |
| [2020-2035] | m ² SHON | - | 0 |
| Surfaces tertiaires | | 2005 | 2035 |
| Total | m ² SHON | 55 000 000 | 55 000 000 |
| Avant 2005 | m ² SHON | 55 000 000 | 55 000 000 |
| [2006-2012] | m ² SHON | - | 0 |
| [2012-2020] | m ² SHON | - | 0 |
| [2020-2035] | m ² SHON | - | 0 |

Input n°2 : Actions sur le parc bâti dans le scénario avec projet par rapport à l'évolution du parc bâti dans le scénario de référence

| Surfaces supplémentaires entre le scénario avec projet et le scénario de référence... | | | | |
|---|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | [2006-2013] | [2013-2020] | [2020-2035] |
| Surface résidentielles | construit (m ² SHON) | 0 | 0 | 0 |
| | rénovées (m ² SHON) | 0 | 0 | 0 |
| | démolies (m ² SHON) | 0 | 0 | 0 |
| | | [2006-2012] | [2012-2020] | [2020-2035] |
| Surfaces tertiaires | construit (m ² SHON) | 0 | 0 | 0 |
| | rénovées (m ² SHON) | 0 | 0 | 0 |
| | démolies (m ² SHON) | 0 | 0 | 0 |

(+) si en situation de projet davantage de m² sont construits/rénovés/démolis (-) si en situation de projet moins de m² sont construits/rénovés/démolis

Input n°3 : Pourcentage d'immeubles collectifs résidentiels entre le scénario avec projet et le scénario de référence

| | [2006-2013] | [2013-2020] | [2020-2035] |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| construit (% m ² SHON) | 0% | 0% | 0% |
| rénovées (% m ² SHON) | 0% | 0% | 0% |

Input n°4 : Longueur supplémentaire de VRD à construire pour les surfaces neuves entre le scénario avec projet et le scénario de référence

| | 2035 |
|----------------------|------|
| Longueur prévue (km) | 0 |

Input n°5 : Différence de surfaces rurales consommées pour l'urbanisation en extension entre le scénario de référence et le scénario avec projet

| | 2035 |
|---------------------|------|
| Forêt tempérée (ha) | 0 |
| Terre cultivée (ha) | 0 |

Tableau 19 : inputs obligatoirement requis pour le calcul des émissions de CO₂ relatives au développement territorial (Source : Stratec, 2011)

Les valeurs de ces inputs seront issues de calculs préalables effectués par l'utilisateur. Ces calculs relèvent d'un exercice de définition d'un scénario d'urbanisation dans une situation avec et sans projet. Concrètement, cet exercice définira la construction à proprement parler des scénarios d'occupation du sol avec ou sans projet et des hypothèses sous-jacentes telles que la densité, la localisation de la construction, etc.

La méthodologie de calcul s'inspire des travaux réalisés lors de l'Évaluation Stratégique Environnementale du métro du Grand Paris (Société du Grand Paris, 2009-2010). Ces travaux ont été affinés par la suite pour les besoins de l'Évaluation socio-économique (Société du Grand Paris, 2010) et seront approfondis dans le cadre de l'étude d'impact environnemental du réseau de transport public du Grand Paris. Pour plus de détails, nous renvoyons donc le lecteur vers les parties de l'étude d'impact environnemental dédiées à ce sujet.

L'ensemble de la démarche de cet exercice s'appuie sur la construction de structures d'urbanisation permettant de définir un niveau d'augmentation potentielle du COS¹²², appelé « ΔCOS », pour un type de surface constructible donné (urbain construit, urbain ouvert, rural) selon sa localisation et la situation étudiée à l'horizon 2035 (avec ou sans projet). Les hypothèses de construction/densification qui en découlent sont ensuite implémentées dans une boîte à outils basée sur l'utilisation d'un Système d'Information Géographique. De manière générale, l'approche méthodologique utilisée est basée sur trois hypothèses fortes :

- l'évolution de la population (P) et de l'emploi (E) à l'horizon 2035, transmise par la maîtrise d'ouvrage ;
- la conversion de ces ΔP+E en ΔSHON ;
- les hypothèses d'application des ΔCOS sur le mode d'occupation du sol actuel.

Les deux premières hypothèses permettent d'estimer les besoins en SHON nécessaires à l'accueil des P+E par scénario. La troisième hypothèse est sous-jacente à l'évaluation de la capacité d'accueil des territoires aux ΔP+E définis par scénario.

Sur base de cette démarche, il est ainsi possible :

- d'estimer l'évolution des capacités SHON d'ici à 2035 par scénario ;
- d'en déduire la capacité d'accueillir les SHON nécessaires aux besoins des nouveaux habitants et des nouveaux emplois à venir selon le scénario ;
- de comparer l'évolution des capacités SHON d'ici à 2035 des deux scénarios après absorption des surfaces nécessaires à l'accueil de la population et de l'emploi nouveaux ;
- de traduire cette différence en termes architecturaux et urbains : typologies de parcellaire, hauteur moyenne des bâtiments construits, variation de la consommation des espaces ruraux, etc.

Pour plus de précisions sur la méthode, nous renvoyons à nouveau le lecteur vers les parties de l'étude d'impact environnemental dédiées à ce sujet.

Le troisième et dernier type d'inputs concerne les « *inputs bonus* ». Ces inputs sont optionnels et l'utilisateur pourra, s'il le souhaite, renseigner les cases suivantes :

Input bonus n°1 : Pourcentage supplémentaire de surfaces entre le scénario avec projet et le scénario de référence qui seront aux normes hautes performances énergétiques (label BEPAS, bâtiment passif)

¹²² « Le coefficient d'occupation du sol qui détermine la densité de construction admise est le rapport exprimant le nombre de mètres carrés de plancher hors œuvre nette ou le nombre de mètres cubes susceptibles d'être construits par mètre carré de sol. » (Source : premier alinéa de l'article R 123-10 du Code de l'urbanisme)

| | | [2006-2013] | [2013-2020] | [2020-2035] |
|------------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| logement individuel | construit (m ² SHON) | 0% | 0% | 0% |
| | logement collectif | 0% | 0% | 0% |
| logement (collectif et individuel) | | 0% | 0% | 0% |
| Surfaces tertiaires | construit (m ² SHON) | 0% | 0% | 0% |
| | rénovées (m ² SHON) | 0% | 0% | 0% |

Input bonus n°2 : Densité humaine nette

| | | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|---|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| Densité humaine nette dans le scénario avec projet | (P+E)/ha urbanisé | 0 | | | | | |
| Densité humaine nette dans le scénario de référence | (P+E)/ha urbanisé | 0 | | | | | |

Input bonus n°3 : Mixité fonctionnelle nette

| | | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|--|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Mixité fonctionnelle dans le scénario avec projet | | | | | | | | | |
| Mixité fonctionnelle dans le scénario de référence | | | | | | | | | |

Input bonus n°4 : Emploi en Ile-de-France

| | | 2005 | 2035 |
|-------------------------|----------------|------|------|
| Emploi en Ile-de-France | nombre d'empl. | 0 | 0 |

Tableau 20 : inputs « bonus » du calcul des émissions de CO₂ relatives au développement territorial (Source : Stratec, 2011)

L'indicateur de densité d'activité humaine nette (population et emploi rapportés aux superficies urbanisées) plutôt que l'indicateur de densité brute (total des surfaces considérées) a été privilégié pour l'input bonus. D'une part, car les résultats de l'étude du LEPUR, schématisés à la Figure 78, donne un facteur d'émissions pour cet indicateur. D'autre part, car les analyses de cette même étude ont fait ressortir le fait que les densités nettes sont de fait toujours mieux adaptées que les densités brutes pour l'interprétation des comportements de mobilité des individus. La prise en compte de l'emploi dans l'indicateur d'activités humaines nettes « permet également des analyses plus fines que les seules densités de logements ou de population, dans la mesure où l'on observe une substitution du logement par de l'activité dans les noyaux bien desservis par les transports en commun »¹²³.

Concrètement, pour calculer cet indicateur pour les deux scénarios 2035, l'utilisateur devra :

1. Calculer l'emprise des surfaces urbanisées dans la zone d'étude à l'heure actuelle (à l'aide d'un SIG et du mode d'occupation du sol) ;
2. Calculer l'emprise des surfaces urbanisées dans la zone d'étude en 2035 en sommant les surfaces actuelles (point 1) aux espaces ruraux consommés pour l'extension nouvelle d'ici à 2035 pour chaque scénario ;
3. Diviser le volume de population et d'emploi défini dans la zone d'étude à l'horizon 2035 (pour le scénario donné) par l'emprise de surfaces urbanisées calculée au point 2.

Au sujet de la mixité fonctionnelle, le LEPUR a développé 2 méthodes de calcul¹²⁴ de cet indicateur : l'une à l'échelle globale, l'autre plus adaptée à l'échelle locale. Dans la présente étude, la seconde méthode sera préconisée pour le calcul de l'input bonus. Elle consiste en un calcul de la mixité comme un ratio de diversité d'occupation du sol à partir d'un maillage du territoire (100mx100m par exemple¹²⁵). En fait, pour chaque maille de la zone étudiée, il s'agit de

calculer un indicateur de « richesse relative »¹²⁶ de la diversité du tissu. Celui-ci correspond aux différents types d'usages du sol que l'on retrouve dans la maille en question. La somme des indicateurs de richesse de chaque maille donne l'indicateur de mixité fonctionnelle de la zone étudiée. Concrètement, pour calculer cet input, l'utilisateur pourra calculer l'indicateur de richesse relative actuel à l'aide d'un SIG. A partir de cette valeur, et en croisant les caractéristiques de l'évolution de l'occupation du sol qu'il aura définies à l'horizon 2035, il pourra calculer la mixité fonctionnelle dans le scénario avec et sans projet.

2.4.5.4 Calcul des inputs pour chaque année de calcul : les « valeurs de passage »

Pour calculer les valeurs annuelles des inputs, il faudra se référer à une courbe d'évolution du parc bâti au fil du temps afin de répartir les surfaces supplémentaires construites, rénovées ou démolies d'ici à 2035 avec projet sur chaque année entre aujourd'hui et 2035.

La difficulté majeure de cet exercice réside dans le fait que cette évolution sera intimement liée aux dates de mise en application des CDT qui, aujourd'hui, sont encore incertaines. Il est toutefois possible de retenir 4 hypothèses fortes pour construire cette courbe d'évolution :

1. par souci de simplification, on peut supposer que les rythmes de construction, de rénovation et de démolition-reconstruction suivront la même courbe d'évolution et, ce, de la même manière pour les surfaces résidentielles et tertiaires ;
2. il est considéré que les CDT rentreront en vigueur en même temps que la mise en service de chaque tronçon du métro qui traverse ces territoires. Il y aura une forte accélération du rythme de construction/rénovation/démolition sur ces territoires dès la mise en service de chaque tronçon.
3. toutefois, un peu avant la mise en service de chaque tronçon, nous considérerons qu'il y aura un effet « d'anticipation » naturel du rythme de construction. On observera certainement une hausse progressive du rythme de construction/rénovation/démolition à partir de 2020. Toutefois, cette hausse peut être considérée comme relativement faible¹²⁷.
4. On suppose que l'accroissement du rythme de construction/rénovation/démolition du parc bâti dû au projet aura des effets jusqu'en 2035.

Ces hypothèses seront affinées lors de la Phase 2 de la présente d'étude. On peut d'ores et déjà souligner le fait que la définition de cette courbe aura un rôle important dans les résultats des variations d'émissions de CO₂ obtenus. En effet, comme vu précédemment, l'accélération du renouvellement du parc a des effets tout au long du cycle de vie des bâtiments :

- en phase construction, elle engendre des émissions de GES plus importantes étant donné que la démolition/reconstruction ou la rénovation nécessitent des techniques et des matériaux plus dépensiers en énergie.
- durant l'exploitation du bâtiment, elle permet une réduction des consommations puisque le bâtiment a une isolation plus performante du fait du caractère évolutif de la réglementation thermique.

Ainsi, plus les surfaces supplémentaires construites avec projet seront créées tôt dans le temps, plus tôt la période de retour sur investissement sera atteinte. Par ailleurs, la variation annuelle du pourcentage d'immeubles collectifs construits suivra cette courbe d'évolution. La variation annuelle des longueurs de VRD construits et des espaces ruraux consommés entre les scénarios avec et sans projet évoluera également proportionnellement à cette courbe.

¹²³ Source : Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des gaz à effets de serre, LEPUR, Université de Liège

¹²⁴ Source : Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des gaz à effets de serre, LEPUR, Université de Liège

¹²⁵ Le maillage sera à définir durant les calculs préalables effectués dans le cadre des études d'impact.

¹²⁶ Forman, R.T.T. (1995). Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions, Cambridge University Press, Cambridge, UK

¹²⁷ Hypothèse basée sur la thèse : Evaluation économique d'une infrastructure de transport en milieu urbain, Le cas du tramway T2 Val de Seine, E. Boucq, 2004.

3. Phase 2 : Identification des valeurs de référence en téq CO₂ pour les différents postes et élaboration de l'outil de calcul des bilans

3.1 Introduction

Dans la phase 2 de cette étude, il s'agira principalement de développer le calculateur qui permettra de procéder à l'analyse précise du bilan des émissions de GES du projet de Réseau de transport public du Grand Paris. Ce calculateur devra pouvoir prendre en compte l'ensemble des enjeux importants d'un tel projet, être applicable à différentes échelles et constituer ainsi un véritable outil d'aide à la décision en matière d'émissions de GES à la disposition de la Maîtrise d'ouvrage et des acteurs du projet.

Objectifs de la phase 2

Afin de développer ce calculateur, il faudra d'abord définir les facteurs d'émissions. En d'autres mots, il s'agira d'évaluer le nombre de tonnes équivalent CO₂ associées à une unité de mesure pour chacune des consommations ou des activités pouvant être influencées par une nouvelle infrastructure de transport et identifiées lors de la phase 1 de cette étude. Cette démarche devra être amplement justifiée et référencée dans un guide des facteurs d'émissions qui constituera la première partie de ce rapport.

Il faudra ensuite intégrer ces facteurs d'émissions dans un tableur permettant de calculer les émissions de GES correspondant aux différents postes. Cette démarche aboutira à l'outil de calcul à proprement parler qui constitue l'objectif final de cette étude et sera annexé sous format numérique au présent rapport.

La deuxième partie de ce rapport consistera en un manuel de l'utilisateur explicitant clairement la démarche à suivre afin de réaliser correctement le bilan des émissions de GES. Dans cette partie, il s'agira de présenter de manière claire et concise, la structure de l'outil, la manière de procéder aux calculs des émissions, les données d'entrée nécessaires ainsi que la manière d'interpréter les résultats.

Le présent rapport fait suite aux rapports de phase 1 (partie 1 et 2). Il constitue également une donnée d'entrée des études d'impact environnemental auxquelles il sera annexé.

Partie 1 : Guide des facteurs d'émissions

3.2 Introduction aux facteurs d'émissions

Pour estimer les émissions de GES correspondant à une consommation ou à une activité, la méthode de calcul aura recours à des facteurs d'émissions (FE). Les facteurs d'émissions sont des coefficients multiplicateurs qui permettent de convertir les données récoltées par l'utilisateur en unité d'émissions de GES, dans notre cas, en tonnes équivalent CO₂. La méthode de calcul suit donc le schéma global suivant :

$$\text{Données de l'activité} \times \text{Facteur d'émissions} = \text{Emissions de GES}$$

Les facteurs d'émissions convertissant les données techniques introduites par l'utilisateur en équivalent carbone, ils déterminent les données d'entrée nécessaires ainsi que les unités dans lesquels ces données devront être exprimées. La sélection des facteurs d'émissions devra donc se faire de façon stratégique afin de rendre l'obtention de données sur les différents postes d'émissions la plus aisée possible. Dans certains cas, il sera nécessaire de définir plusieurs facteurs d'émissions permettant de convertir des données d'entrée de différents types ou exprimées dans des unités différentes.

Le problème de conversion entre les différentes unités dans lesquelles pourraient être exprimées les valeurs d'entrée sera traité au fur et à mesure dans les différentes thématiques. Le tableau ci-dessous reprend cependant quelques facteurs de conversion généraux permettant de traiter différentes unités énergétiques qui pourraient survenir périodiquement à travers la plupart des thématiques abordées dans la suite de ce rapport :

| de / vers | tep | Joule | kWh | m ³ gaz | kcal |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| tep | 1 | 4.1868 10 ¹⁰ | 11630 | 1200 | 1.00024 10 ⁷ |
| Joule | 2.388 10 ⁻¹¹ | 1 | 2.7778 10 ⁻⁷ | 2.86 10 ⁻⁸ | 2.389 10 ⁻⁴ |
| kWh | 9 10 ⁻⁰⁵ | 3.6 10 ⁶ | 1 | 0.1 | 860.05 |
| m ³ gaz | 8.333 10 ⁻⁰⁴ | 3.4965 10 ⁷ | 10 | 1 | 8352.85 |
| kcal | 3.967 10 ⁻⁰⁵ | 4186 | 0.0011627 | 1.197 10 ⁻⁴ | 1 |

Tableau 21 : Facteurs de conversion entre les différentes unités énergétiques couramment utilisées. Sources : croisé de Guide des facteurs d'émissions V6.1, ADEME 2010 et Guidelines to Defra/DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting, Defra & DECC, 2011

L'influence des différents GES sur le réchauffement du système climatique de la planète varie selon les propriétés radiatives de ces gaz et de leur durée de vie dans l'atmosphère. En effet, plus un gaz réfléchit les rayons infrarouges vers la terre et plus il perdure dans l'atmosphère, plus son impact sur le réchauffement du climat est important.

Afin de pouvoir tenir compte de l'ensemble des gaz à effet de serre et de pouvoir exprimer le bilan en une seule valeur globale, il a fallu choisir une unité de référence par convention.

L'influence des différents GES sur le réchauffement du climat a donc été comparée grâce à leur Pouvoir de Réchauffement Global (PRG). Le PRG_(n) est le rapport entre le forçage radiatif sur une durée de n années engendré par kg de gaz et la même grandeur par kg de CO₂. Le PRG du CO₂ est par conséquent toujours égal à 1, quel que soit le nombre (n) d'années considéré. Plus le PRG_(n) d'un autre gaz est élevé, plus l'effet de serre engendré sur n années par le relâchement d'un kg de gaz dans l'atmosphère est important.

En général, les méthodologies sont fondées sur les PRG₍₁₀₀₎ ce qui correspond donc à comparer l'impact d'un kg de gaz par rapport à un kg de CO₂ sur une durée de 100 ans. L'unité de calcul est alors l'équivalent CO₂. C'est l'unité que nous adopterons dans le cadre de la présente étude. Les valeurs de durée de vie, d'efficacité radiative et de PGR₍₁₀₀₎ sont données pour les principaux GES dans le tableau ci-dessous :

| Nom | Formule chimique | Durée de vie (années) | Efficacité radiative (W m ⁻² ppb ⁻¹) | PRG ₍₁₀₀₎ |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------|---|----------------------|
| Dioxyde de carbone | CO ₂ | - | 1.4 x 10 ⁻⁵ | 1 |
| Méthane | CH ₄ | 12 | 3.7 x 10 ⁻⁴ | 25 |
| Oxyde nitreux | N ₂ O | 114 | 3.03 x 10 ⁻³ | 298 |
| CFC-12 | CCl ₂ F ₂ | 100 | 0.32 | 10 900 |

| | | | | |
|---------|--------------------|-----|-----|------|
| HCFC-22 | CHClF ₂ | 12 | 0.2 | 1810 |
| ... | ... | ... | ... | ... |

Tableau 22 : formule chimique, durée de vie moyenne, efficacité radiative et PRG des principaux GES. Source : IPCC 2007, WG1 The physical science basis, 2.10.2 Direct Global Warming Potentials.

Outre l'équivalent CO₂, une autre unité est couramment utilisée : l'équivalent carbone. Il correspond à la masse du carbone seul dans le composé CO₂. La masse atomique du carbone étant égale à 12.0107 et la masse moléculaire du CO₂ étant égale à 44.0099 (=12.0107+15.9994 x 2), le rapport entre les deux est de 12.0107/44.0099 = 0.2729. Une téq CO₂ est donc égale à 0.2729 téq C et à l'inverse, une téq C est égale à 3.6643 téq CO₂.

3.3 Etudes et travaux préalables à la construction

3.3.1 Cas 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 émissions sont alors simplement insérées telles quelles dans le bilan du projet. Lorsque les bureaux ne connaissent que leurs émissions annuelles (la plupart des cas), celles-ci sont simplement distribuées de façon équivalente entre l'ensemble des activités du bureau selon leur chiffre d'affaire. Aucun facteur d'émissions en tant que tel n'est donc utilisé dans le calculateur.

3.3.2 Cas 2 : études et travaux dont les émissions de GES et les activités précises ne sont pas connues :

Les émissions sont alors évaluées sur base du coût financier des études et travaux en utilisant un facteur d'émissions général pour les études et services prestés par les entreprises. Les facteurs d'émissions pour services tertiaires disponibles dans la littérature ne sont cependant pas très nombreux.

Dans le guide des facteurs d'émissions de l'ADEME, l'utilisation d'un facteur d'émission = 110 g éq CO₂ par euro est préconisée. Ce ratio est calculé sur base de la consommation énergétique et du chiffre d'affaire des télécoms et de la poste en France et n'est considéré comme valable que pour les services impliquant une infrastructure¹²⁸. Le tableur de la méthode inclut par ailleurs un facteur d'émissions pour les services faiblement matériel = 36 g éq CO₂ / €.

La méthode Defra propose des facteurs d'émissions plus détaillés :

| Product category | CO ₂ Kg éq. CO ₂ /€ | CH ₄ Kg éq. CO ₂ /€ | N ₂ O Kg éq. CO ₂ /€ | HFCs Kg éq. CO ₂ /€ | PFCs Kg éq. CO ₂ /€ | SF ₆ Kg éq. CO ₂ /€ | Total GHG Kg éq. CO ₂ /€ |
|------------------------------|---|---|--|--------------------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Post & telecommunications | 0.4816 | 0.0430 | 0.0172 | 0.0774 | 0.0103 | 0.0034 | 0.6192 |
| Auxiliary financial services | 0.2064 | 0.0258 | 0.0086 | 0.0086 | 0.0011 | 0.0006 | 0.2494 |
| Research & development | 0.3956 | 0.0602 | 0.0258 | 0.0086 | 0.0017 | 0.0009 | 0.4988 |
| Legal, consultancy, | 0.1462 | 0.0172 | 0.0086 | 0.0086 | 0.0007 | 0.0004 | 0.1806 |

¹²⁸ Guide des facteurs d'émissions V6.1, ADEME, 2010

| | | | | | | | |
|---------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| other business activities | | | | | | | |
|---------------------------|--|--|--|--|--|--|--|

Tableau 23 : Emissions de GES de services tertiaires. Source: 2011 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting, 1€=0.86£

Ces facteurs d'émissions couvrent les champs 1, 2 et 3 du GHG protocol. Ils sont plus élevés que ceux préconisés par l'ADEME.

Une évaluation préliminaire des émissions de GES produites par Stratec donne, par ailleurs, un ratio de 34 grammes de CO₂ par euro de chiffre d'affaire. Ce ratio tient compte de l'énergie consommée, des déplacements domicile-travail et des déplacements spéciaux, des immobilisations et des intrants.

Le facteur d'émissions calculé sur base des activités de Stratec (2010) correspond bien au facteur d'émissions issu du tableur bilan carbone® pour les services faiblement matériels. Il paraît donc relativement adéquat pour les études demandant peu de travail sur le terrain ainsi que pour le travail de gestion et de suivi du projet réalisé par la SGP. Il pourrait, par contre, sous évaluer les émissions liées à des études nécessitant plus de travail de terrain et l'utilisation de machines spécifiques (GPS, théodolite,...). Il est également associé à une incertitude élevée de l'ordre de 50 %. Afin de garder une attitude prudente nous proposons donc de doubler ce facteur d'émissions et de retenir un facteur global = 68 grammes éq. CO₂ par euro.

Les études et travaux préalables à la construction de l'infrastructure étant pour la plupart réalisés sur la période relativement courte précédant la construction (approximativement entre 2010 et 2018), il ne semble pas nécessaire de faire évoluer le facteur d'émissions dans le temps.

3.3.3 Cas 3 : études et travaux dont les activités précises sont connues

Les émissions seront alors calculées plus précisément pour chacun des postes identifiés précédemment :

3.3.3.1 Déplacements domicile-lieu de travail des employés :

Le principal facteur qui influencera la quantité d'émissions de GES liées aux déplacements domicile-lieu de travail est le mode de déplacement de ces employés (à pied, en vélo, en transports en commun ou en véhicule particulier).

Au minimum, l'utilisateur doit préciser le nombre d'employés (en équivalents temps-plein) utilisant les différents modes de transport (voiture particulière, deux roues motorisé, bus, tramway, métro, RER, train ou modes doux). Le nombre de jours de travail annuel moyen est considéré égal à 210 et la longueur moyenne du trajet domicile-travail égale à 15km en voiture particulière ou en train et 8.5km pour les autres transports en commun¹²⁹.

Lorsque les distances parcourues sont connues, l'utilisateur peut également les entrer dans le calculateur.

Dans les deux cas, les facteurs d'émissions par voyageur.km des différents modes de transport sont repris directement du volet mobilité en Ile-de-France (voir § 3.6).

¹²⁹ Valeurs définies d'après les résultats des études INRETS et INSEE repris dans le guide des facteurs d'émissions V6.1, ADEME, 2010.

3.3.3.2 Consommation énergétique des bâtiments (chauffage et électricité) :

Les émissions peuvent être évaluées sur base des surfaces de bureaux utilisées (m²) ou sur base des consommations réelles des différentes énergies (gaz naturel, électricité, mazout, bois ou chauffage urbain).

Tous les facteurs d'émissions ont été directement repris du volet Développement territorial (voir § 3.7).

Pour l'évaluation sur base des surfaces, les émissions ont été évaluées sur base des consommations moyennes des bâtiments dédiés aux études et travaux. Selon l'ADEME, la consommation d'électricité moyenne hors usages thermiques (chauffage et eau chaude sanitaire) pour les bureaux commerciaux s'élève à 121 kWh/m².an. La consommation énergétique nécessaire au chauffage et à l'eau chaude pour les bureaux sur base d'une utilisation de gaz naturel et en tenant compte du coefficient climat de l'IdF est par ailleurs de 202 kWh/m².an.

En tenant compte de l'évolution des émissions de GES liés à l'utilisation d'électricité et de gaz naturel au cours du temps (voir § 3.8), on obtient les facteurs d'émissions suivants :

| Année | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| kg éq CO ₂ /m ² .an | | | | | | | | | | |
| Consommation d'électricité (hors chauffage) | 11.1 | 9.8 | 8.8 | 7.9 | 7.7 | 7.5 | 7.2 | 7.0 | 6.8 | 6.6 |
| Consommation de gaz naturel (chauffage et ECS) | 48.1 | 48.0 | 47.9 | 47.8 | 47.7 | 47.6 | 47.4 | 47.3 | 47.2 | 47.1 |

Tableau 24 : Facteurs d'émissions de consommation énergétique des bâtiments

L'utilisateur pourra également préciser la consommation moyenne des gares pour le chauffage en fonction de la qualité de l'isolation thermique.

Fuite de climatisation : par défaut, le tableur considère que les bureaux sont localisés en France métropolitaine dans une zone de climat relativement tempéré et qu'ils ne bénéficient pas d'un système de climatisation. L'utilisateur peut cependant préciser en cas contraire le pourcentage des surfaces utilisées ayant recours à la climatisation. Les émissions de GES seront alors comptabilisées par unité de surface de bureau selon un facteur général défini sur base d'une puissance des climatiseurs de 50W/m². En évaluant les pertes grâce à l'outil spécifique du Bilan Carbone et en considérant l'utilisation d'un gaz HCFC R22 et une durée de vie moyenne du climatiseur de 10 ans, on obtient une valeur de 4.1 kg éq CO₂ / m².an.

3.3.3.3 Intrants et consommables bureautiques

Ces émissions sont particulièrement variées et difficiles à comptabiliser. Elles correspondent principalement dans le cas des études relatives au projet du Grand Paris, à la petite fourniture de bureau, le papier, les cartouches d'encre, etc. Nous proposons de ne prendre spécifiquement en compte que l'utilisation de papier. Le reste des intrants et consommables bureautiques pourront être pris en compte en fonction des dépenses des entreprises spécifiques à ces postes.

Le facteur d'émissions pour l'utilisation de papier est de 1.32 kg éq CO₂/kg papier dans le Bilan Carbone® et de 0.955 kg éq CO₂/kg papier dans la méthode Defra. Ces facteurs sont donc proches et nous nous sommes basés sur le facteur proposé par le Bilan Carbone de 1.32 kg éq CO₂/kg papier.

Le facteur d'émissions pour la petite fourniture (hors papier) a été repris du Bilan Carbone : 366 g éq CO₂/euro ainsi que le facteur d'émissions pour les consommables bureautiques : 916 g éq CO₂/euro.

3.3.3.4 Amortissement du matériel utilisé

Ces émissions sont aussi variées que le matériel utilisé. Pour ce qui est du matériel informatique, nous nous sommes référés aux facteurs proposés par l'ADEME pour l'utilisation de photocopieurs, d'ordinateurs et d'imprimantes (facteurs d'émissions par unité utilisée) :

| Matériel | Emissions de construction (kg CO ₂ /unité) | Durée de vie (ans) | Emission d'amortissement (kg CO ₂ /unité.an) |
|---------------|---|--------------------|---|
| PC écran plat | 1282.5 | 6 | 213.75 |
| imprimante | 109.9 | 6 | 18.32 |
| photocopieur | 3297.9 | 10 | 329.79 |

Tableau 25 : Facteurs d'émissions de conception et d'amortissement du matériel informatique. Source : Guide des facteurs d'émissions V6.1, ADEME 2010.

Alternativement, lorsque le nombre d'ordinateurs, d'imprimantes et de photocopieurs n'est pas accessible, l'utilisateur peut évaluer les émissions sur bases des dépenses annuelles en matériel informatique. Le facteur d'émissions est alors de 916 g éq CO₂/euro dépensé¹³⁰.

En ce qui concerne les outils spécifiques (théodolites, GPS, etc.), étant donné que la plupart de ce matériel s'apparente, tout comme le matériel informatique, à du matériel électronique, les émissions sont évaluées grâce au même facteur d'émissions par euro dépensé.

3.3.3.5 Voyages et déplacements spéciaux

Etant donné la grande variabilité du nombre de déplacements et des modes de transport favorisés par les différents bureaux, l'utilisateur doit préciser le nombre de voyageur.km parcourus par mode de transport (voiture, bus, train, TGV ou avion).

L'ensemble des facteurs d'émissions concernant les transports de personnes en voiture, en bus et en train ont été repris du volet sur la mobilité en Ile-de-France (voir § 5).

Concernant les trajets en avion, plusieurs facteurs d'émissions sont disponibles dans la littérature. La méthode Bilan Carbone® propose notamment les facteurs d'émissions suivants :

| | | Emissions de la chaîne de prod. du carburant | Emissions de combustion | Emissions hors kyoto (vapeur d'eau,...) | Total |
|----------------|-------------------------|--|-------------------------|---|-------|
| | | Emissions (g éq CO ₂ /voy.km) | | | |
| court courrier | 2 ^{ème} classe | 0.011 | 0.117 | 0.117 | 0.242 |
| | Classe affaires | 0.022 | 0.235 | 0.235 | 0.491 |
| Long-courrier | 2 ^{ème} classe | 0.011 | 0.103 | 0.103 | 0.213 |
| | classe affaires | 0.022 | 0.238 | 0.238 | 0.498 |
| | 1 ^{ère} classe | 0.033 | 0.355 | 0.355 | 0.748 |

¹³⁰ Guide des facteurs d'émissions V6.1, ADEME, 2010.

Tableau 26 : Facteurs d'émissions du transport aérien. Source : Guide des facteurs d'émissions V6.1, ADEME 2010. Remarque : ces facteurs n'intègrent pas les émissions d'amortissement ni de l'entretien des avions

La méthode Defra propose quant à elle les émissions suivantes :

| | | Emissions directes | Emissions indirectes | Total |
|----------------|----------|--|----------------------|--------|
| | | Emissions (g éq CO ₂ /voy.km) | | |
| domestic | | 164.84 | 30.34 | 195.18 |
| court courrier | economy | 92.29 | 16.99 | 109.28 |
| | business | 138.43 | 25.49 | 163.92 |
| long courrier | economy | 81.37 | 14.98 | 96.35 |
| | business | 235.96 | 43.46 | 279.42 |
| | first | 325.46 | 59.94 | 385.4 |

Tableau 27 : Facteurs d'émissions du transport aérien. Source : Guidelines to defra/DECC's GHG Conversion factors, Defra 2010. Remarque : les émissions ne prennent pas en compte les gaz hors Kyoto.

Les facteurs d'émissions totaux proposés par l'ADEME sont plus élevés que ceux proposés par la méthode Defra. Ceci provient principalement de l'intégration des gaz hors Kyoto et notamment de la vapeur d'eau produite par les avions en vol.

Nous nous sommes basés sur les facteurs de la méthode Bilan Carbone. Remarquons que l'exercice de prospective future des émissions des transports aériens est particulièrement périlleux. L'insertion des biocarburants dans les carburants fossiles est notamment à l'essai mais risque d'être retardée par rapport à l'insertion dans les carburants utilisés par les véhicules routiers à cause des précautions que le transport aérien nécessite. Un objectif de réduction de la consommation de carburant par voy.km de 50% à l'horizon 2020 pour le transport aérien a par ailleurs été prévu par le Grenelle de l'environnement 1 mais il est difficile d'évaluer dans quelle mesure cet objectif pourra être atteint et comment l'amélioration des technologies futures permettra de perpétuer la tendance à la baisse après 2020. Etant donné que les enjeux du Grand Paris par rapport au trafic aérien sont relativement limités et concentrés principalement lors de la phase d'études, nous ne ferons pas évoluer les facteurs dans le temps. Il est cependant important de noter que l'utilisation du calculateur pour des infrastructures de transport ayant des enjeux importants dans le trafic aérien (par exemple dans le cas de lignes ferrées à grande vitesse) nécessiterait un développement plus approfondi de cette thématique.

3.3.3.6 Amortissement des bâtiments

L'amortissement des bâtiments et des parkings est calculé à partir des superficies utilisées (m²). Le facteur d'émissions d'amortissement des bureaux a été défini sur base des émissions de construction moyennes d'un bâtiment tertiaire avec une structure mixte béton et acier (= 300 kg éq CO₂/m² SHON)¹³¹ et d'une durée de vie moyenne de 40 ans. Il s'élève donc à 300kg éq CO₂/m² / 40 ans = 7.5 kg éq CO₂/m².an. Le facteur d'émissions d'amortissement des parkings a été évalué grâce au même calcul à partir d'émissions de construction égales à 169 kg éq CO₂/m²¹³². Les émissions d'immobilisation annuelles sont donc de 169 kg éq CO₂/ m² /40 ans = 4.21 kg éq CO₂/ m².an. A nouveau, ces facteurs d'émissions seront considérés comme constants au cours du temps

¹³¹ Facteurs d'émissions bâtiment génériques extraits de Bilan Carbone appliqué au bâtiment, Guide Méthodologique, ADEME, CSTB, 2010
¹³² Guide des facteurs d'émissions, Bilan Carbone V6.1, ADEME, 2010

Leviers d'action

En ce qui concerne les leviers d'action, comme mentionné dans la partie 1 de ce rapport, il n'existe que peu qui permettent de modifier sensiblement les émissions liées aux études préalables à la construction. La plupart des études sont en effet indispensables et imposées par la législation. Le maître d'ouvrage pourra encourager un travail peu émetteur en GES au sein de ses structures et au sein des différents bureaux d'études. Cependant, la courte période durant laquelle seront réalisées les études préalables ne permet pas des investissements importants qui pourraient engendrer une diminution importante des émissions. Pour ces raisons, nous considérons que l'amélioration maximale grâce à des mesures d'encouragement d'un travail peu émetteur en GES permettrait une réduction de 5% des émissions totales. L'utilisateur pourra préciser si de telles mesures seront adaptées, dans quel cas les émissions seront minorées de 5%.

3.4 Construction de l'infrastructure

Le chapitre ci-après détaille les sources et justifications des facteurs d'émissions employés dans le calculateur. Ces facteurs d'émissions s'appuient sur la bibliographie disponible au moment de la rédaction de ce rapport. Des contacts ont été établis avec différents établissements ferroviaires pour bénéficier de leur retour d'expérience et valider les ratios employés¹³³.

3.4.1 Matériaux majoritairement rencontrés

3.4.1.1 Métaux

Comme vu dans le rapport de phase 1, la règle de définition des facteurs d'émissions se base sur les taux de recyclés moyens constatés.

Le taux moyen de recyclé dans l'acier produit est de 47% dans le marché français (source : Eco-Emballages), le taux de recyclé de l'aluminium est de 40% sur le marché européen (source : Association Française de l'Aluminium), celui du cuivre sur ce même marché de 41 % (source : Centre d'information du cuivre, laitons et alliages)

Les facteurs d'émissions ainsi obtenus sont les suivants :

| FE en kgCO ₂ e/kg | Bilan Carbone | EcoInvent 2.0 | Norgate et Al ¹³⁴ | ICE (Univ. Bath) | Valeur retenue |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Acier | 2,2 (47% recyclé) | 1,75 | 2,3 (0% recyclé) | 1,64 (47% recyclé) | 2,2 kgCO₂e/kg |
| Aluminium | 6,10 (40% recyclé) | 8,34 (32% recyclé) | 22,4 (0% recyclé) | 7,55 (40% recyclé) | 6,1 kgCO₂e/kg |
| Cuivre | 2,93 (41% recyclé) | 1,89 (22% recyclé) | 3,3 (0% recyclé) | 2,60 (37% recyclé) | 2,6 kgCO₂e/kg |

Tableau 28 : Facteurs d'émissions recensés pour les métaux

¹³³ Réseau Ferré de France nous a communiqué les travaux réalisés, notamment dans le cadre de l'étude carbone de la Ligne Grande Vitesse Rhin-Rhône. La RATP a également été contactée, mais une fois la personne détentrice des données techniques sur les réalisations/prolongations de lignes identifiée, il n'a pas été possible d'échanger sur ces données pour cause de protection du secret industriel.

¹³⁴ "Assessing the environmental impact of metal production processes", T.E. Norgate*, S. Jahanshahi, W.J. Rankin, 2006

Le facteur d'émissions de l'acier est beaucoup plus dépendant du mixte énergétique des procédés de production et de recyclage que de la proportion de recyclé car l'énergie absorbée pour sa fusion est très significative par rapport à la production du matériau vierge (à la différence de l'aluminium). Pour cette raison, nous retiendrons la valeur la plus précise dans le cas français (Bilan Carbone sur la base du CEREN, Enerdata et Observatoire de l'énergie) de **2,2 kgCO₂e/kg** ; cette valeur est similaire à celle retenue dans le cadre de l'étude RFF LGV Rhin-Rhône.

Les valeurs de l'aluminium dépendent fortement du mélange énergétique (de l'électricité). Le contenu carbone de production électrique du parc européen étant en baisse sur la dernière décennie, nous prendrons la valeur la plus récente datant de 2008, correspondant au Bilan Carbone (Source : International Aluminium Institute, European Aluminium Association) : **6,1 kgCO₂e/kg**.

La valeur renseignée pour le cuivre dans le Bilan Carbone s'appuie sur des statistiques australiennes. La valeur indiquée par l'Université de Bath porte sur la production européenne et a été calculée sur base d'une compilation d'Analyses de Cycle de Vie réalisée par L'Institut Kupfer. Nous retiendrons donc la valeur de **2,6 kgCO₂e/kg** pour le cuivre.

3.4.1.2 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 :

- **0,72** kgCO₂e/kg selon la base d'analyse de cycle de vie EcoInvent 2.0,
- **0,866** kgCO₂e/kg selon Infociment,
- **0,99** kgCO₂e/kg selon la méthode Bilan Carbone®/Base INIES,
- **0,93** kgCO₂e/kg selon la base de l'Université de Bath, en partenariat avec Carbone Trust®.

Les valeurs rencontrées pour les bétons diffèrent nettement plus :

- **209** kgCO₂e/m³ pour un béton avec un ciment de type II ; Base de données INIES.
- **240** kgCO₂e/m³ pour un béton C16/20, **257** pour un béton C20/25, **271** pour un béton C25/30, **288** pour un béton C28/35, **317** pour un béton C32/40 et **362** pour un béton C40/50 ; Données issues de l'université de Bath, en partenariat avec Carbon Trust.
- **322** kgCO₂e/m³ pour un béton à 300 kg/m³ de ciment de type I ; Calcul issu d'une note d'analyse appliquée au bâtiment par l'association des professionnels en conseil carbone(APCC).

Il convient 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).

| Classe de résistance | Type de béton (selon Catalogue des Articles Normalisés) | Exposition | Type Ciment | Dosage minimal en ciment (kg/m ³) |
|----------------------|---|--|-------------|---|
| C25/30 | NPK-A | Sec ou humide en permanence ou rarement sec | CEM II/A-LL | 280 |
| | NPK-B | Humidité modérée, exposition possible au gel | CEM II/A-LL | 280 |
| | NPK-E (type 2) | Alternativement humide et sec | CEM I | 300 |
| C30/37 | NPK-C (Type1) | Alternativement humide et sec, exposition possible au gel | CEM II/A-LL | 300 |
| | NPK-F (type3) | Alternativement humide et sec, exposition possible au gel, exposition possible au sel de déverglaçage | CEM I | 320 |
| | NPK-G (type3) | Alternativement humide et sec, exposition possible au gel, exposition élevée possible au sel de déverglaçage | CEM I | 320 |

Tableau 29 : typologie des bétons les plus fréquents.

Ainsi les ciments employés dans les bétons sont de qualité différente, et les proportions diffèrent. Un rapide calcul avec l'exemple du NPK-E met en évidence la prépondérance de l'impact du ciment dans les émissions du béton :

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

Tableau 30 : Calcul d'un facteur d'émission de béton C25/30 NPK-E

Dans ce cas, le ciment représente 91% des émissions du béton.

Il convient de noter que les ciments de type II sont moins riches en clinker que les ciments de type I :

| Type | Désignation | Notation | Composant principaux (%) | |
|------|-------------------------|----------------------|--------------------------|---------------|
| | | | Clinker | Ajout |
| I | Portland | I | 95-100 | 0 |
| II | Portland au laitier | II / A-S II / B-S | 80-94 65-79 | 6-20 21-35 |
| | Portland au calcaire | II / A-L II / B-L | 80-94 65-79 | 6-20 21-35 |
| III | Ciment de haut fourneau | III / A III / B ... | 5 à 35 | 36 à 95 |

Tableau 31 : typologie des ciments

Les composants ajoutés au clinker (laitier, calcaire, cendres...) sont des sous-produits ou des déchets de l'industrie dont le facteur d'émissions peut être pris pour nul. Le guide ADEME des facteurs d'émissions indique que ces « additifs tels que du gypse, des cendres volantes, du laitier de haut-fourneau, [sont] des sous-produits à contenu en carbone nul ou des produits de carrière à très faible contenu en carbone ».

Sur la base d'un facteur d'émissions du ciment de type I à 0,99 kgCO₂e/kg à 95% de clinker, on obtient pour un ciment de type II à 80% de clinker un facteur d'émission de 0,834 kgCO₂e/kg.

Avec ces valeurs de ciment, nous trouvons un facteur d'émissions variant de 263 à 326 kgCO₂e/m³ pour un béton C25/30 (NPK-A et NPK-E) et un facteur d'émission de 280 à 346 kgCO₂e/m³ pour un béton C30/37 (NPK-C et NPK-G)

Ces facteurs d'émissions sont cohérents avec l'ensemble de ceux cités plus haut et tirés de la littérature, à l'exception de la valeur INIES de 209 kgCO₂e/m³. Ce facteur d'émissions est actuellement discuté car censé correspondre d'une part à un béton C25/30 (avec une teneur minimale en ciment de 280 kg/m³), d'autre part à un béton à 170 kg de ciment par m³ (guide des facteurs d'émissions ADEME). L'association des professionnels en conseil carbone (APCC) a d'ailleurs pointé cette valeur incohérente dans une note adressée à l'ADEME et au CSTB : « Le facteur d'émission indiqué dans le guide « sortie d'usine » correspond donc soit à un béton dosé à moins de 300 kg/m³ soit le calcul comporte une coquille. »

Nous retiendrons les valeurs suivantes pour les ciments et les bétons :

- Ciment portland (Type I) : **0,99 kgCO₂e/kg** en accord avec la base INIES et les valeurs du Bilan Carbone®
- Ciment de type II à X% de Clinker : 0,99 x X% / 95%. Par défaut, 80% de clinker pour un type II, soit **0,834 kgCO₂e/kg**
- **240 kgCO₂e/m³** pour un béton C16/20, **257** pour un béton C20/25, **271** pour un béton C25/30, **288** pour un béton C28/35, **317** pour un béton C32/40, **362** pour un béton C40/50 et **400** pour un béton C50/60 ; en accord avec les données issues de l'université de Bath, en partenariat avec Carbon Trust, et en cohérence avec les valeurs des ciments définies ci-dessus.
- Si la composition des bétons est connue, le calcul du facteur d'émission sera réalisé avec les valeurs rappelées dans le Tableau 32 qui suit.

| Composant | Quantité (kg/m ³) | Facteur d'émission (kgCO ₂ e/kg) |
|----------------|-------------------------------|---|
| Ciment Type I | X | 0,990 |
| Ciment Type II | Y | 0,834 |
| Sable et grave | 2250 -X - Y | 0,015 |
| Eau | 180 | négligeable |
| TOTAL | 2430 | |

Tableau 32 : calcul du facteur d'émission de bétons dont la composition est connue.

- Ainsi, le facteur d'émission d'un mortier de ciment (350 kg/m³ de ciment portland, 1800 kg/m³ de sable) est de **375 kgCO₂e/m³**. (La densité d'un mortier est plus faible que celle d'un béton). De la chaux peut également être employée dans un mortier, le dosage étant effectué en substitution du ciment. Le facteur d'émission de la chaux (1,1 kgCO₂/kg) étant proche de celui du ciment, nous généraliserons le facteur d'émission de 375

kgCO₂e/m³ à l'ensemble des mortiers de ciment, mortiers de chaux et mortiers bâtards (mixte ciment et chaux).

3.4.1.3 Béton armé

Pour le béton armé, nous tenons compte d'un acier à faible technicité dont le facteur d'émission est inférieur à l'acier standard. L'étude LGV Rhin-Rhône propose un facteur d'émission pour l'acier de 1100 kgCO₂e/t (Ce qui correspond à un taux de recyclé de 100%). L'université de Bath propose de majorer le facteur d'émission du béton à hauteur de 77 kgCO₂e/t de béton pour chaque 100 kg de ferrailage par m³ de béton. Cela correspond à un facteur d'émission pour l'acier employé de 1900 kgCO₂e/t. Nous jugeons cette proposition plus réaliste compte tenu que cela revient à un taux de recyclé légèrement supérieur à 60%.

Nous simplifierons cette règle en raisonnant 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, il convient d'**ajouter 203 kgCO₂e/m³** de béton **pour chaque 100 kg** de ferrailage par m³ de béton.

Par exemple, un béton 25/30 MPa avec 110 kg/m³ d'armature en acier (ordre de grandeur courant) aura un facteur d'émission de 271 + 1,1 x 203 = 495 kgCO₂e/m³.

Pour le béton renforcé par des fibres, la base de l'université de Bath nous propose un facteur d'émission de 0,45 kgCO₂e/kg, soit 1,08 tCO₂e/m³ (avec l'emploi d'une densité de 2,4). Ce facteur d'émission très élevé est cependant indiqué peu fiable, avec une forte variation selon les sources. Nous ne disposons pas d'autres sources bibliographiques pour ce béton très particulier. Faute de mieux, nous nous baserons sur ce facteur d'émissions. Sa forte valeur revient à majorer les émissions de ce poste. Ainsi, les enjeux liés à ce type de béton seront visibles si les quantités mises en œuvre sont significatives.

3.4.2 Ouvrages d'art

3.4.2.1 Tunnels et volumes souterrains

Les sections souterraines du réseau de transport public du Grand Paris peuvent être réalisées avec des tunneliers pour les « tubes » accueillant les voies du métro, par tranchée ensuite remblayée (dite tranchée couverte) pour les gares souterraine ou encore en solution alternative au tunnelier pour les voies de circulation du métro.

Ce chapitre permet la prise en compte du creusement des tunnels ou des tranchées couvertes (consommation énergétique des tunneliers et des engins de chantier). Elle inclut également les matériaux nécessaires au soutènement et à la pose des équipements ferroviaires (voussoirs, murs, dalles et radier béton réalisé en fond de tunnel ou de tranchée). Le couche de calage en béton supportant les traverses (ou le ballast, selon la solution retenue) et le reste des équipements ferroviaires sont étudiés dans le sous chapitre consacré aux équipements ferroviaires.

Les schémas ci-dessous présentent les éléments des tunnels et tranchées, ainsi que les dimensions retenues comme données d'entrée de l'outil :

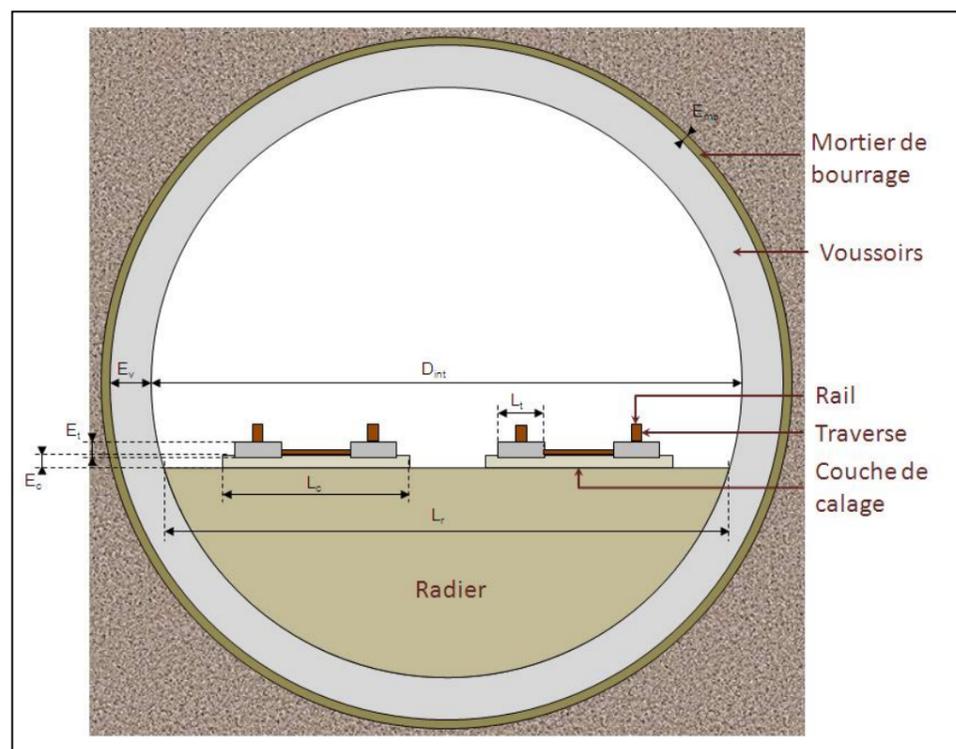


Figure 80 : Tunnel – Schéma d'une vue en coupe et dimensions prises en compte dans l'outil

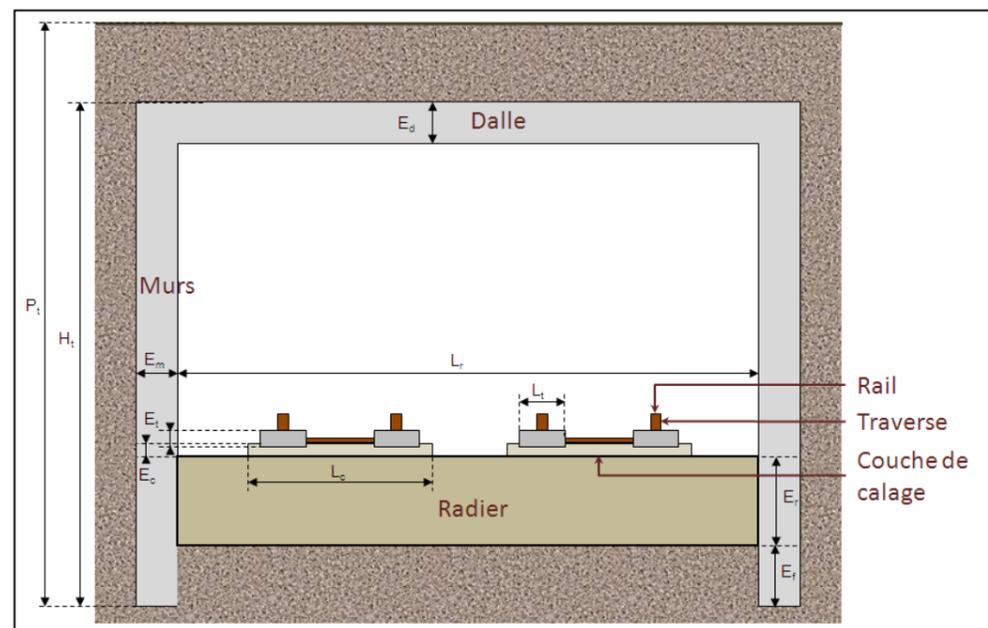


Figure 81 : Tranchée couverte – Schéma d'une vue en coupe et dimensions prises en compte dans l'outil

3.4.2.1.1 Consommation énergétique

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 :

- Tranchées couvertes : **1 litre de fioul par m³** déblayé ou remblayé (chiffre retenu dans le cadre du bilan carbone de la LGV Rhin-Rhône)
- Tunnels : la consommation en électricité du tunnelier (train et centrale de surface) dépend fortement du diamètre du tunnel souhaité ainsi que du terrain rencontré (voir Figure 82). Pour les tunneliers existants que nous avons analysés, la consommation varie de 5 kWh par m³ excavé dans un sol très tendre à plus de 40 kWh par m³ dans le cas d'une roche dure pour un diamètre de coupe de 10 mètres. Nous proposons de retenir comme valeur par défaut **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 réseau de transport public du Grand Paris.

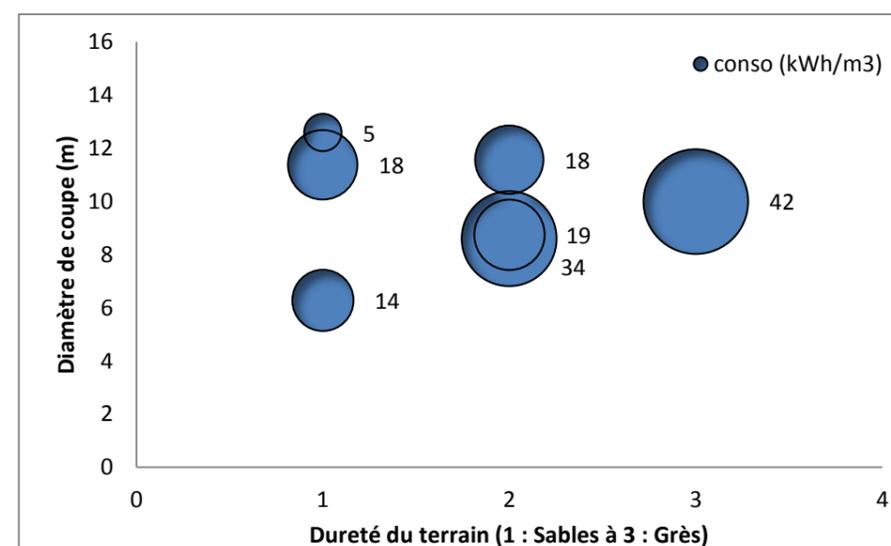


Figure 82 : Comparatif de l'énergie consommée par le tunnelier par m3 de terrain excavé (Source : Burgeap 2011)

Les volumes excavés ou déblayés dépendent principalement de la profondeur des ouvrages et de leurs dimensions extérieures (voir Figure 80 et Figure 81). Après transport (poste Fret), ces matériaux peuvent être à nouveau pelleter pour remblayer ou pour être stocker. Nous considérons que 50 % des matériaux déplacés sont pelletés après transport.

Les données d'entrée et les résultats intermédiaires associés présentés dans l'outil sont donc :

| Tunnel | |
|--|-----------------------|
| Données d'entrée | Valeur par défaut (m) |
| Diamètre intérieur : Dint | 8.2 |
| Épaisseur des voussoirs : Ev | 0.40 |
| Ratio consommation Tunnelier (kWh/m ³) | 20 |
| Ratio consommation Engins (litre fioul/m ³) | 1 |
| Part des volumes déplacés pelletés après transport | 50 % |
| Résultats intermédiaires | |
| Volume excavé par km (m ³) | 63 617 |
| Volume pelleté après transport par km (m ³) | 31 809 |
| Consommation énergétique du tunnelier par km (kWh) | 1 272 345 |
| Consommation énergétique des engins par km (litres fioul) | 31 809 |

Tableau 33 : Consommation énergétique pour le creusement du tunnel - Données d'entrée

| Tranchée couverte | |
|---|-----------------------|
| Données d'entrée | Valeur par défaut (m) |
| Profondeur : Pt | 10 |
| Hauteur : Ht | 7 |
| Largeur du radier : Lr | 7.4 |
| Épaisseur des murs : Em | 0.4 |
| Épaisseur Couche de fond Ef | 1.5 |
| Ratio consommation (litre fioul/m ³) | 1 |
| Part des volumes déplacés pelletés après transport | 50 % |
| Résultats intermédiaires | |
| Volume déblayé par km (m ³) | 117 700 |
| Volume pelleté après transport par km (m ³) | 58 850 |
| Consommation énergétique par km (litres fioul) | 176 550 |

Tableau 34 : Consommation énergétique pour le creusement d'une tranchée - Données d'entrée

Les facteurs d'émissions de l'électricité et des carburants définis dans le rapport de la phase 1 (et repris au § 3.8) permettent à partir de ces résultats intermédiaires d'obtenir les émissions générées par le creusement d'un kilomètre de tranchée et de tunnel.

3.4.2.1.2 Matériaux

Le calcul des émissions liées aux matériaux utilisés pour la construction des tronçons souterrains se fait à partir des dimensions des ouvrages (diamètre, épaisseurs des voussoirs...) qui permettent de définir les volumes nécessaires.

a. Tunnel

❖ Voussoirs

Le volume de voussoirs est déterminé à partir du diamètre intérieur des tunnels (D_{int}) et de l'épaisseur des voussoirs (E_v). Les retours d'expériences dans la littérature font état d'épaisseur de voussoirs de 35 à 50 cm pour des diamètres intérieurs de 7 à 10 m. Nous retiendrons donc comme valeur par défaut une épaisseur de 40 cm, ce qui donne pour 1 kilomètre de tunnel de diamètre intérieur de 8,2 mètres un volume de voussoirs de 10 807 m³. Avec le facteur d'émissions par m³ du matériau (béton armé C32/40 avec 150 kg de ferrailage par m³ par défaut, soit un facteur d'émission $FE_v=0,622$ tCO_{2e}/m³), on obtient les émissions associées à la fabrication des voussoirs nécessaires pour 1 km de tunnel.

❖ Radier

Le même raisonnement est effectué pour le radier, qui remplit le fond du tunnel de façon à obtenir une plateforme de largeur L_r (fixée à 7,4 mètres par défaut dans l'outil, ce qui donne 12 382 m³ de béton par kilomètre). Pour le calcul, nous considérons un béton C25/30 avec 100 kg de ferrailles par m³ : $FE_r=0,474$ tCO_{2e}/m³.

❖ Mortier de bourrage

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, nous considérons une injection de mortier uniforme de 20 cm tout autour des voussoirs, soit un volume par kilomètre de 5 781 m³.

La composition de ce mortier de bourrage est très variable et fonction du sol rencontré. Cependant, nous avons vu précédemment que le facteur d'émissions variait peu en fonction de la composition. Nous retenons donc par défaut un facteur d'émissions égal à : $FE_m=0,375$ tCO_{2e}/m³.

| | Volume (m ³ /km) | Matériau | Facteur d'émission (tCO _{2e} /m ³) |
|------------------|-----------------------------|--|---|
| Voussoir | 10 807 | C32/40 Fers : 150 kg/m ³ | 0,622 |
| Radier | 12 382 | C25/30 Fers : 100 kg/m ³ | 0,474 |
| Mortier bourrage | 5 781 | Mortier | 0,375 |

| | | |
|---------------|---------------|-----------------------|
| Vousoir | 6 717 | tCO ₂ e/km |
| Radier | 5 869 | tCO ₂ e/km |
| Mortier | 2 168 | tCO ₂ e/km |
| Tunnel | 14 754 | tCO ₂ e/km |

Tableau 35 : Calcul du facteur d'émissions associé aux matériaux nécessaires à la construction d'1 km de tunnel

Au final, le facteur d'émissions associé aux matériaux nécessaires à la construction d'un kilomètre de tunnel est de 14 754 tCO₂e.

Ce chiffre est valable pour les valeurs par défaut renseignées plus haut des paramètres principaux du tunnel, à savoir :

- Les facteurs d'émissions des différents matériaux : FE_v, FE_r et FE_m ;
- Le diamètre intérieur du tunnel D_{int} ;
- La largeur de la plateforme/radier L_r ;
- L'épaisseur des voussoirs E_v ;
- L'épaisseur moyenne de mortier de bourrage E_m.

Ces valeurs correspondent au gabarit d'un tunnel pour métro monotube. Si le choix se portait vers un tunnel bitube, il conviendrait le cas échéant de modifier dans l'outil les valeurs du diamètre, de l'épaisseur des voussoirs et de la largeur de la plateforme. Le mode de calcul, indiqué ci-dessous, sera en revanche identique.

Avec V_v, V_r et V_m les volumes de voussoirs, radier et mortier pour un kilomètre, le facteur d'émissions d'un kilomètre de tunnel suit la formule suivante :

$$FE_{tunnel} = FE_v \times V_v + FE_r \times V_r + FE_m \times V_m$$

D'où en décomposant les volumes à partir des dimensions principales vues ci-dessus, on obtient :

$$FE_{tunnel} = 1000 \times \left(\left(FE_v \times \left(\pi \left(\frac{D_{int} + 2 \times E_v}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^2 \right) + \left[FE_r \times \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^2 \times \left(\pi - 2 \cos^{-1} \left(\frac{L_p}{2} + \frac{D_{int} - L_p}{2} \right) \right) \right] / 2 - \left(\cos \left(\left(\pi - 2 \cos^{-1} \left(\frac{L_p}{2} + \frac{D_{int} - L_p}{2} \right) \right) / 2 \right) \times \sin \left(\left(\pi - 2 \cos^{-1} \left(\frac{L_p}{2} + \frac{D_{int} - L_p}{2} \right) \right) / 2 \right) \right] + \left(FE_m \times \left(\pi \left(\frac{D_{int} + 2 \times E_v + 2 \times E_m}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{D_{int} + 2 \times E_v}{2} \right)^2 \right) \right) \right)$$

b. *Tranchée couverte*

❖ Murs et dalle de couverture

Le volume des murs et dalle de couverture dépend de leur épaisseur (E_m et E_d), de la hauteur de la tranchée (H_t) et de la largeur de la plateforme prévue (L_p).

Par défaut, nous avons retenu une épaisseur des murs de 0.4 mètre et de la dalle de couverture de 0.5 mètre. La plateforme fait, par défaut, 7,4 mètres de large pour une hauteur de tranchée H_t de 7 mètres. On obtient alors un volume de 9 300 m³ de béton pour les murs et la dalle de couverture pour un kilomètre de tranchée. Le béton retenu pour le calcul est le même que celui des voussoirs, à savoir du béton C32/40 avec 150 kg de ferrailage par m³ : FE_d=FE_{mur}=FE_v=0,622 tCO₂e/m³.

❖ Radier

Le radier en béton qui remplit le fond de la tranchée couverte a une épaisseur fixée par défaut à 40 cm, soit un volume pour un kilomètre de 2 960 m³ de béton avec FE_r=0,474 tCO₂e/m³.

| | Volume (m ³ /km) | Matériau | Facteur d'émission (tCO ₂ e/m ³) | Source |
|--------|-----------------------------|---------------------------------|---|---|
| Murs | 5 200 | C32/40 150 kg/m ³ | 0,622 | Bilan Carbone, EcoInvent 2.0, ICE Univ Bath |
| Dalle | 4 100 | C32/40 150 kg/m ³ | 0,622 | Bilan Carbone, EcoInvent 2.0, ICE Univ Bath |
| Radier | 2 960 | C25/30 100 kg/m ³ | 0,474 | Bilan Carbone, EcoInvent 2.0, ICE Univ Bath |

| | | |
|--------------------------|--------------|-----------------------|
| Murs | 3 232 | tCO ₂ e/km |
| Dalle | 2 548 | tCO ₂ e/km |
| Radier | 1 403 | tCO ₂ e/km |
| Tranchée couverte | 7 183 | tCO ₂ e/km |

Tableau 36 : Calcul du facteur d'émissions associé aux matériaux nécessaires à la construction d'1 km de tranchée couverte

Le facteur d'émissions associé aux matériaux nécessaires à la construction d'un kilomètre de tranchée couverte est de 7 183 tCO₂e.

Ce chiffre est valable pour les valeurs par défaut renseignées plus haut des paramètres principaux du tunnel, à savoir :

- Les facteurs d'émissions des différents matériaux : FE_{mur}, FE_d et FE_r ;
- La hauteur de la tranchée H_t ;
- La largeur de la plateforme/radier L_r et son épaisseur E_r ;
- L'épaisseur des murs E_{mur} ;
- L'épaisseur de la dalle E_d.

Comme pour les tunnels, ces valeurs correspondent au gabarit d'une tranchée couverte double voie. Si le choix se portait vers deux tranchées à voie unique, il conviendrait le cas échéant de modifier dans l'outil les valeurs par défaut. Le mode de calcul, indiqué ci-dessous, sera en revanche identique.

Avec V_d, V_r et V_{mur} les volumes de dalle, radier et murs pour un kilomètre, le facteur d'émissions d'un kilomètre de tranchée couverte suit la formule suivante :

$$FE_{tranchée} = FEd \times Vd + FEr \times Vr + FEmur \times Vmur$$

D'où en décomposant les volumes à partir des dimensions principales vues ci-dessus, on obtient :

$$FE_{tranchée} = 1000 \times ((FEmur \times 2 \times Emur \times (Ht - Ed)) + (FEd \times Ed \times (Lr + 2 \times Emur)) + (FEr \times Er \times Lr))$$

3.4.2.2 Autres Ouvrages d'Art

L'étude réalisée par Réseau Ferré de France, l'ADEME et la SNCF recense les constituants de plusieurs typologies d'ouvrages d'art. Nous n'avons pas identifié d'autres sources bibliographiques sur l'impact carbone de telles infrastructures.

Cette étude (réalisée dans le cadre de la LGV Rhin-Rhône) intègre la production des matériaux constituant l'ouvrage ainsi que le fret associé à leur approvisionnement. Les facteurs d'émissions qui en émanent sont les suivants :

- Viaduc bi-poutre métallique, pile béton, tablier béton : 23 000 tCO₂e /km (2 voies),
- Viaduc pile acier à remplissage béton, tablier béton : 24 000 tCO₂e /km (2 voies),
- Pont rail (2 voies) : 350 tCO₂e/Unité,
- Pont route : 420 tCO₂e/Unité,
- Saut de moutons : 2 570 tCO₂e/Unité.

3.4.2.3 Plateforme de surface

Le facteur d'émissions associé à la construction de voies ferroviaires en surface comprend le poste « Energie liée au terrassement » et le poste « Matériaux » (chaux utilisée pour le traitement des sols essentiellement).

3.4.2.3.1 Consommation énergétique

Concernant le 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 envisage une cubature de 100 à 500 m³ par mètre linéaire pour une plateforme TGV d'environ 15 mètres de large, soit entre 6,6 et 33 mètres d'épaisseur.

Etant donné qu'un projet de métro nécessite des zones de déblai ou de remblai a priori moins importantes qu'une ligne à grande vitesse, 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**.

3.4.2.3.2 Matériaux

La constitution d'une plateforme de surface nécessite 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 kgCO₂e par m³** de matériau traité à 2%. 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 tCO₂e pour un kilomètre de plateforme terrassée**.

3.4.3 Equipements ferroviaires

3.4.3.1 Voie sur ballast

L'étude réalisée par Réseau Ferré de France, l'ADEME et la SNCF intègre un facteur d'émissions pour la production du ballast (7,3 kgCO₂e/tonne) et la masse nécessaire par kilomètre de voie simple (4 400 tonnes). Nous n'avons pas identifié d'autres sources bibliographiques sur l'impact carbone du ballast.

Nous retenons donc comme facteur d'émissions **32,3 tCO₂e par kilomètre de voie simple**.

3.4.3.2 Voie sur dalle béton

Dans le cas d'une voie sur dalle de béton, une couche de calage est coulée au-dessus du radier pour noyer les traverses. Par défaut dans l'outil, cette couche de calage fait 2,8 mètres de large pour chacune des voies et 20 cm d'épaisseur, et est constitué de béton C25/30 à 100 kg de ferrailage par m³.

| | Volume (m ³ /km) | Matériau | Facteur d'émission (tCO ₂ e/m ³) |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---|
| Couche de calage (1 voie) | 560 | C25/30 100 kg/m ³ | 0,474 |
| Couche de calage (1 voie) | 265 | tCO ₂ e/km | |

Tableau 37 : Calcul du facteur d'émissions associé aux matériaux nécessaires à la fabrication d'un mètre linéaire de couche de calage

3.4.3.3 Traverses

Les traverses des infrastructures de chemin de fer récentes sont le plus souvent des traverses béton, monobloc ou bi-bloc, de dimensions variables en fonction des vitesses des trains souhaitées et des charges qu'elles sont capables de supporter. Sur les voies semble être privilégiée. Ci-dessous deux exemples de traverses adaptées au transit ferroviaires de métros : dédiées aux métros, la traverse bi-bloc :

| 31 | | RHEDA MRT* | ZB 07 |
|---|--------------------|------------|-------|
| Parameters | Unit | | |
| Permissible axle loads | 18 t | | |
| Maximum speed | 160 km/h | | |
| Concrete grade | C 50/60 | | |
| Concrete volume | 45 l | | |
| Weight (without fastenings) | 123 kg | | |
| Length (L) | 2316 mm | | |
| Width (W) | 230 mm | | |
| Sleeper height (H) | 199 mm | | |
| Height of centre of rail base (h ₁) | 135 mm | | |
| Height of sleeper centre (h ₂) | - | | |
| Support surface (total) | - | | |
| Standard application | Main-track sleeper | | |

Figure 83 : Caractéristiques d'une traverse bi-bloc Rheda MRT (Source : Railone)

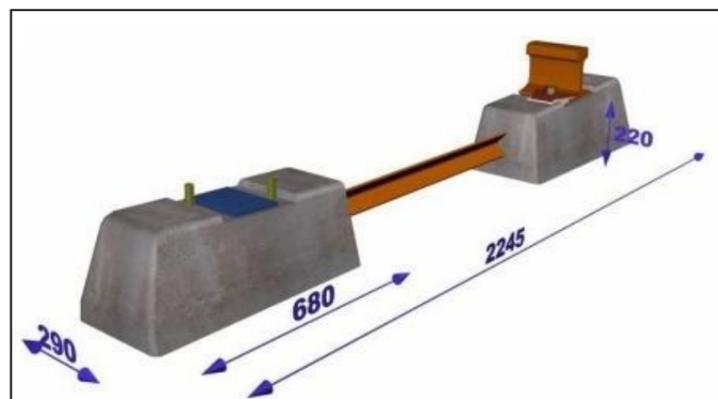


Figure 84 : Schéma d'une traverse bi-bloc B440 (Source : SATEBA)

Pour le calcul du facteur d'émissions associé à une traverse, nous nous sommes basés sur les caractéristiques de la traverse Rheda MRT :

| | Volume (litre/U) | Matériau | Masse volumique (kg/litre) | Masse (kg/U) | Fact. d'émission (kgCO ₂ e/kg) | Fact. d'émission (tCO ₂ e/m ³) | Source |
|---------------------|------------------|--------------|----------------------------|--------------|---|---|------------------------------|
| 2 blochets | 45 | Béton C50/60 | 2,45 | 110,25 | | 0,400 | Railone |
| Armature métallique | | Acier | | 12,75 | 2,2 | | Bilan Carbone, EcoInvent 2.0 |

| | | |
|---------------------|-------------|------------------------|
| Blochets | 18,0 | kgCO ₂ e/U |
| Armature métallique | 28,1 | kgCO ₂ e/U |
| Traverse | 46,1 | kgCO ₂ e/U |
| | 76,7 | kgCO ₂ e/ml |

Tableau 38 : Calcul du facteur d'émissions associé aux matériaux nécessaires à la fabrication d'un mètre linéaire de traverse

A raison de 1 666 traverses par kilomètre de voie ferrée, les matériaux nécessaires à la fabrication des traverses sont responsables de l'émission de 76,7 tCO₂e pour chaque kilomètre de voie ferrée construit.

3.4.3.4 Système de fixation du rail

On compte une grande variété de systèmes de fixation de rail sur traverse.

Les premiers systèmes étaient composés de simples clous, puis de tire-fonds assurant directement la liaison entre la traverse et le rail. L'inconvénient majeur de ces systèmes réside dans leur caractère statique : sous l'effet de la pression générée par un essieu, le rail s'enfonce (légèrement) dans la traverse, ce qui a pour effet de perdre le contact entre le système de fixation et le rail. Selon la vitesse, cela peut générer des claquements et dégrader les systèmes de fixation et traverses. De plus, lorsqu'une rame est en accélération ou décélération, on peut observer un déplacement longitudinal du rail sur la traverse, incompatible avec les techniques de rails de grande longueur.

Aussi, des systèmes de fixation comportant une certaine élasticité ont été conçus pour conserver le contact avec le rail lors du passage d'essieux :

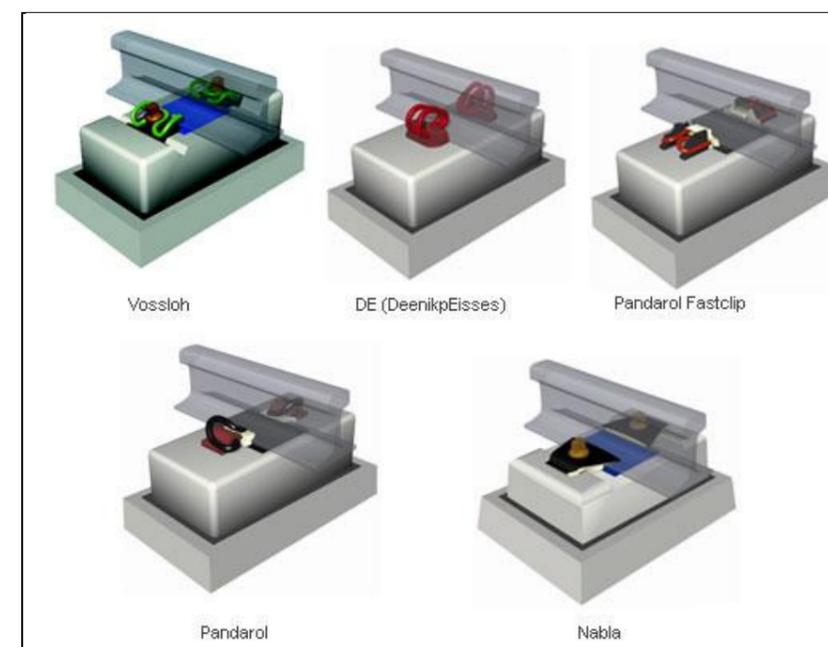


Figure 85 : exemples de systèmes de fixation du rail sur traverse.

Ces systèmes ont plusieurs points communs : une semelle en polyéthylène (haute densité) ou en caoutchouc assure le plus souvent l'assise du rail sur la traverse, deux pièces métalliques flexibles réalisent une prise sur la partie supérieure du talon de part et d'autre du rail et sont fixées au moyen de deux tire-fond ou goujons. Compte tenu de la similarité des matériaux employés et des masses mises en œuvre, nous proposons de ne pas réaliser de distinction de facteur d'émission, mais de réaliser un unique facteur d'émission représentatif de ces systèmes.

- La masse d'un tire-fond (diamètre 24 mm) est de 580 g.
- La masse estimée (sur la base de croquis) d'une plaque Nabla est de 700 g.
- La masse d'un ressort Vossloh est de 440g, 590g ou 760g pour des diamètres respectifs de 16,18 et 20mm en acier allié.
- La semelle (carré de 16 cm, 2cm d'épaisseur) en PEHD ou caoutchouc a une masse de 500g.

Le facteur d'émission ainsi obtenu pour un système de fixation de rail (2 par traverse) est de :

| | Quantité | Masse (kg/U) | Matériau | Facteur d'émission (kgCO ₂ e/kg) | Source |
|--------------------|----------|--------------|---------------|---|------------------------------|
| Tire-fond | 2 | 0,580 | Acier | 2,2 | Bilan Carbone, EcoInvent 2.0 |
| Semelle PEHD | 1 | 0,500 | PEHD | 1,92 | Bilan Carbone, EcoInvent 2.0 |
| Attache Nabla | 2 | 0,700 | Acier embouti | 3,1 | EcoInvent2.0 |
| OU Attache Vossloh | 2 | 0,590 | Acier allié | 4,62 | EcoInvent2.0 |

| | |
|---------|---------------------------|
| Nabla | 7,9 kgCO ₂ e/U |
| Vossloh | 9,0 kgCO ₂ e/U |

Tableau 39 : Calcul du facteur d'émissions associé aux matériaux nécessaires à la fabrication d'un système de fixation

Nous retiendrons la valeur de 8,5 kgCO₂e par système de fixation, soit **17 kgCO₂e** pour les deux systèmes de fixation d'une traverse, ou encore **28,3 kgCO₂e/ml pour une voie** à raison d'une traverse tous les 60 cm.

3.4.3.5 Rail

La masse standard d'un rail est de 60 kg au mètre linéaire. Pour deux rails et un facteur d'émissions de l'acier de 2,2 kgCO₂e par kg d'acier, on obtient un facteur d'émission des rails de **264 tCO₂e/km** pour une seule voie.

3.4.3.6 Caténaire et troisième rail

Dans le cas de trains sur rails, la distribution électrique est assurée par une caténaire située au-dessus de la voie ou par un troisième rail situé entre les deux rails porteurs ou à l'extérieur de ceux-ci.

Lorsque les trains sont sur pneus, les rails restent présents mais ne sont pas utilisés pour le fonctionnement quotidien. Des barres de guidage sont disposées de part et d'autre des pistes de roulement (sauf cas d'un rail de guidage central) :



Figure 86 : Détail d'un rail, piste et roulement et barre de guidage montés sur blochet.

Une barre de guidage est généralement mise à profit pour servir de troisième rail en assurant la distribution électrique, le retour électrique étant généralement assuré par une mise à la terre des rails. Un quatrième rail peut cependant être utilisé pour ce retour.

On rencontrera donc généralement :

- Soit un train sur rail avec caténaire (et pantographe),
- Soit un train sur rail avec troisième rail (et frotteur),
- Soit un train sur pneu avec barres de guidage dont une servant de troisième rail (et frotteur).

3.4.3.7 Pistes de roulement

Les pistes de roulement permettent la circulation de rames sur pneus. Elles sont associées à des barres de guidage pour le positionnement latéral des rames. Les pistes de roulement sont généralement des profilés en acier rapportés sur les traverses ou blochets (cas des traverses bi-bloc). Cette solution permet de faciliter la maintenance et d'assurer un bon taux de disponibilité de l'équipement. Le profil d'une piste de roulement est assimilable à un profilé en H, de largeur 30cm, de hauteur 18cm (soit légèrement supérieur au rail de type Vignol 60kg/ml de 17,2 cm de hauteur) et d'épaisseur 15mm. Son aire est de 112,5 cm², soit une masse linéaire de 90 kg/ml (avec une densité de 8 t/m³).

Ces pistes sont produites en acier courant, nous utiliserons donc le facteur d'émissions générique défini pour l'acier, soit 2 200 kgCO₂e/t. Le facteur d'émission de deux pistes de roulement (pour une voie), hors traverses et pièces de fixation est de **400 kgCO₂e/ml pour une voie**.

3.4.3.8 Troisième rail et barres de guidage

Les barres de guidages sont assimilables à un profilé en U standard de type UPE 200, soit 20 cm de haut, 80 cm de large et 11 mm d'épaisseur. Son aire est de 29 cm², soit une masse linéaire de 23,2 kg/ml (avec une densité de 8 t/m³).

Ces barres sont produites en acier courant, nous utiliserons donc le facteur d'émissions générique défini pour l'acier, soit 2 200 kgCO₂e/t. Le facteur d'émission de deux barres de guidage (pour une voie), hors traverses et pièces de fixation est de **102 kgCO₂e/ml pour une voie** (ou 51 kgCO₂e/ml pour un seul troisième rail destiné à l'alimentation).

Le dispositif de fixation des barres de guidage est beaucoup plus simple que celui des rails ou des pistes de roulement car les forces supportées sont moindres. Les barres sont généralement supportées sur des supports en fonte disposés à une fréquence d'une traverse sur deux. La masse linéaire dépend de la hauteur des supports et de leur mode de fixation. En ordre de grandeur, les supports représentent une masse similaire à celle des barres. De matériau comparable (acier ou fonte), le facteur d'émission que nous retiendrons pour les supports des barres de guidage est de **102 tCO₂e/km pour une seule voie** (ou 51 tCO₂e/km pour les supports du seul troisième rail d'une seule voie).

Soit pour l'ensemble support + troisième rail **204 tCO₂e/km pour 2 barres de guidage d'une seule voie** (ou 102 tCO₂e/km pour un seul troisième rail d'une seule voie).

3.4.3.9 Caténaires

La technologie de la caténaire rigide a retenu notre attention pour son emploi adapté aux voies ferroviaires en tunnel. Les caténaires rigides se trouvent sous la forme d'un assemblage d'un profilé aluminium et d'un fil de contact en cuivre. Les sections retenues par défaut pour ces deux éléments sont :

- Profilé aluminium : 2220 mm²
- Fil de contact cuivre: 107 mm²

Ces sections nous donnent une masse linéaire en aluminium de 6 kg/ml et en cuivre de 0,951 kg/ml, et un facteur d'émission de **39,1 kgCO₂e par mètre linéaire de caténaire**.

| | Section (mm ²) | Matériau | Masse volumique (t/m ³) | Masse (kg/U) | Fact. d'émission (kgCO ₂ e/kg) |
|----------------|----------------------------|-----------|-------------------------------------|--------------|---|
| Profilé | 2 220 | Aluminium | 2,7 | 6 | 6,1 |
| Fil de contact | 107 | Cuivre | 8,9 | 0,951 | 2,6 |

| | | |
|------------------|-------------|------------------------|
| Profilé | 36,6 | kgCO ₂ e/ml |
| Fil de contact | 2,5 | kgCO ₂ e/ml |
| Caténaire rigide | 39,1 | kgCO ₂ e/ml |

Tableau 40 : Calcul du facteur d'émissions associé aux matériaux nécessaires à la fabrication de caténaire

3.4.3.10 Appareils de voie

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. Nous les négligerons donc.

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.

3.4.3.11 Câblage courants forts et courants faibles

Une infrastructure ferroviaire nécessite un câblage important associé aux systèmes de signalisation, de sécurité incendie, au dialogue sol/train, ou encore à l'éclairage des tronçons enterrés. Le type de câbles utilisés étant très variable en fonction des choix techniques retenus, des hypothèses simplificatrices sont nécessaires. Nous considérons donc dans l'établissement du bilan :

- 10 câbles identiques courant le long d'une voie unique (20 pour voie double), quelles que soient leurs caractéristiques (tunnels, viaducs, tranchées...)
- Un câble type de section cuivre 16 mm², entourée d'un isolant en polyéthylène haute densité réticulé de 1,5 mm d'épaisseur puis d'une gaine en PVC de 5 mm d'épaisseur

| | Volume par ml (mm ³) | Masse volumique (kg/m ³) | Masse (kg/ml) | Fact. d'émission (gCO ₂ e/kg) | Sources FE |
|--------|----------------------------------|--------------------------------------|---------------|--|---------------|
| Cuivre | 16 000 | 8 900 | 0,142 | 2600 | Bilan Carbone |
| PEHD | 28 300 | 980 | 0,028 | 1920 | Bilan Carbone |
| PVC | 197 000 | 1 400 | 0,275 | 1890 | Bilan Carbone |

| | | |
|------------------|------------|-----------------------|
| Cuivre | 417 | gCO ₂ e/ml |
| PEHD | 53 | gCO ₂ e/ml |
| PVC | 520 | gCO ₂ e/ml |
| 1 mètre de câble | 991 | gCO ₂ e/ml |

Tableau 41 : Calcul du facteur d'émissions associé aux matériaux nécessaires à la fabrication des câbles

Pour 10 câbles, le poste câblage implique les émissions de **9,91 tCO₂e par km de voies** ferrées.

3.4.3.12 Synthèse voie+équipements

En ajoutant aux résultats des trois types de voies traitées précédemment (tunnel, tranchée couverte et voies) ceux des divers équipements, nous obtenons les facteurs d'émissions globaux pour les matériaux mis en œuvre dans le cadre de la construction des voies.

Les valeurs en italiques correspondent à des voies équipées pour un métro sur pneus :

| Tunnel et équipements (type voie béton et caténaire) | Facteur d'émission Matériaux (tCO ₂ e par kilomètre de voie double) |
|--|--|
| Tunnel | 14 754 |
| Couche de calage | 531 |
| Traverses | 153 |
| Fixations des rails | 57 |
| Rails | 528 |
| <i>(Fixations des pistes de roulement)</i> | <i>57</i> |
| <i>(Pistes de roulement et barres de guidage)</i> | <i>1208</i> |
| Caténaire | 78 |
| Câbles | 20 |
| Tunnel équipé | 16 121 (17 386) |

Tableau 42 : Facteur d'émission du poste Matériaux pour un tunnel équipé

| Tranchée couverte et équipements (type voie béton et caténaire) | Facteur d'émission Matériaux (tCO ₂ e par kilomètre de voie double) |
|--|---|
| Tranchée couverte | 7 183 |
| Couche de calage | 531 |
| Traverses | 153 |
| Fixations | 57 |
| Rails | 528 |
| (Fixations des pistes de roulement) | 57 |
| (Pistes de roulement et barres de guidage) | 1208 |
| Caténaire | 78 |
| Câbles | 20 |
| Tranchée couverte équipée | 8 550 (9 815) |

Tableau 43 : Facteur d'émission du poste Matériaux pour une tranchée couverte équipée

| Voie de surface et équipements (type Ballast et caténaire) | Facteur d'émission Matériaux (tCO ₂ e par kilomètre de voie double) |
|---|---|
| Plateforme de surface | 475 |
| Ballast | 65 |
| Traverses | 153 |
| Fixations | 57 |
| Rails | 528 |
| (Fixations des pistes de roulement) | 57 |
| (Pistes de roulement et barres de guidage) | 1208 |
| Caténaire | 78 |
| Câbles | 20 |
| Voie de surface équipée | 1 376 (2 641) |

Tableau 44 : Facteur d'émission du poste Matériaux pour une voie de surface équipée

Ces résultats correspondent au poste Matériaux des voies équipées. Le fret nécessaire pour acheminer les matériaux sur le site, ou déplacer les déblais/remblais, et les consommations énergétiques des engins n'y sont pas pris en compte. Ils sont à intégrer de manière supplémentaire à l'aide des facteurs d'émission définis ci-après.

Pour comparaison, le facteur d'émissions d'un tunnel monotube a été estimé dans le cadre du bilan carbone de la LGV Rhin-Rhône à 20 200 tCO₂e par kilomètre, fret compris, et pour un diamètre de tunnel qui doit être sensiblement plus large. En reprenant notre calcul avec un diamètre intérieur supérieur (12 mètres), une plateforme plus large (8,5 mètres) et des

voussoirs un peu plus épais (0,45 mètre), nous obtenons un facteur d'émissions pour un kilomètre de tunnel double voie équipé de 20 300 tCO₂e hors fret (poste qui devrait faire croître les émissions d'environ 10 %). Les deux méthodes de calcul donnent donc des résultats du même ordre de grandeur.

3.4.4 Gares et bâtiments

Un guide est proposé par l'ADEME et le CSTB sur le contenu carbone des bâtiments. Ce guide emploie les facteurs d'émissions définis par le Bilan Carbone, y compris le facteur d'émission du béton à 209 kgCO₂e/m³ incohérent avec le dosage de ciment indiqué de 300 kg/m³.

Une compilation d'études sur des bâtiments à structure béton nous renseigne sur les émissions associées :

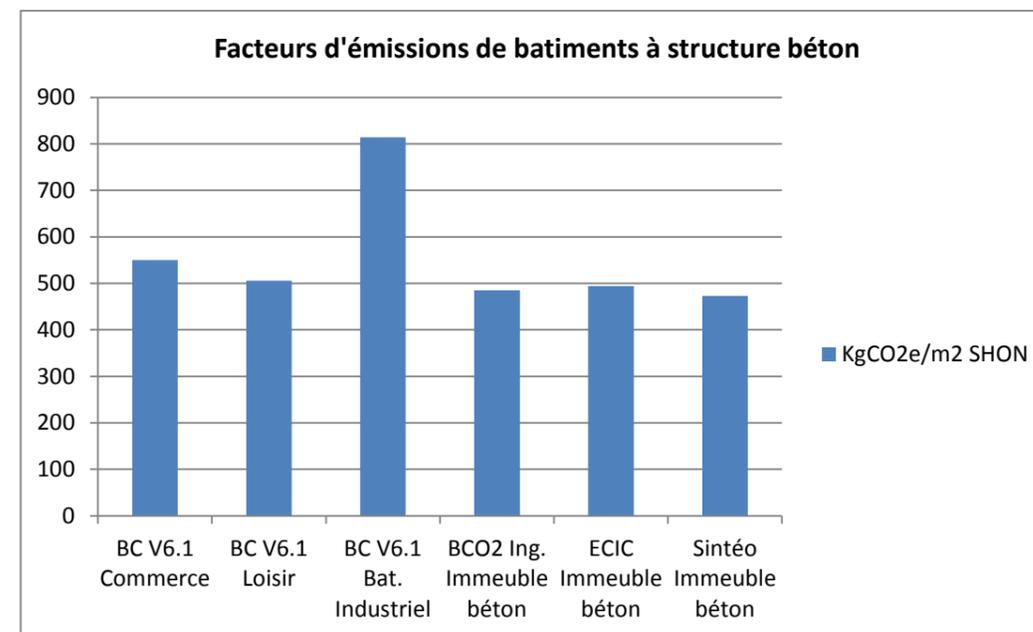


Figure 87 : facteurs d'émissions de bâtiments à structure béton

Le facteur d'émission surfacique élevé du bâtiment industriel s'explique par une grande hauteur sous plafond. Le facteur d'émission surfacique pour ce type de structure varie directement selon la hauteur sous plafond. On lui préférera un facteur d'émission volumique.

Pour les bâtiments à structure béton d'une hauteur sous plafond standard (inférieure à 3,5 m), nous retiendrons la valeur consensuelle qui se dégage du graphique précédent : **500 kgCO₂/m²** de surface hors œuvre nette (SHON).

Pour les bâtiments comportant des hauteurs sous plafond supérieures à 3,5 m, nous nous baserons sur un ratio volumique de 500/3 = **167 kgCO₂e/m³**.

Pour les bâtiments à structure métallique, et suivant le Bilan Carbone (V6.1), la même approche nous amène à considérer un facteur d'émission de **180 kgCO₂/m²SHON** pour les hauteurs sous plafond inférieures à 3,5m et **60 kgCO₂e/m³** au-delà :

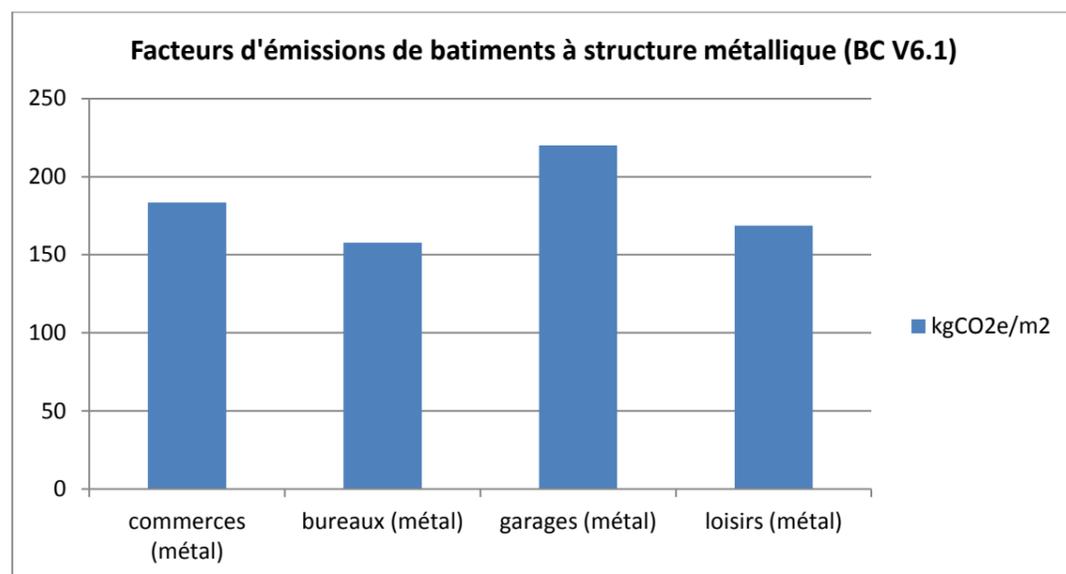


Figure 88 : facteurs d'émissions de bâtiments à structure métallique

Les bâtiments souterrains réalisés en tranchée couverte intégreront de manière supplémentaire l'énergie consommée pour le déblai et remblai des matériaux (définie dans le chapitre portant sur cette thématique).

3.4.5 Quais

Les quais réalisés dans le cadre de gares souterraines sont à considérés dans les surfaces pris en compte dans la SHON. 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.

Lorsque 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 tCO₂e** pour les matériaux de réhausse, leur traitement et mise en œuvre, le revêtement de quai et les bordures

3.4.6 Fabrication des rames

Les émissions de gaz à effet de serre du poste Fabrication des rames dépendront principalement de la masse des rames choisies et des matériaux les constituant. L'étude sur les systèmes de transport réalisée dans le cadre du débat public sur le métro de rocade Arc Express (<http://www.debatpublic-arcexpress.org/docs/etudes/Etude-systemes-transport-setec-xelis/23815-SET-T-009-A.pdf>) nous renseigne sur les caractéristiques des métros des différents producteurs (dans le cas de cette étude : Ansaldo Breda, Bombardier, Siemens et Alstom).

Nous pouvons en retirer que :

- L'ensemble des rames proposées utilisent un alliage d'aluminium comme constituant principal ;
- La masse d'une rame est proportionnelle à sa longueur (voir Figure 89)

| Constructeur | Longueur (m) | Masse (t) |
|---------------|--------------|-----------|
| Ansaldo Breda | 39 | 55 |
| | 39 | 58 |
| | 50 | 77 |
| Bombardier | 108 | 188 |
| | 35 | 48 |
| Siemens | 11 | 16 |
| | 38 | 59 |
| | 54 | 94 |
| | 97 | 140 |
| 111 | 168 | |
| Alstom | 20 | 32 |

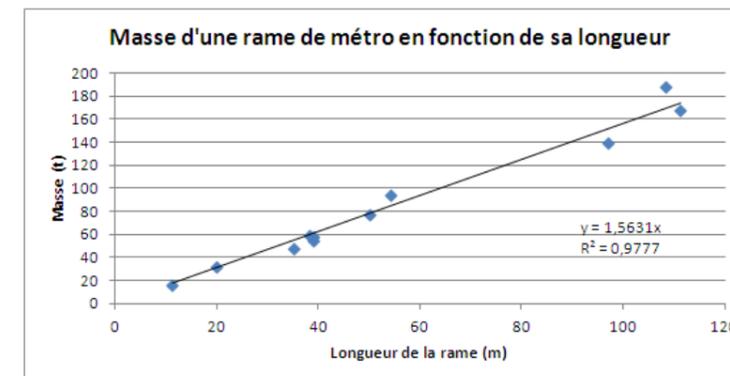


Figure 89 : Masse des rames de métro en fonction de leur longueur (Source : Etude sur les systèmes de transports –Débat public Arc Express)

Le réseau de transport public du Grand Paris devrait bénéficier de rames de grande longueur, de l'ordre de 120 mètres. Le prolongement de la droite de la Figure 89 à 120 mètres donne une masse de **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 tCO₂e/t, nous obtenons un total de **1 140 tCO₂e par rame**.

Etant donné le facteur d'émission élevé de ce métal, cette hypothèse est plutôt pénalisante et évitera de minimiser le rôle du poste Fabrications des rames dans le bilan total des émissions.

3.4.7 Transport des matériaux

3.4.7.1 Facteurs d'émissions

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...).

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 : 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 gCO₂e/t.km
- Train français (moyenne thermique et électrique) : 17,5 gCO₂e/t.km
- Train européen (moyenne thermique et électrique) : 22,6 gCO₂e/t.km
- Transport fluvial (barges et péniches de capacité 1000t) : 40 gCO₂e/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 gCO₂e/t.km
- Semi-remorque sur trajets locaux (aller à 80% de la charge utile (20t), retour à vide) : 118 gCO₂e/t.km

La distance à prendre en compte est la distance parcourue et non la distance à vol d'oiseau. Ainsi Le Havre et Paris sont distants de 355 km par la Seine, ou de 200 km par la route.

3.4.7.2 Distances par défaut

Lorsque les distances de provenance des matériaux sont connues, il convient de les prendre en compte. A défaut, nous proposons les schémas suivants :

3.4.7.2.1 Déplacements des volumes terrassés

Les matériaux excavés ou déblayés pour la construction des tunnels et tranchées peuvent être déplacés de site en site ou évacués vers des centres de stockage ou des centres d'enfouissement techniques. En l'absence de données, il sera considéré par défaut un déplacement de ces matériaux de 50 kilomètres en semi-remorque (facteur d'émission de 118 gCO₂e/t.km). La distance ainsi que le mode de transport resteront paramétrables dans l'outil.

3.4.7.2.2 Provenance régionale (Ciment, béton, mortier et matériaux de carrière)

Cette catégorie de matériaux a la particularité d'avoir une densité importante, et de pouvoir être sourcés localement. En raison de leur faible valeur marchande (par comparaison avec des métaux par exemple), les schémas d'approvisionnements correspondent souvent à un approvisionnement régional. Ainsi, les facteurs d'émissions proposés par l'université de Bath dans sa base de facteurs d'émissions se basent pour le béton sur la logistique suivante :

- Trajet routier de 38km pour les agrégats,
- Trajet routier de 100 km pour le ciment (produit à proximité des carrières de calcaire et d'argile),
- Trajet supplémentaire de 155 km pour le béton produit hors site ou pour les éléments préfabriqués (voussoirs...)

Nous nous baserons sur ces valeurs par défaut, lorsque la provenance du ciment et du béton est inconnue. Nous chercherons cependant à préciser la provenance de ces matériaux, la tendance observée sur le marché étant de regrouper les sites de production.

Le fret généré pour la production d'un mètre cube de béton (frais ou préfabriqué) ou de mortier (300 kg de ciment, 1800 kg d'agrégats, eau) est dans ce cas de :

$$(0,3 \times 100 + 1,8 \times 38 + 2,4 \times 155) \times 0,118 = \mathbf{55,5 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3}$$
 de béton ou mortier

La distance considérée pour un approvisionnement direct en ciment ou agrégats est de 155 km. Ce qui revient pour un mètre cube de béton produit sur chantier à un facteur d'émission du fret généré de :

$$(0,3 \times 155 + 1,8 \times 155) \times 0,118 = \mathbf{38,4 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3}$$
 de béton ou mortier

Pour les autres approvisionnements régionaux, un facteur d'émissions de $155 \times 0,118 = \mathbf{18 \text{ kgCO}_2\text{e/t}}$ sera à ajouter pour tenir compte du fret routier.

3.4.7.2.3 Provenance nationale

Les matériaux et matériels de provenance nationale, mais dont le schéma logistique n'est pas connu se verront attribuer une distance de **500 km**. Cette distance forfaitaire correspond à un trajet Lyon Paris, ou encore à la moyenne des trajets Marseille-Paris et Lille-Paris.

En l'absence de connaissance du schéma logistique, les facteurs d'émissions supplémentaires ci-après sont ajoutés :

- Train français (moyenne thermique et électrique) : **9 gCO₂e/t**,
- Transport fluvial (barges et péniches de capacité 1000t) : **20 gCO₂e/t**,
- Semi-remorque : **40,5 kgCO₂e/t**.

3.4.7.2.4 Provenance européenne

Les distances entre Paris et d'autres capitales européennes sont les suivantes :

- Paris-Rome : 1420 km
- Paris-Madrid : 1272 km
- Paris-Bruxelles : 306 km
- Paris-Amsterdam : 506 km
- Paris-Berlin : 1050 km
- Paris-Vienne (Autriche) : 1236 km

Les matériaux et matériels de provenance nationale, mais dont le schéma logistique n'est pas connu, se verront attribuer une distance de **1200 km**.

En l'absence de connaissance du schéma logistique, les facteurs d'émissions supplémentaires ci-après sont ajoutés :

- Train européen (moyenne thermique et électrique) : **27 gCO₂e/t**,
- Semi-remorque : **97,2 kgCO₂e/t**.

3.4.8 Organisation du chantier

3.4.8.1 Déplacements des personnes

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 ;
- Du taux d'occupation 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 :

| | Paramètres | | Valeur par défaut |
|--------------------------------|----------------------------|--|-------------------|
| | Déplacements des personnes | Domicile Travail | Part de la VP |
| 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 VP 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 |

Tableau 45 : Hypothèses concernant les déplacements de personnes

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 nous prenons pour la part des travailleurs en grands déplacements 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, nous considérons que la moitié uniquement des grands déplacés 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.

Nous prenons également 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. Nous considérons par ailleurs que tous les travailleurs (y compris les grands déplacés) font 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® :

- Voiture particulière (moyenne France) : 256 gCO₂e/véh.km
- Train (moyenne France) : 25 gCO₂e/pass.km
- Métro/RER : 5,7 gCO₂e/pass.km

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 kgCO₂e par personne et par jour travaillé de chantier**.

3.4.8.2 Base vie

Le poste Base-vie cherche à estimer les émissions associées à la consommation énergétique dans les bases-vie nécessaires au chantier.

Selon la réglementation, pour un chantier comme celui du réseau de transport public du Grand Paris, les employés doivent bénéficier d'un local avec armoires d'une surface supérieure à 1,25 m²/personne et d'un local repas d'une surface supérieure à 1,5 m²/personne. En prenant en compte les sanitaires et les postes secours, on peut considérer une surface en abri de chantier de 3 m² 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 ;
- 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**.

3.4.9 Changement d'usage des sols

Lorsque l'implantation du métro entraîne 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. Les végétaux jouent en effet un rôle d'alimentation du sol en carbone par la matière organique qu'ils y apportent : cela se manifeste visiblement dans les premières couches par l'humus en milieu forestier. Des micro-organismes dégradent cette matière organique (digestion-respiration). Par ailleurs, un changement d'utilisation de surfaces importantes induit la suppression de l'utilisation potentielle de ces surfaces pour la production de biocarburants ou de matières combustibles (bûches, plaquettes,...).

Le métro étant creusé sur la majeure partie de sa longueur à l'aide d'un tunnelier, sa construction ne devrait induire un changement d'usage des sols que sur des surfaces relativement limitées. L'impact induit par le métro sur le développement territorial pourrait, par contre, impliquer des impacts sur l'occupation du sol très importants (voir phase 1 de cette étude pour plus de détails). Cette thématique sera donc développée plus en détails dans la partie Développement territorial (voir § 3.7).

De manière spécifique à la construction de l'infrastructure, à des fins simplificatrices, nous considérerons que le changement d'usage des sols induit les émissions/absorptions regroupées sur l'année du chantier (dans les faits, le contenu en carbone des sols continue de varier par la suite jusqu'à une stabilisation de sa teneur moyenne annuelle).

Le facteur d'émission de déstockage retenu (voir § 3.7.4) est de 383,7 t éq CO₂ / 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 8m 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 $383.7 \times 1000 \times 8 / 10000 = 307 \text{ t CO}_2\text{e/km}$ pour deux voies en surface (**154 t CO₂e/km** pour une voie).

3.5 Fonctionnement du métro

L'outil de calcul prend en compte de manière successive les différentes composantes en jeu identifiées dans la phase 1 de ce rapport. Pour chaque composante, plusieurs niveaux de détails seront possibles afin de pouvoir utiliser l'outil lors de l'étude d'impact à un moment où peu d'informations précises ne seront disponibles et pour pouvoir affiner par la suite le calcul au fur et à mesure de l'avancement du projet.

3.5.1 L'énergie de traction nécessaire au mouvement des métros

L'énergie nécessaire pour la traction peut être évaluée de deux façons différentes en fonction des informations disponibles.

Dans le premier cas, l'utilisateur doit préciser la consommation électrique attendue. C'est la solution que nous préconisons et qui permet la plus grande précision en particulier pour ce qui concerne les technologies utilisées.

Le facteur d'émission concerne donc l'utilisation d'électricité qui a déjà été étudié dans la phase 1 de cette étude. Pour rappel, le facteur d'émission et son évolution au cours du temps est repris dans la figure ci-dessous. Ce facteur d'émission sera par ailleurs majoré de 8% afin de tenir compte des pertes en lignes de l'électricité¹³⁵ (voir § 3.8 pour plus de détails).

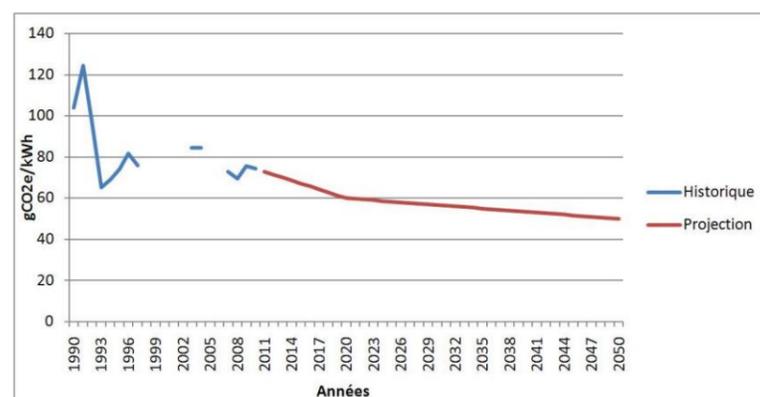


Figure 90 : facteur d'émissions moyen français de l'électricité (source : ADEME, RTE).

¹³⁵ Guide des facteurs d'émissions V6.1, ADEME, 2010.

La consommation énergétique des métros est un poste stratégique dans le bilan des émissions de GES et peut varier de manière importante en fonction des spécificités technologiques du métro. L'évaluation de la consommation attendue nécessite cependant une connaissance approfondie de nombreux paramètres qui ne seront probablement pas entièrement définis au stade de l'étude d'impact. L'outil contient donc un deuxième niveau de précision pour lequel la consommation énergétique et les émissions qui en découlent sont évaluées sur base des voy.km parcourus. L'utilisateur pourra 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.).

Les estimations de consommation électrique pour la traction des rames de métro de plusieurs villes européennes sont reprises ci-dessous :

| | Métro RATP* | Métro Londres** | Métro Bruxelles*** |
|---|-------------|-----------------|--------------------|
| Voy.km (millions) | 6014.9 | 7569 | 526.7 |
| Energie de traction (10 ⁶ kWh) | 516.3 | 1056 | 77.6 |
| Energie consommée / voy.km (Wh) | 85.8 | 140 | 147.2 |

Tableau 46 : consommation énergétique moyenne pour la traction du métro. Sources : * RATP et ADEME dans note rapide sur les transports, IAURIF 2005, données pour 2003 ; ** London underground environment report 2006 ; *** Comparaison des émissions de CO₂ par mode de transport en RBC, CO₂ logic et STIB.

Des différences manifestes existent entre les différentes valeurs. Faute d'avoir une analyse détaillée des consommations énergétiques de ces différents réseaux de métro, nous nous baserons sur les estimations de la RATP (85.8 Wh/voy.km). Notons que les valeurs correspondent à des valeurs moyennes pour l'ensemble des réseaux et intègrent donc des technologies plus dépensières en énergie que celles disponibles actuellement (voir Figure 71). Le facteur d'émissions sera donc conservateur par rapport aux technologies qui seront mises en œuvre pour le réseau de transport public du Grand Paris.

D'après les données de l'étude du Predit sur la consommation des métros, bien que pour les métros plus anciens (59-72) il y ait une différence notable de consommation entre un système de roulement sur pneu et sur fer, cette différence se minimise pour les métros plus récents (77-89) (voir Figure 71). La question est cependant sujette à controverse, une consommation supérieure de plusieurs dizaines de pourcents en cas de système de roulement sur pneu étant parfois avancée¹³⁶. Dans l'outil nous proposons donc de minorer le facteur d'émission de base de 15% en cas d'utilisation d'un système de roulement sur fer.

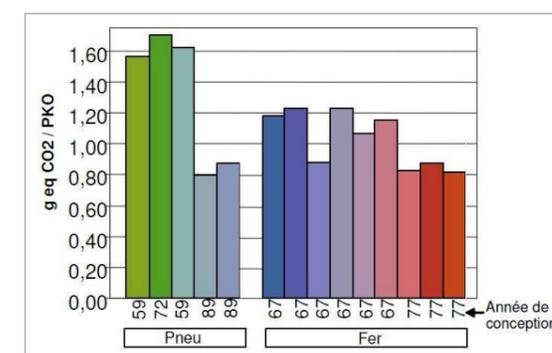


Figure 91 : Emissions de GES relatives à l'énergie de traction des métros Parisiens exprimées en g éq CO₂ par place offerte . km

¹³⁶ Paris – Le futur métro, avec ou sans pneus ?, France Soir, 2010, www.francesoir.fr/pratique/transport/paris-futur-metro-avec-ou-sans-pneus-58370.html

L'utilisation de technologies avancées permettrait quant à elle de réduire la consommation énergétique d'approximativement 30%¹³⁷. Nous proposons de prendre en compte une réduction de 25% des émissions lorsque l'utilisateur précise que des technologies avancées seront utilisées.

Notons que l'énergie de traction est calculée sur base de la consommation des métros et inclut implicitement l'énergie consommée pour les différentes fonctions à bord (freinage, chaleur ou froid, etc.).

3.5.2 Consommation en énergie des gares et des bâtiments techniques

Les émissions de GES liées à la consommation énergétique des gares, des bâtiments d'accueil du public et des bâtiments techniques (maintenance) peuvent être évaluées sur base des consommations estimées des différentes énergies (électricité, gaz, fioul) ou, lorsque celles-ci ne sont pas connues, sur base des surfaces dédiées à ces espaces.

Dans le cas d'une évaluation basée sur les estimations des consommations énergétiques, les facteurs d'émissions appliqués sont identiques à ceux définis dans la partie Développement territorial (§ 3.7).

Pour l'évaluation à partir des surfaces, les émissions sont évaluées sur base des consommations moyennes des bâtiments dédiés aux différentes activités. Selon l'ADEME, la consommation d'électricité moyenne hors usages thermiques (chauffage et eau chaude sanitaire) pour les bâtiments commerciaux s'élève à 126 kWh/m².an. La consommation énergétique nécessaire au chauffage et à l'eau chaude pour les commerces sur base d'une utilisation de gaz naturel et en tenant compte du coefficient climat de l'IdF est par ailleurs de 167kWh/m².an.

Ces consommations correspondent relativement bien aux consommations détaillées des gares de métro Coréennes :

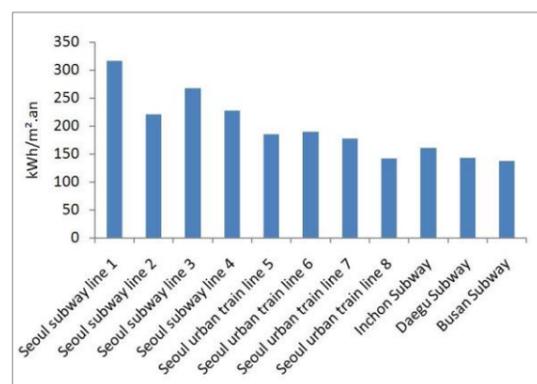


Figure 92 : consommations moyennes des gares de métro Coréennes (1999-2000). Source : Hong, W. & Kim, S., A study on the energy consumption unit of subway stations in Korea, Building and Environment, 2004.

¹³⁷ Metro automatique et économie d'énergie, Siemens, 2009

En tenant compte de l'évolution des émissions de GES liés à l'utilisation d'électricité et de gaz naturel au cours du temps (voir § 3.8), on obtient les facteurs d'émissions suivants :

| Année | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Kg éq CO ₂ /m ² .an | | | | | | | | | | |
| Consommation d'électricité (hors chauffage) | 11.6 | 10.2 | 9.2 | 8.2 | 8.0 | 7.8 | 7.5 | 7.3 | 7.1 | 6.8 |
| Consommation de gaz naturel (chauffage et ECS) | 39.8 | 39.7 | 39.6 | 39.5 | 39.4 | 39.3 | 39.2 | 39.1 | 39.0 | 39.0 |

Tableau 47 : Facteurs d'émissions de consommation énergétique des bâtiments.

En ce qui concerne le chauffage des gares, nous proposons de ne considérer son utilisation que pour les bâtiments aériens. Les gares souterraines sont en effet généralement gardées à température grâce à l'énergie du sous-sol. L'utilisateur doit donc préciser la proportion des surfaces aériennes et souterraines. Pour les bâtiments aériens, l'utilisateur peut également préciser la consommation moyenne des gares pour le chauffage en fonction de la qualité de l'isolation thermique.

En ce qui concerne les fuites de climatisation, nous considérons par défaut que les bâtiments n'ont pas recours à la climatisation. En cas contraire, l'utilisateur peut préciser les surfaces en question.

3.5.3 Emissions induites par les activités de gestion, de marketing, de contrôle, de pilotage, etc.

Les données susceptibles d'être disponibles sur ce poste au stade de l'étude d'impact sont modestes. Nous proposons donc de prendre en compte ces émissions sur base des dépenses prévues dans le budget prévisionnel du projet du Grand Paris. Le facteur d'émissions est repris du volet Etude et travaux préalables à la construction (§ 3.3) et s'élève donc à 68 g éq. CO₂ par euro dépensé.

Pour permettre un affinement futur de l'évaluation des émissions de GES, l'utilisateur peut également réaliser un inventaire plus détaillé identique à celui développé dans la partie Etudes et travaux préalables à la construction (§3.3.3).

3.5.4 Emissions liées à l'entretien et au renouvellement de l'infrastructure

En ce qui concerne l'entretien courant, les consommations énergétiques des bâtiments (électricité et chauffage) sont déjà prises en compte dans la partie concernant la consommation des gares et des bâtiments techniques.

Nous ajoutons cependant les émissions liées aux déplacements domicile-travail des employés en charge de l'entretien de l'infrastructure et des rames de métro ainsi que les émissions liées aux intrants diversés.

En ce qui concerne les déplacements domicile-lieu de travail, nous considérons comme dans le volet sur les Etude et travaux préalables à la construction un nombre de jours de travail annuel moyen égal à 210 jours et une longueur moyenne du trajet domicile-travail égale à 15km en voiture particulière et 8.5km en métro¹³⁸. Le lieu de travail étant accessible directement grâce au métro, nous considérons un taux de répartition modale entre les véhicules particuliers et les transports en commun d'avantage en faveur des transports en commun que dans le cas de la construction. Dans ce cas-ci, nous considérons donc une répartition 45% voiture particulière (avec un taux de remplissage = 1.1), 45% métro et 10% modes doux. Ainsi en utilisant les facteurs d'émissions liés à l'utilisation de ces types de transports définis dans le volet Mobilité (§ 3.6), nous obtenons les facteurs d'émissions suivants :

| Année | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Kg éq CO ₂ / employé . an | | | | | | | | | | |
| Emissions déplacements domicile-travail | 631 | 583 | 540 | 498 | 445 | 407 | 373 | 356 | 340 | 324 |

Tableau 48 : Facteurs d'émissions des déplacements domicile-travail des employés responsables de l'entretien de l'infrastructure.

En ce qui concerne les intrants divers, nous utilisons le même facteur que celui définis pour les petites fournitures dans la section sur les Etudes et travaux préalables à la construction qui s'élève à 366 g éq CO₂/euro.

Le renouvellement ponctuel de gros matériel et les opérations lourdes de rénovation sont quant à eux comptabilisés de façon identique à la partie construction. Ce poste ne devrait pas être particulièrement important car la plupart des matériaux ont une durée de vie supérieure aux 30 ans qui séparent la mise en service et l'horizon 2050.

3.6 Mobilité en Ile-de-France

L'impact du projet de réseau de transport sur la mobilité en Ile-de-France est inclus dans le bilan des émissions de GES afin de prendre en compte le report modal de la route vers les transports en commun. Ce report modal implique des changements d'émissions de gaz à effet de serre dans deux volets distincts :

- La diminution de l'utilisation des véhicules particuliers, des deux-roues motorisés et dans une moindre mesure des poids lourds et en conséquence des émissions qui en découlent ;
- La redistribution des utilisateurs des transports publics sur le réseau (bus, tram, métro, RER, train) (pour plus d'informations voir rapport de phase 1, partie 1, § 1.3.2.4).

3.6.1 Utilisation des véhicules particuliers, des deux-roues motorisés et des poids lourds

En ce qui concerne l'influence de l'infrastructure sur l'utilisation des véhicules particuliers, des deux-roues motorisés et des camions, deux niveaux de précisions sont proposés à l'utilisateur :

Le premier niveau concerne les études ne disposant pas des données de vitesse de parcours sur les différents arcs du réseau ou les études qui, pour une raison ou une autre, ne désirent pas

utiliser le modèle COPERT 4 d'estimation des émissions de polluants par le trafic routier. Dans ce cas, l'utilisateur peut simplement déduire les émissions de gaz à effet de serre émises ou évitées grâce au projet sur base de la différence de véhicules kilomètres parcourus annuellement.

Le deuxième niveau concerne les études qui disposent des résultats vitesse-débit d'un modèle de trafic et qui utilisent le modèle COPERT 4 pour estimer les émissions de polluants du trafic routier. L'utilisateur doit, dans ce cas, entrer une information supplémentaire dans le calculateur et préciser le rapport entre la consommation de carburant moyenne évaluée grâce au modèle COPERT 4 pour les situations avec et sans projet. Ce niveau de précision permet de tenir compte des effets de congestion qui pourraient influencer la consommation de carburant différemment avec ou sans projet.

3.6.1.1 Estimation sur base des véhicules kilomètres parcourus uniquement

Véhicules particuliers

Des facteurs d'émissions généraux d'utilisation des véhicules particuliers donnés par les méthodologies Bilan Carbone® et Defra sont présentés dans les tableaux ci-dessous (Tableau 49 et Tableau 50). Ils intègrent les émissions liées à l'amortissement des véhicules ainsi que les émissions liées à leur consommation de carburant (émissions au pot d'échappement + émissions de la chaîne de production du carburant).

| | Emissions d'amortissement | Consommation moyenne/100 km | Emissions de consommation de carburant* | Total |
|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---|---------------------------------|
| Véhicule essence France | 40.15 g éq CO ₂ /km | 8.1 litres | 228.47 g éq CO ₂ /km | 268.61 g éq CO ₂ /km |
| Véhicule essence Région Parisienne | 40.15 g éq CO ₂ /km | 9.1 litres | 256.57 g éq CO ₂ /km | 296.72 g éq CO ₂ /km |
| Véhicule diesel | 40.88 g éq CO ₂ /km | 6.8 litres | 199.27 g éq CO ₂ /km | 240.15 g éq CO ₂ /km |

Tableau 49 : Facteurs d'émissions d'utilisation des véhicules particuliers. Source : Guide des facteurs d'émissions v6.1, Ademe 2010 * émissions au pot d'échappement et émissions de la chaîne de production du carburant

¹³⁸ Valeurs définies d'après les résultats des études INRETS et INSEE repris dans le guide des facteurs d'émissions V6.1, ADEME, 2010.

| | | Emissions directes (g éq CO ₂ /km) | Emissions indirectes (g éq CO ₂ /km) | Emissions totales (g éq CO ₂ /km) |
|------------------------|--------------|---|---|--|
| Véhicule essence | < 1.4 litre | 171.12 | 30.37 | 201.49 |
| | 1.4-2 litres | 212.09 | 37.69 | 249.78 |
| | > 2 litres | 299.07 | 53.21 | 352.28 |
| | moyen | 208.64 | 37.07 | 245.71 |
| Véhicule diesel | < 1.7 litres | 233.40 | 44.24 | 277.64 |
| | 1.7-2 litres | 180.95 | 34.39 | 215.34 |
| | > 2 litres | 243.29 | 46.35 | 289.64 |
| | moyen | 193.54 | 36.80 | 230.34 |
| Véhicule hybride moyen | | 139.00 | 24.65 | 163.65 |
| Véhicule moyen | | 204.59 | 36.97 | 241.56 |

Tableau 50 : Facteurs d'émissions d'utilisation des véhicules particuliers. Source : Guidelines to Defra/DECC's GHG conversion factors for company reporting, Defra, 2011.

Les facteurs d'émissions proposés par les deux méthodes sont relativement cohérents et constituent une base intéressante de départ pour le travail à réaliser. Il est cependant important de noter que ces facteurs ne prennent pas en compte :

- l'amélioration des techniques industrielles dans le temps ;
- l'insertion progressive de biocarburants dans les carburants traditionnels (voir phase 1, partie 2, § 2.3.1.2) ;
- les améliorations en cours et futures de l'efficacité des moteurs et donc les réductions de consommation moyenne de carburant ;
- l'introduction des véhicules électriques dans le parc automobile.

Les facteurs d'émissions ont donc été corrigés pour pallier à ces manques. La façon dont ils ont été corrigés pour chacun de ces 4 points est détaillée ci-dessous :

1. L'amélioration des techniques industrielles :

L'amélioration des techniques industrielles concernent la construction des voitures (et donc les émissions liées à l'amortissement des véhicules) ainsi que la chaîne de production des carburants (extraction, raffinage, transport,...).

Comme expliqué au § 3.1.2 de phase 1 partie 2, l'hypothèse retenue concernant l'amélioration des techniques industrielles correspond à une baisse de 0.3% par an.

Les émissions d'amortissement des véhicules diminuent donc de 0.3% par an à partir de 2005 (la plupart des études sur lesquelles se basent les facteurs d'émissions datent du milieu des années 2000) et passent ainsi de 40.15g éq CO₂ par km parcouru en 2005 (facteur issu du Bilan carbone®) à 34.73g éq CO₂/km en 2005 pour les véhicules à essence et de 40.88 éq CO₂/km en 2005 à 35.46 g éq CO₂/km en 2005.

La réduction des émissions induites tout au long de la chaîne de production des carburants correspond également à -0.3 % par an à partir de 2005. Les émissions passent ainsi de 336 g éq CO₂ par kg d'essence produit en 2005 à 291 g éq CO₂ par kg d'essence produit en 2005 (voir

§ 2.3.1.2 phase 1 partie 2 pour les facteurs d'émissions de la chaîne de production des carburants) et de 544 g éq CO₂ par kg de diesel produit en 2005 à 471 g éq CO₂ par kg de diesel produit en 2005.

2. Insertion progressive des biocarburants dans les carburants traditionnels :

Nous nous sommes basés sur la réflexion réalisée lors de la phase 1 de ce projet (partie 2, § 2.3.1.2). Selon les hypothèses définies lors de cette réflexion, la proportion de biocarburants incorporée dans les carburants traditionnels a fortement augmenté dans les années 2000 et est passée d'une proportion minimale en 2005 à 7.8% en 2009 et continuera de croître mais de manière plus modérée dans le futur et passera selon une croissance linéaire de 7.8% en 2009 à 20 % en 2050. Les émissions évitées par rapport à l'utilisation de carburants fossiles ont quant à elles été évaluées à 67% pour le biodiesel et 64 % pour le bio-éthanol. Les facteurs d'émissions d'utilisation des biocarburants s'élèvent donc à :

- Bio-éthanol : 36% x 3.741 g éq CO₂ / kg (facteur d'émissions de l'essence, voir phase 1 partie 2 § 3.1.2 pour plus de détails) = 1.347 g éq CO₂/ kg
- Bio-diesel : 43% x 3.471 (facteur d'émissions du diesel) = 1.145 g éq CO₂/kg

Ainsi, en tenant compte de l'insertion des biocarburants, le facteur d'émissions d'utilisation des carburants (chaîne de production et combustion) passe de 3.741 kg éq CO₂ par kg d'essence en 2005 (sans bio-éthanol) à 3.260 kg éq CO₂ par kg essence en 2005 avec 20% de bio-éthanol incorporé et de 3.471 kg éq CO₂ par kg de diesel en 2005 (sans bio-diesel) à 3.004 kg éq CO₂ par kg de diesel en 2005 avec 20% de bio-diesel incorporé.

3. L'amélioration progressive de l'efficacité des moteurs et de la réduction de consommation de carburants

Les facteurs d'émissions proposés par la méthode Bilan Carbone® ont été estimés sur base d'une consommation de 8.1 litres d'essence / 100km en moyenne pour la France et de 9.1 litres d'essence / 100km en moyenne pour la Région Parisienne. La consommation moyenne de diesel a quant à elle été considérée comme étant égale à 6.8 litres / 100km sans distinction France-Région Parisienne. Ces consommations définies sur base de données datant du début des années 2000 sont relativement élevées par rapport aux améliorations techniques déjà réalisées. En effet, comme le montre la Figure 93, la consommation moyenne des véhicules particuliers a fortement chuté. La consommation moyenne des véhicules particuliers (essence et diesel confondus) ne s'élevait ainsi plus qu'à 6.81 litres aux 100 km en moyenne pour la France en 2008 pour un parc roulant réparti approximativement 60% - 40% entre voitures diesel et voitures essence, respectivement.

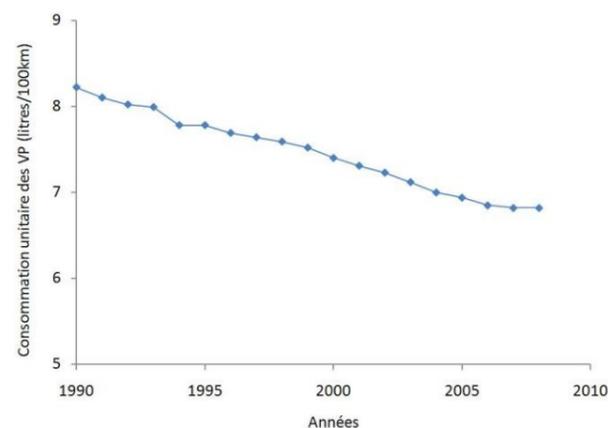


Figure 93 : Consommation unitaire moyenne des véhicules particuliers en France de 1990 à 2008 en litres au 100 km. Source : Ministère de l'écologie, du développement durable des transports et du logement, observations et statistiques, La consommation d'énergie et les émissions polluantes liées aux déplacements, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>, 2012

Cette diminution des consommations est due au renouvellement du parc automobile et à l'arrivée de véhicules à plus faible consommation. Le Parlement européen et le Conseil ont en effet adopté un règlement (443/2009) visant à atteindre un niveau moyen d'émissions de CO₂ pour les véhicules vendus par chaque constructeur de 120g CO₂/km en 2015. Sous l'effet de la hausse du prix des carburants, et de ces mesures contraignantes, des progrès importants ont donc été réalisés, faisant chuter les émissions moyennes des voitures neuves de 176 g/km en 1995 à 140 g/km de CO₂ en 2008¹³⁹.

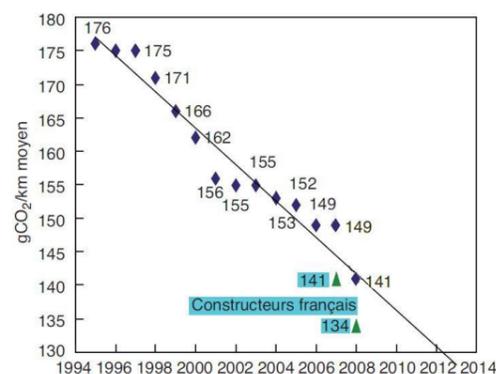


Figure 94 : Émissions de CO₂ moyennes des nouveaux modèles automobiles. Comité des constructeurs français d'automobile dans Panorama 2009, les émissions de gaz à effet de serre des transports, Innovation, énergie, environnement.

Les émissions moyennes du parc automobile roulant ont donc largement décliné durant les dernières années (Figure 95) pour atteindre 165g/km en 2008¹⁴⁰ (169g/km selon le rapport Secten, CTEPA¹⁴¹). Le Grenelle de l'environnement fixe par ailleurs des objectifs de 130 g/km en

moyenne pour 2020 pour l'ensemble du parc automobile français, il est donc probable que les mesures prises en France permettent de propager la tendance à la baisse actuelle des émissions moyennes par kilomètre.

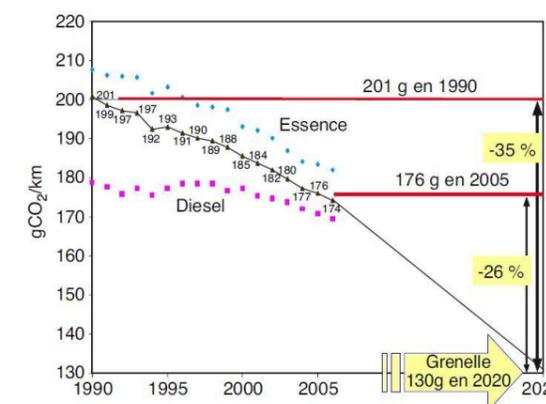


Figure 95 : Émissions de CO₂ moyennes du parc automobile en France et objectifs du Grenelle de l'environnement. Source : idem qu'au dessus. Attention ne concerne pas les émissions amont.

Les objectifs du Grenelle correspondent à une consommation moyenne approximative de 5.4 litres / 100 km en 2020. Ceci intègre cependant l'arrivée des véhicules électriques et hybrides, prise en compte spécifiquement dans le paragraphe suivant. En ce qui concerne les véhicules à moteur à explosion uniquement, nous considérons donc un prolongement de la tendance actuelle jusqu'à 2020 pour arriver à une moyenne de 5.9 litres / 100 km puis un léger affaiblissement du taux de décroissance pour arriver à 4.5 litres / 100 km en 2050 (la consommation moyenne différenciée entre véhicules à essence et véhicules diesel a été réalisée sur base d'une consommation des véhicules diesel égale à 84% des véhicules essence et d'une répartition entre les deux types de véhicules suivant les projections de l'INRETS¹⁴² jusqu'à 2025 et constante entre 2025 et 2050).

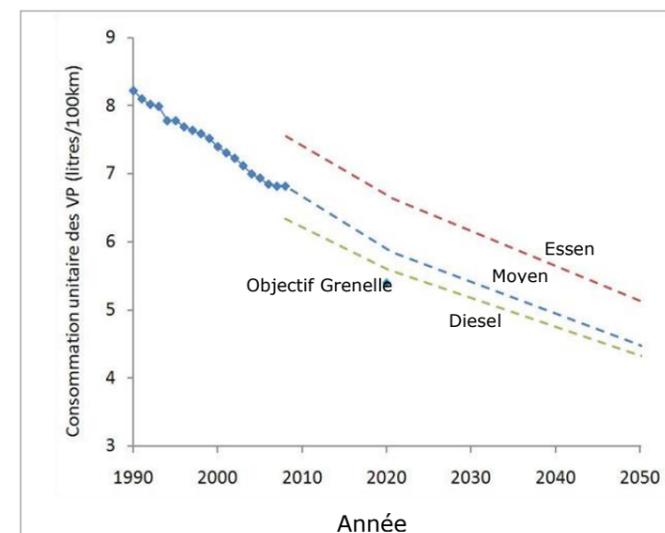


Figure 96 : Consommation moyenne du parc automobile français entre 1990 et 2008 et projections futures. Graphique et projections : Stratec 2011, consommation moyenne 1990-2008 : Ministère de l'écologie, du développement durable des transports et du logement, observations et statistiques, La consommation d'énergie et les émissions polluantes liées aux déplacements, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>, 2012

¹³⁹ Ministère de l'écologie, du développement durable des transports et du logement, observations et statistiques, La consommation d'énergie et les émissions polluantes liées aux déplacements, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>, 2012
¹⁴⁰ Panorama 2009, les émissions de gaz à effet de serre des transports, Innovation, Énergie, Environnement.
¹⁴¹ Citepa (rapport Secten 2010) – CCFA – Setra - Asfa - TNS-Sofres (panel Ademe/SOeS et panel "Inrets") – CPDP – Meeddm, SOeS.

¹⁴² Transport routier – Parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025, INRETS, 2004

4. Introduction des véhicules électriques et hybrides dans le parc automobile

L'introduction des véhicules électriques et hybrides devrait permettre de réduire la consommation de carburants au profit de l'énergie électrique.

Les hypothèses d'évolution des ventes de véhicules électriques et hybrides ont été reprises de l'étude du CGDD¹⁴³ sur les perspectives et l'analyse des coûts-avantages des véhicules électriques. Les hypothèses retenues des ventes de véhicules hybrides et électriques sont de 7.6% en 2016, 30 % en 2020 et 35% en 2025 avec donc un ralentissement de croissance des ventes important entre 2020 et 2025 et un plafonnement aux alentours de 35%. En considérant le renouvellement du parc automobile progressif et une durée de vie moyenne des véhicules de 10 à 15 ans, on peut estimer que la proportion du parc roulant constituée de véhicules électriques et hybrides passera de 0% en 2010 à 7 % en 2020, 20% en 2025 et 35% en 2040 puis restera inchangée jusqu'en 2050. La majorité de ces véhicules étant des véhicules hybrides (selon les hypothèses de la même étude, ces véhicules parcourent 50% des km grâce à l'énergie électrique), on considérera que 30% des distances parcourues par le parc roulant électrique et hybride seront réalisées à l'aide de carburants fossiles. En termes de véhicule.km, on obtient donc approximativement 5% des véh.km parcourus à l'aide de l'énergie électrique en 2020, 14% en 2025 et 25% entre 2040 et 2050 (Figure 97).

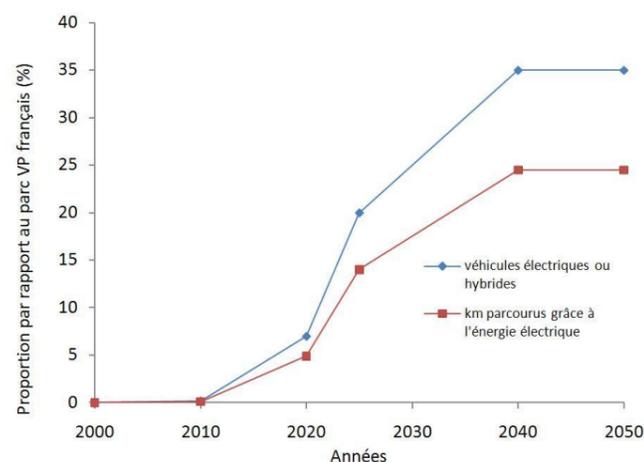


Figure 97 : Projections de la proportion du parc de véhicules particuliers constitués par des véhicules électriques ou hybrides et de la proportion des véhicules.km parcourus grâce à l'énergie électrique. Stratec 2011.

Selon les hypothèses de la même étude, la consommation moyenne des véhicules électriques est de 0.2 kWh/km. En tenant compte des émissions de CO₂ liées à la production d'électricité et de son évolution au cours du temps (60 g éq CO₂/kWh en 2020 et 50 g éq CO₂/kWh 2050, voir phase 1, partie 2, § 2.3.1.1) on obtient un facteur d'émission lié à la consommation des véhicules électriques passant de 16 g éq CO₂/km en 2005 à 10 g éq CO₂/km en 2050. A cela s'ajoute les émissions dues à l'amortissement des véhicules que l'on considérera égales à celles des voitures à essence.

Facteurs d'émissions totaux

Selon toutes les hypothèses précitées, le facteur d'émissions par véhicule kilomètre s'élèvera à :

¹⁴³ Les véhicules électriques en perspective, Analyse coûts-avantages et demande potentielle, Commissariat Général au Développement Durable, 2011.

| | Emissions g éq CO ₂ /km | | |
|------------|------------------------------------|-------|-------|
| | 2010 | 2035 | 2050 |
| Electrique | 55.0 | 47.5 | 44.7 |
| Essence | 236.2 | 184.8 | 158.3 |
| Diesel | 211.6 | 166.6 | 143.2 |

Tableau 51 : Facteurs d'émissions d'utilisation de véhicules particuliers et évolution au cours du temps. Stratec 2011

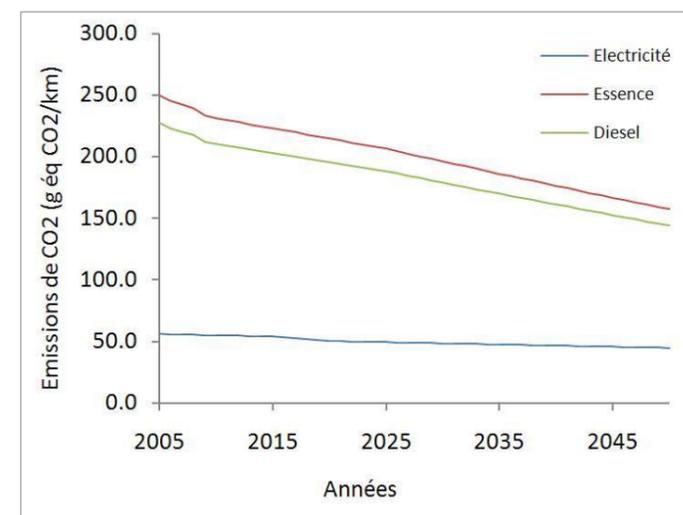


Figure 98 : Facteurs d'émissions d'utilisation de véhicules particuliers et évolution au cours du temps. Stratec 2011

S'il on tient compte de l'évolution du parc automobile roulant aux énergies fossiles¹⁴⁴ et s'il on y ajoute l'évolution du parc de véhicules électriques (non considérés dans les projections de l'INRETS) on obtient un parc roulant réparti entre 43% essence et 57% diesel en 2005 qui évolue vers une croissance du diesel au détriment de l'essence pour atteindre 37% essence et 63% diesel en 2010, 19% essence, 67 % diesel et 14% électrique en 2025 et finalement 16% essence, 59% diesel et 25% électrique entre 2035 et 2050.

Il ne reste alors plus que de considérer une masse volumique de l'essence d'approximativement 750 g/litre et de diesel de 840 g/litre pour obtenir un facteur d'émission global pour l'utilisation de véhicules particuliers dont les principales valeurs sont reprises dans le tableau ci-dessous :

| Années | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Emissions moyennes pour l'utilisation des VP (g CO ₂ /km) | 239.3 | 220.8 | 204.3 | 188.5 | 168.0 | 153.8 | 140.4 | 134.0 | 127.7 | 121.5 |

Tableau 52 : Facteurs d'émissions globaux d'utilisation des véhicules particuliers.

Remarque : La réflexion qui a été réalisée sur l'évolution du facteur d'émission dans le temps est essentiellement basée sur les émissions de CO₂. Les émissions des autres GES (principalement CH₄, N₂O et les HFC) sont comprises dans le facteur d'émissions et sont donc considérées comme

¹⁴⁴ Toujours selon les projections de l'INRETS (Transport routier – Parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025, INRETS, 2004) jusque 2025 et en gardant le parc constant entre 2025 et 2050.

évoluant dans le temps de la même manière que les émissions de CO₂ bien qu'en réalité leur évolution dans le temps pourrait différer. Une analyse prospective détaillée de l'influence des nouvelles technologies sur les émissions de ces GES, similaire à celle qui a été réalisée pour le CO₂ pourrait donc s'avérer nécessaire. Cependant, ces GES ne représentent qu'une faible participation (≈4%) aux émissions totales des transports (Figure 99) et l'analyse détaillée ne pourrait que modifier de manière négligeable le facteur d'émissions.

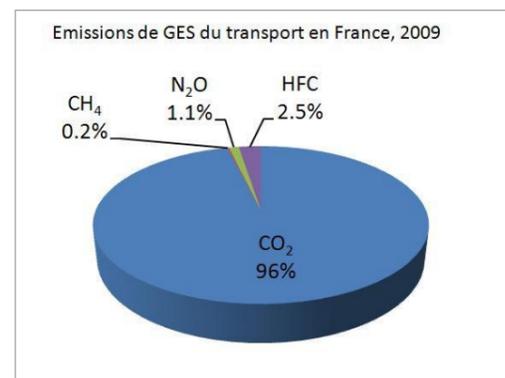


Figure 99 : Emissions de gaz à effet de serre du transport en France, 2009. Proportions pour un total de 122 Mt éq CO₂. PFC et SF₆ = 0%. Source : Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France, séries sectorielles et analyses étendues, CITEPA, 2011

Deux-roues motorisés

La méthodologie Bilan Carbone® propose les facteurs repris dans le Tableau 53. Ces facteurs correspondent aux émissions de combustion uniquement et donc à une consommation de carburant allant de 2.7 litres / 100 km pour les cyclomoteurs à 5.0 litre / 100 km pour les motocycles > 125 cc.

| | g éq CO ₂ / véh.km |
|--------------------|-------------------------------|
| Cyclomoteur | 65.96 |
| Motocycle < 125 cc | 106.27 |
| Motocycle > 125 cc | 120.92 |

Tableau 53 : facteurs d'émissions d'utilisation des deux roues motorisés. Source : Guide des facteurs d'émissions v6.1, ADEME 2010.

La méthode Defra propose également des facteurs d'émissions d'utilisation des deux roues motorisés qui tiennent compte, eux, des émissions directes de combustion mais également des émissions indirectes (chaîne de production du carburant et amortissement). Ces facteurs sont repris dans le Tableau 54 :

| | Emissions directes | Emissions indirectes g éq CO ₂ / km | Emissions totales |
|----------------------|--------------------|---|-------------------|
| Motocycle < 125 cc | 87.79 | 15.18 | 102.97 |
| Motocycle 125-500 cc | 106.49 | 18.42 | 124.91 |
| Motocycle > 500 cc | 139.92 | 24.51 | 164.43 |

Tableau 54 : facteurs d'émissions d'utilisation des deux roues motorisés. Source : Guidelines to Defra/DECC's GHG conversion factors, Defra, 2011.

Les deux méthodologies présentent à nouveau des résultats relativement similaires. Les facteurs d'émissions de la méthode Bilan Carbone ne tenant compte que des émissions de combustions, ils ont été corrigés pour y inclure les émissions de la chaîne de production du carburant et de l'amortissement des véhicules. Pour les émissions de la chaîne de production, les valeurs ont été reprises de la réflexion du §3.1.2 de la phase 1 partie 2. Pour les émissions d'amortissement des véhicules, faute de mieux, elles seront considérées comme représentant une proportion similaire à celles calculées pour l'utilisation de voitures (15% des émissions totales).

Ainsi les facteurs initiaux retenus sont :

| | Consommation de carburant* g éq CO ₂ / véh.km | Amortissement g éq CO ₂ / véh.km | Total |
|--------------------|---|--|-------|
| Cyclomoteur | 77.2 | 13.6 | 90.8 |
| Motocycle < 125 cc | 124.4 | 21.8 | 146.2 |
| Motocycle > 125 cc | 141.5 | 24.9 | 166.4 |

Tableau 55 : facteurs d'émissions initiaux d'utilisation des deux roues motorisés (consommation de carburant et amortissement). Sources : consommation de carburant : Guide des facteurs d'émissions V6.1, Ademe 2010, amortissement : calculs Stratec 2012. * émissions de combustion et de la chaîne de production

Ces facteurs d'émissions évoluent par ailleurs dans le temps selon les mêmes hypothèses retenues dans le cadre de l'utilisation des véhicules particuliers à essence et électriques (il sera donc considéré que le parc de deux roues fonctionnant à l'électricité évoluera dans le temps proportionnellement au parc de véhicules particuliers roulant à l'électricité). Les facteurs d'émissions et leur évolution au cours du temps sont repris dans le tableau ci-dessous :

| | Emissions d'utilisation des deux roues motorisés, g éq CO ₂ /véh.km | | | | | | | | | |
|--------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
| Cyclomoteur | 90.8 | 83.5 | 77.0 | 70.8 | 62.7 | 57.2 | 52.0 | 49.6 | 47.2 | 44.8 |
| Motocycle < 125 cc | 146.2 | 134.5 | 124.0 | 113.9 | 100.9 | 92.0 | 83.7 | 79.8 | 75.9 | 72.1 |
| Motocycle > 125 cc | 166.4 | 153.1 | 141.1 | 129.7 | 114.9 | 104.8 | 95.3 | 90.8 | 86.5 | 82.2 |

Tableau 56 : facteurs d'émissions d'utilisation des deux roues motorisés et leur évolution dans le temps.

Poids lourds

L'impact de la mise en place d'une infrastructure de transport public devrait se limiter principalement au transport de personnes et donc aux véhicules particuliers et aux deux roues motorisés. Cependant il est possible que certaines mesures ayant des impacts sur le trafic routier

induisent des changements d'itinéraire de certains poids lourds et donc un allongement ou un raccourcissement des distances parcourues. L'outil contient donc une cellule particulière pour les distances parcourues par les poids lourds pour laquelle un facteur d'émissions doit donc également être défini.

La définition des facteurs d'émissions d'utilisation de poids lourds peut constituer un enjeu très important pour le calcul des émissions de gaz à effet de serre réalisé dans le cadre d'études ayant un enjeu fort dans le domaine du transport de marchandise ou dans le cadre d'évaluations des bilans d'émissions de GES d'entreprises qui utilisent abondamment le transport de marchandises pour s'approvisionner ou délivrer leur production. La définition de ces facteurs à donc fait l'objet d'études approfondies notamment dans le cadre de la méthodologie Bilan Carbone® qui considère plus de 14 catégories de poids lourds.

Dans le cas d'une infrastructure de transport public, l'enjeu est généralement beaucoup plus modéré, et bien qu'il soit intéressant de l'intégrer, il ne semble pas nécessaire de l'approfondir de manière importante. Dans le cas du projet du Grand Paris, il est par ailleurs probable que l'information disponible se limite au nombre de kilomètres parcourus par les poids lourds en général, sans distinction de leur masse ou puissance. La méthode se limitera donc à une seule classe de poids lourds moyenne. Dans le cas de projets pour lesquels l'enjeu serait plus important, nous recommandons d'adapter l'outil grâce aux données disponibles dans le Guide des facteurs d'émissions de la méthode Bilan Carbone® (V6.1, ADEME 2010).

Les facteurs d'émissions proposés par les méthodologies Bilan Carbone® et Defra sont reprises dans le Tableau 57 et le Tableau 58 :

| PTAC | Amortissement Carburant Carburant Total | | | |
|-------------|---|-------|--------|--------|
| | g éq CO ₂ /véh.km | | | |
| 3.51-5 t | 44.0 | 52.0 | 492.1 | 588.1 |
| 5.1-6 t | 52.4 | 40.7 | 385.9 | 478.9 |
| 6.1-10.9 t | 60.1 | 61.6 | 582.6 | 704.3 |
| 11-19 t | 75.5 | 83.2 | 787.5 | 946.1 |
| 19.1-21 t | 78.1 | 96.0 | 909.9 | 1083.9 |
| 21.1-32.6 t | 87.2 | 120.2 | 1138.5 | 1345.9 |

Tableau 57 : Facteurs d'émission d'utilisation des poids-lourds. Source : Guide des facteurs d'émissions v6.1, ADEME 2010.

| Type | PTAC | Charge (%)* | Emissions directes | Emissions indirectes | Total |
|------------------------------|-----------|-------------|--------------------|----------------------|--------|
| g éq CO ₂ /véh.km | | | | | |
| Rigide | 3.5-7.5 t | 43 | 590.8 | 113.9 | 704.7 |
| | 7.5-17 t | 36 | 748.7 | 143.6 | 892.4 |
| | > 17 t | 52 | 971.9 | 186.5 | 1158.4 |
| Articulé | 3.5-33 t | 45 | 859.7 | 164.9 | 1024.6 |
| | > 33 t | 61 | 995.5 | 191.0 | 1186.4 |
| Moyenne UK | | 55 | 898.8 | 172.4 | 1071.3 |

Tableau 58 : Facteurs d'émissions d'utilisation des poids-lourds. Source : Guidelines to Defra/DECC's GHG conversion factors, Defra, 2011. * correspond à la proportion moyenne de la charge maximale utilisée.

A nouveau, les facteurs proposés par les deux méthodologies sont cohérents. La méthode Defra propose un facteur moyen pour l'ensemble du Royaume-Uni qui pourra s'avérer intéressant puisque notre méthodologie doit proposer un facteur d'émission moyen pour tous les types de poids-lourds.

Nous nous sommes néanmoins basés sur les facteurs d'émissions de la méthode Bilan Carbone® qui permettent de distinguer les émissions liées à l'amortissement du véhicule à la chaîne de production du carburant et à la combustion du carburant. Pour obtenir un facteur d'émissions d'utilisation des poids lourds pour une catégorie unique, la définition se base sur un camion de taille moyenne dont le poids total autorisé en charge (PTAC) se situe entre 11 et 19 tonnes. Selon les hypothèses retenues dans la méthode Bilan Carbone®, la consommation moyenne de ce type de véhicule s'élève à 29.6 litres/100km et l'amortissement du véhicule correspond à 75.5 g éq CO₂ par km parcouru.

En faisant varier ces valeurs afin de tenir compte de l'amélioration de l'efficacité énergétique des processus industriels, de l'intégration progressive du bio-diesel et de la réduction de la consommation moyenne réalisée grâce à l'arrivée de nouvelles technologies selon les mêmes hypothèses que celles retenues pour les véhicules particuliers roulant au diesel, on obtient les facteurs d'émissions suivants :

| | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Utilisation des PL g éq CO ₂ par km | 938.5 | 864.6 | 816.0 | 767.6 | 737.1 | 700.8 | 665.1 | 630.1 | 595.8 | 562.2 |

Tableau 59 : Facteurs d'émissions d'utilisation des poids-lourds défini sur base d'un véhicule de PTAC compris entre 11 et 19 tonne.

Le facteur d'émissions en 2005 est donc légèrement supérieur au facteur d'émissions moyen proposé par la méthode Defra (= 1071.3 g éq CO₂ /km) mais reste cohérent.

3.6.1.2 Prise en compte de la vitesse de parcours grâce au modèle COPERT 4

Dans le cas d'études disposant des résultats d'une modélisation des transports, il est possible d'évaluer l'impact du projet non seulement sur les distances parcourues mais également sur les vitesses moyennes de parcours (voir Phase 1, partie 2, § 2.4.4 pour plus de détails). Cette information permet alors de tenir compte des variations de consommations de carburant en fonction de la vitesse et du phénomène de congestion.

Pour ce faire, il faut utiliser un modèle qui permette de calculer la consommation moyenne en fonction de la vitesse moyenne sur chaque arc du modèle de transport, tel que le modèle européen COPERT IV. Plusieurs remarques doivent cependant être soulevées à propos de COPERT IV :

- Le modèle COPERT IV a été développé pour estimer les émissions de polluants atmosphériques (y compris les émissions de GES) au pot d'échappement et non pas dus à l'entièreté de la chaîne de production du carburant et à l'usure des véhicules. Il est donc nécessaire de pondérer les émissions issues du modèle afin de passer des émissions « au pot d'échappement » vers des émissions globales de GES.
- Le modèle COPERT IV ne prend pas en compte l'influence de l'amélioration du parc automobile (après la norme EURO 4) sur les émissions de CO₂. En effet, lors de sa sortie,

aucune réglementation contraignante n'était encore entrée en vigueur pour limiter les émissions de CO₂, les normes EURO 5 et 6 prises en compte dans le modèle se limitant à des restrictions sur les émissions de polluants directement néfastes pour la santé. Ainsi, les émissions moyennes d'un véhicule moyen en 2007 sont sensiblement égales aux émissions d'un véhicule de même cylindrée construit en 2025 (Figure 100).

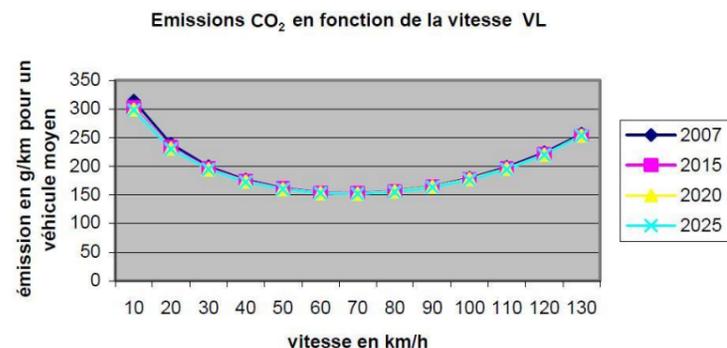


Figure 100 : Emissions de CO₂ en fonction de la vitesse et du parc automobile pour un véhicule léger moyen selon COPERT IV. Source : Sétra 2009, Emissions routières de polluants atmosphériques.

L'utilisation directe des résultats issus de COPERT IV en termes de consommation totale de carburant n'est donc pas adéquate. Néanmoins, l'utilisation du modèle permet de quantifier l'influence relative du projet sur la consommation de carburant. En calculant la consommation totale ainsi que les distances parcourues totales en situation de référence et en situation de projet, il est ainsi possible de déterminer le ratio :

$$\text{Influence du projet sur la consommation de carburant} = \frac{C_{ap} / D_{ap}}{C_{sp} / D_{sp}} = \frac{\text{Consommation moyenne avec projet}}{\text{Consommation moyenne sans projet}}$$

Avec :
 C_{ap} = consommation totale de carburant avec projet
 D_{ap} = distances parcourues avec projet
 C_{sp} = consommation totale de carburant sans projet
 D_{sp} = distances parcourues sans projet

On obtient ainsi une valeur qui sera inférieure à 1 dans le cas où le projet induit une diminution de la consommation moyenne en carburant et supérieure à 1 dans le cas où le projet induit une augmentation de la consommation moyenne en carburant.

Lorsque cette valeur est précisée dans la feuille de calcul, les émissions totales liées à l'utilisation des véhicules sont corrigées afin de tenir compte des émissions induites ou évitées grâce à l'augmentation ou à la diminution des consommations en carburant. Cette correction ne se fait pas sur les émissions liées à l'amortissement des véhicules et prend donc en compte uniquement les émissions liées à la consommation de carburant (chaîne de production et combustion) reprises dans le tableau ci-dessous :

| année | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| Emissions (g éq CO ₂ / véh.km) | 198.8 | 180.8 | 164.9 | 149.7 | 129.8 | 116.2 | 103.4 | 97.6 | 91.9 | 86.4 |

Tableau 60 : Emissions de GES relatives à la consommation de carburant des véhicules particuliers (chaîne de production du carburant et combustion). Ces émissions excluent donc les émissions dues à l'amortissement des véhicules.

Cette correction peut être appliquée de manière identique aux deux roues motorisés et aux poids-lourds dont les émissions liées à la consommation de carburant sont reprises dans les tableaux ci-dessous :

| | Emissions d'utilisation des deux roues motorisés, g éq CO ₂ /véh.km | | | | | | | | | |
|--------------------|--|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
| Cyclomoteur | 77.2 | 70.1 | 63.8 | 57.8 | 49.9 | 44.6 | 39.6 | 37.4 | 35.2 | 33.1 |
| Motocycle < 125 cc | 124.4 | 113.0 | 102.8 | 93.1 | 80.4 | 71.8 | 63.9 | 60.3 | 56.7 | 53.3 |
| Motocycle > 125 cc | 141.5 | 128.5 | 117.0 | 105.9 | 91.5 | 81.7 | 72.6 | 68.5 | 64.5 | 60.6 |

Tableau 61 : Emissions de GES relatives à la consommation de carburant des 2 roues motorisés (chaîne de production du carburant et combustion). Ces émissions excluent donc les émissions dues à l'amortissement des véhicules.

| | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Utilisation des PL (g éq CO ₂ par km) | 863.0 | 790.2 | 742.8 | 695.5 | 666.2 | 630.9 | 596.4 | 562.5 | 529.4 |

Tableau 62 : Facteurs d'émissions relatifs à la consommation de carburant des poids-lourds (chaîne de production du carburant et combustion). Ces émissions excluent donc les émissions dues à l'amortissement des véhicules.

Remarque : l'utilisation du modèle COPERT IV n'est pas toujours aisée et prend en compte non seulement la vitesse de parcours mais également de nombreux paramètres tels que la température moyenne, la longueur moyenne des trajets, et la composition du parc automobile. Pour les utilisateurs qui ne voudraient pas utiliser ce modèle, nous avons évalué la relation entre la consommation de carburant et la vitesse moyenne sur base des hypothèses de température, de longueur moyenne des trajets et de parc automobile utilisées dans le cadre de l'évaluation environnementale stratégique (Biotope, Stratec, Burgeap 2010). Cette relation est représentée dans la figure ci-dessous :

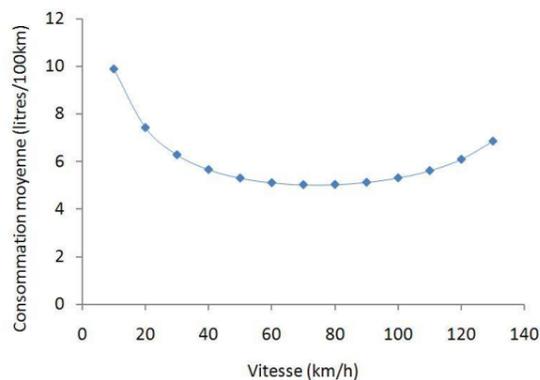


Figure 101 : Relation entre la consommation de carburant des véhicules particuliers et leur vitesse calculée grâce au modèle COPERT 4 et selon les hypothèses de l'étude environnementale stratégique du Grand Paris (Biotope, Stratec, Burgeap 2010).

Cette relation peut être représentée par la régression polynomiale d'ordre 4 suivante :

Consommation moyenne (litres/100km) = $1,86110^{-7} x^4 - 5,941.10^{-5} x^3 + 0,0072479 x^2 - 0,394328 x + 13,06331$ avec x= vitesse en km/h. En appliquant cette équation à chaque arc, il est ainsi possible de calculer une consommation moyenne avec et sans projet sans avoir recours au modèle COPERT IV.

Le même exercice peut être fait pour les deux-roues motorisé et les poids-lourds :

Deux roues motorisés :

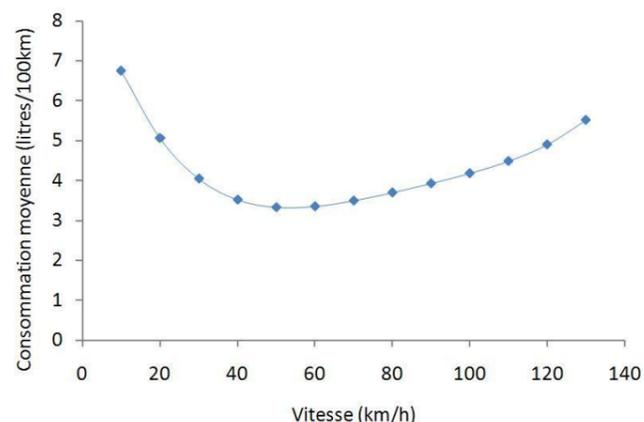


Figure 102 : Relation entre la consommation de carburant des deux roues motorisés et de leur vitesse calculée grâce au modèle COPERT 4 et selon les hypothèses de l'étude environnementale stratégique du Grand Paris (Biotope, Stratec, Burgeap 2010).

Cette relation peut être représentée par la régression polynomiale d'ordre 4 suivante :

Consommation moyenne (litres/100km) = $1,2509.10^{-7} x^4 - 4,2896.10^{-5} x^3 + 5,6113.10^{-3} x^2 - 0,30855 x + 9,3167$, avec x= vitesse en km/h.

Poids-lourds :

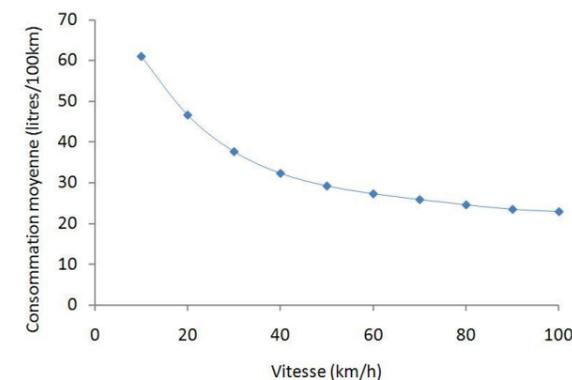


Figure 103 : Relation entre la consommation de carburant des poids lourds et leur vitesse calculée grâce au modèle COPERT 4 et selon les hypothèses de l'étude environnementale stratégique du Grand Paris (Biotope, Stratec, Burgeap 2010).

Cette relation peut être représentée par la régression polynomiale d'ordre 4 suivante :

Consommation moyenne (litres/100km) = $1,4992.10^{-6} x^4 - 4,45506.10^{-4} x^3 + 0,0500812 x^2 - 2,6528 x + 82,977$, avec x= vitesse en km/h.

3.6.2 Utilisation du réseau de transport public

Il s'agit ici de tenir compte de la redistribution des voyageurs sur le réseau de transport en commun, hors infrastructures du Grand Paris dont les émissions sont calculées par l'onglet fonctionnement du métro (pour plus d'informations voir rapport de phase 1, partie 1, §3.2.4). Le réseau est constitué principalement des lignes de bus, de tramways, de métros et du RER.

3.6.2.1 Bus

Plusieurs études proposent des facteurs d'émissions pour l'utilisation des autobus. Il est important de noter qu'un paramètre déterminant du facteur d'émissions est le taux de remplissage moyen qui peut varier de quelques pourcents dans les zones retirée à 30 ou 40 % dans les zones urbaines.

La méthode Bilan Carbone propose les facteurs suivants :

| | Nbre max de passagers | Nbre moyen de passagers | Emissions dues à l'amortissement | Emissions dues à la conso. de carburant | Emissions totales |
|--------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------------|---|-------------------|
| | | | g éq CO ₂ /voy.km) | | |
| Autobus urbain IdF | 100 | 21 | 2.91 | 73.65 | 76.57 |
| Autobus province | 100 | 10 | 6.12 | 94.54 | 100.66 |

Tableau 63 : Emissions dues à l'utilisation des autobus. Source : Guide des facteurs d'émissions, V6.1, Ademe, 2010

Une étude spécifique sur les facteurs d'émissions des modes de transports en commun urbains à par ailleurs été menée par le Predit. Les facteurs d'émissions relatifs à l'usage des autobus sont les suivants :

| Emissions de combustion* | Emissions dues à l'amortissement des bus | Emissions dues à la maintenance des bus | Emissions totales |
|-------------------------------|--|---|-------------------|
| G éq CO ₂ / voy km | | | |
| 110 | 7 | 3 | 120 |

Tableau 64 : Emissions dues à l'utilisation des autobus. Source : Calcul de facteurs d'émissions des modes de transports en commun urbains, Predit, 2007. * Parc autobus y compris électrique gaz, biocarburants,...

La méthode Defra propose quant à elle les facteurs suivants :

| | Emissions directes | Emissions indirectes | Emissions totales |
|---------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------|
| (g éq CO ₂ / voy.km) | | | |
| Bus moyen | 148.8 | 28.3 | 177.1 |
| Bus Londres | 86.3 | 16.4 | 102.7 |

Tableau 65 : Facteurs d'émissions d'utilisation des bus. Source : Guidelines to Defra/DECC's GHG conversion factors, Defra 2010.

Finalement le Carbon Trust propose un facteur d'émission moyen pour l'utilisation du bus de 135.1g éq CO₂/ voy.km¹⁴⁵.

Les facteurs d'émissions issus des différentes méthodes sont assez cohérents, et généralement plus élevés en province qu'en zone urbaine à cause du taux de remplissage plus élevé en ville.

L'étude du Predit est la plus détaillée et se base sur les données RATP. Elle ressort donc comme la plus adéquate pour la situation du Grand Paris. Le facteur d'émission est légèrement plus élevé que ceux proposés par le Bilan Carbone® notamment car les facteurs prennent en compte l'entretien des autobus et un taux de remplissage moins élevé (14.8% contre 21%).

En se basant sur ces facteurs d'émissions et en les faisant varier selon les mêmes hypothèses que celles retenues pour les véhicules particuliers roulant au diesel (amélioration des techniques industrielles, diminution de consommation moyenne et introduction des biocarburants), on obtient les facteurs suivants :

| Année | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|--|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Facteur d'émissions d'utilisation de l'autobus urbain (g éq CO ₂ /voy.km) | 120.1 | 110.7 | 104.5 | 98.3 | 94.4 | 89.8 | 85.2 | 80.7 | 76.4 | 72.1 |

Tableau 66 : Facteurs d'émissions pour l'utilisation de l'autobus sur le réseau d'Ile-de-France. Stratec 2011

3.6.2.2 Tramways, métros et RER

Les émissions liées à l'utilisation du tramway, du métro ou du RER concernent principalement les émissions dues à la production d'électricité et dépendent donc largement du facteur d'émission de production de l'énergie électrique. Etant donné le facteur d'émission du kWh électrique

particulièrement bas de la France (voir phase 1 partie 2 § 2.3.1.1), il est donc attendu d'obtenir une disparité plus importante entre les facteurs d'émissions provenant des différents pays.

La méthode Bilan Carbone® propose des facteurs d'émissions issus de l'étude du Predit sur les facteurs d'émission des modes de transport urbains¹⁴⁶. Dans le guide des facteurs d'émissions, les auteurs remarquent que l'étude se limite à l'énergie de traction, à l'amortissement et à l'entretien du matériel roulant. Les émissions liées à la construction des infrastructures et à l'énergie hors traction (chauffage, ventilation,...) ne sont, par contre, pas incluses (hors ces postes peut être particulièrement significatifs). Les facteurs d'émissions sont les suivants :

| | Emissions de traction | Emissions dues à l'amortissement | Emissions dues à la maintenance | Emissions totales |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| g éq CO ₂ / voy km | | | | |
| Tramway | 3.8 | 2.2 | 0.7 | 6.7 |
| Métro | 4.1 | 1.6 | 0.5 | 6.2 |
| RER | 4.2 | n.d. | n.d. | n.d. |

Tableau 67 : facteurs d'émissions d'utilisation des transports en commun ferrés, tramway, métro et RER. Source : Calcul des facteurs d'émission des modes de transport en commun urbains, Predit, 2007.

Ces facteurs d'émissions sont particulièrement bas en comparaison avec d'autres facteurs proposés à l'étranger. La méthode Defra propose, par exemple, les facteurs suivants :

| | Emissions directes | Emissions indirectes | Emissions totales |
|---------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------|
| (g éq CO ₂ / voy.km) | | | |
| RER et Tramway | 71.5 | 9.4 | 80.9 |
| Métro Londres | 73.6 | 9.7 | 83.3 |

Tableau 68 : facteurs d'émissions d'utilisation des transports en commun ferrés. Source : Defra

Le Carbon Trust¹⁴⁷ propose quant à lui un facteur d'émission de 77.3 g éq CO₂ / voy.km pour le tramway et 74.6 g éq CO₂ / voy.km pour le métro.

Une étude réalisée pour la STIB (société de transport public de Bruxelles)¹⁴⁸ évalue quant à elle les émissions du tramway à 45 g éq CO₂/voy km et du métro à 30 g CO₂/voy.km.

Les différences importantes entre les facteurs d'émissions proviennent en partie du facteur d'émission moyen par kWh de la France qui est 4 fois moins élevé que le kWh moyen européen (approximativement 80 g éq CO₂/kWh contre 337 g éq CO₂/kWh).

Malgré ça, il semble que les facteurs d'émissions avancés par l'étude du Predit ont aussi été définis sur base de facteurs d'émissions du kWh électrique particulièrement bas (≈40 g éq CO₂/kWh). En effet, s'il on procède au calcul des émissions à partir de l'énergie nécessaire à la traction des véhicules d'une autre étude sur l'efficacité énergétique et environnementale des modes de transport (Deloitte, 2008) et que l'on tient compte d'un facteur d'émissions de 80 g éq CO₂/kWh, on obtient 14 g éq CO₂/voy.km pour le tram et 15 g éq CO₂/voy.km pour le RER et le métro.

Il nous semble donc important de corriger le facteur d'émission relatif à la consommation d'électricité. Pour se faire, et faute d'avoir une analyse détaillée récente des consommations énergétiques de la RATP, nous nous sommes basés sur les estimations de consommation

¹⁴⁶ Calcul de facteurs d'émission des transports en commun urbains, prédit, 2007.

¹⁴⁷ Conversion factors, Carbon Trust, 2010

¹⁴⁸ Comparaison des émissions de CO₂ par mode de transport en Région de Bruxelles Capitale, CO2logic, 2008.

¹⁴⁵ Conversion factors, Carbon Trust, 2010

énergétique et de voyageurs.km réalisés par la RATP en 2003¹⁴⁹. Les données et calculs sont repris dans le tableau ci-dessous :

| | Tramway | Métro | RER |
|--|---------|--------|--------|
| Voy.km (millions) | 138.2 | 6014.9 | 4084.1 |
| Energie de traction (10 ⁶ kWh) | 9.3 | 516.3 | 377.9 |
| Facteur d'émissions (g éq CO ₂ /voy.km) | 5.4 | 6.9 | 7.4 |

Tableau 69 : voyageur.km et consommation énergétique réalisés par la RATP en 2003.
Source : RATP et ADEME dans note rapide sur les transports, IAURIF 2005.

Les émissions d'amortissement et de maintenance du RER seront considérées par ailleurs comme étant égales à celles du tramway et les émissions de tractions seront adaptées pour tenir compte de l'évolution du facteur d'émissions de l'énergie électrique. Ainsi les facteurs d'émissions finaux retenus sont les suivants :

| Année | Emissions (g éq CO ₂ /voy.km) | | | | | | | | | |
|---------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
| Tramway | 8.3 | 8.1 | 7.9 | 6.9 | 6.8 | 6.7 | 6.6 | 6.5 | 6.4 | 6.3 |
| Métro | 9.0 | 8.8 | 8.5 | 7.2 | 7.1 | 7.0 | 6.8 | 6.7 | 6.5 | 6.4 |
| RER | 10.3 | 10.1 | 9.8 | 8.5 | 8.3 | 8.1 | 8.0 | 7.8 | 7.7 | 7.5 |

Tableau 70 : Facteurs d'émissions d'utilisation des transports en communs ferrés urbains, tramway, métro et RER. Stratec 2011.

3.6.2.3 Train

Les facteurs proposés par la méthode Bilan Carbone® sont issus de travaux de la SNCF mais ne tiennent pas compte, comme précédemment, des émissions liées à la construction des infrastructures, à sa maintenance et à l'énergie consommée hors traction. Les facteurs sont les suivants :

| | Emissions (g éq CO ₂ /voy.km) |
|------------------------|--|
| Train express régional | 59.7 |
| Train rapide national | 33.0 |
| TGV | 22.4 |

Tableau 71 : Facteurs d'émissions d'utilisation des trains en France.
Source : Guide des facteurs d'émissions, V6.1, ADEME 2010

Dans l'exercice de Bilan Carbone de la LGV Rhin Rhône, les émissions dues à la maintenance de l'infrastructure et du matériel roulant ainsi que de l'énergie nécessaire au fonctionnement des gares ont par ailleurs été évaluées à 8% de l'énergie de traction.

La méthode Defra propose un facteur d'émissions de 64.6 g éq CO₂/voy.km pour le train national et le Carbon Trust propose un facteur de 56.5 g éq CO₂/voy.km

Les valeurs sont donc relativement plus élevées dans les méthodes du Royaume-Uni, ce qui peut à nouveau s'expliquer par la différence entre les facteurs d'émissions de production d'électricité.

¹⁴⁹ Note rapide sur les transports, IAURIF, 2005

Nous proposons donc de repartir des valeurs du bilan carbone et d'y ajouter les émissions liées à la maintenance et au fonctionnement des gares. Les facteurs d'émissions liés à la traction sera par ailleurs adapté pour tenir compte de l'évolution du facteur d'émissions de l'énergie électrique. Ainsi les facteurs d'émissions retenus sont :

| Type de train \ année | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| TER (g éqCO ₂ /voy.km) | 64.5 | 62.6 | 60.7 | 49.6 | 48.3 | 47.1 | 45.8 | 44.6 | 43.3 | 42.1 |
| TRN (g éqCO ₂ /voy.km) | 35.6 | 34.6 | 33.6 | 27.4 | 26.7 | 26.0 | 25.3 | 24.6 | 24.0 | 23.3 |
| TGV (g éqCO ₂ /voy.km) | 23.8 | 23.1 | 22.4 | 18.3 | 17.8 | 17.4 | 16.9 | 16.5 | 16.0 | 15.5 |

Tableau 72 : Facteurs d'émissions d'utilisation des trains (TER, TRN et TGV).

3.7 Développement territorial

Le rapport de Phase 1 partie 2 a déjà listé et décrit les différents facteurs d'émissions qu'il s'agit d'intégrer dans la feuille « développement territorial ». Dans un souci de clarification, ces 13 familles de facteurs d'émissions ont été numérotées de A à M. Le tableau qui suit reprend la liste des facteurs d'émissions préalablement présentés.

En anticipation de la seconde phase, le rapport de Phase 1 partie 2 a également proposé une façon de calculer ces facteurs d'émissions et de le faire évoluer dans le temps voire même, parfois, préconisé l'utilisation de différentes valeurs extraites d'études récentes en France ou à l'étranger.

La Phase 2 s'attache aujourd'hui à détailler davantage les méthodes de calculs effectuées et à lister les sources utilisées pour la détermination de chaque facteur d'émissions de l'onglet « développement territorial ».

Les calculs des différents facteurs d'émissions sont effectués dans une feuille masquée de l'outil : l'onglet *Calculs_FE_DT* (possibilité d'afficher l'onglet dans l'outil). La liste de l'ensemble des facteurs d'émissions est également reprise dans l'onglet *facteurs_emissions* dans le point « développement territorial ».

| Poste | | P1 | | | P2 | P2 | P3 |
|-------------------|--|---|------------------------|----------------------------------|---|--|---|
| | | Construction des bâtiments, des voiries et des réseaux divers | | | Exploitation des bâtiments | Exploitation des bâtiments | |
| Sous-Poste | | SP1.1 | SP1.2 | SP1.3 | SP2.1 | SP2.2 | Mobilité des individus influencée par les formes urbaines |
| Valeur de passage | | Chantier des bâtiments | Coûts de viabilisation | Changement d'occupation des sols | Consommation de chauffage des bâtiments | Coûts d'exploitation des services publics (déplacements + maintenance) | |
| VP I | Variation des surfaces résidentielles neuves entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE A | | | | | |
| VP II | Variation des surfaces tertiaires neuves entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE B | | | | | |
| VP III | Variation des surfaces résidentielles rénovées entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE C | | | | | |
| VP IV | Variation des surfaces tertiaires rénovées entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE D | | | | | |
| VP V | Variation des surfaces détruites entre un scénario avec projet et un scénario de référence | FE E | | | | | |
| VP VI | Pourcentage supplémentaire d'immeubles collectifs construits en scénario avec projet par rapport au scénario de référence | FE F | | | | | |
| VP VII | Parc résidentiel par période de construction en 2035 dans un scénario avec projet et un scénario de référence | | | | FC I | | |
| VP VIII | Parc tertiaire par période de construction en 2035 dans un scénario avec projet et un scénario de référence | | | | FC J | | |
| VP IX | Variation des surfaces rurales consommées pour l'urbanisation en extension entre un scénario avec projet et un scénario de référence | | | FE G | | | |
| VP X | Variation de la densité humaine nette sur la zone d'étude entre un scénario avec projet et un scénario de référence | | | | | | |
| VP XI | Variation de la longueur de VAD construite pour les surfaces neuves entre un scénario avec projet et un scénario de référence | | FE H | | | FE K | |
| VP XII | Variation de la mixité fonctionnelle nette sur la zone d'étude entre un scénario avec projet et un scénario de référence | | | | | | FE M |

P1 = Poste d'émissions de CO₂ relatif au développement territorial n°1
SP1.1 = Sous-poste n°1 relatif au Poste d'Émissions n°1 d'émissions de CO₂
VP I = Valeur de passage n°, valeur de l'input pour l'année de calcul considérée, prise en compte pour le calcul des émissions du poste en question
FE A = Facteur d'Emission relatif à l'influence de la Valeur de Passage concernée sur le poste d'émissions de CO₂ donné n°A
 Valeur de passage non prise en compte dans le calcul des émissions du poste considéré (pas d'influence ou influence faible)

Remarque : pour rappel, les « valeurs de passage » sont des variables calculées par l'outil pour toutes les années comprises entre 2005 et 2050 sur base des données d'entrée (« inputs ») encodées par l'utilisateur. Multipliées par les facteurs d'émissions, elles permettent de calculer les émissions de CO₂ générées pour chaque sous-poste, et poste d'émissions.

3.7.1 La construction des bâtiments résidentiels et tertiaires

| Numérotation | Description |
|--------------|--|
| FE A | émissions de CO ₂ créées par la construction d'un m ² SHON de logement individuel (dont production, transport sur le chantier et mise en œuvre des différents produits composant le bâtiment) |
| FE B | émissions de CO ₂ créées par la construction d'un m ² SHON de bâtiment tertiaire (bureaux, commerce) (dont production, transport sur le chantier et mise en œuvre des différents produits composant le bâtiment) |
| FE F | émissions de CO ₂ créées par la construction d'un m ² SHON de logement collectif (dont production, transport sur le chantier et mise en œuvre des différents produits composant le bâtiment) |

La définition des facteurs d'émissions relatifs à la construction des surfaces résidentielles (FE A, FE F) ou tertiaires (FE B) se base tout d'abord sur les facteurs d'émissions définis par l'ADEME dans son guide méthodologique pour le bilan carbone des bâtiments¹⁵⁰ et repris dans le Tableau 74 ci-dessous. Ces facteurs d'émissions génériques correspondent à des ratios extraits de plusieurs retours d'expérience regroupés par typologie d'ouvrage et par solution constructive fréquemment mise en œuvre en France. Ces facteurs d'émissions couvrent les phases de production, de transport sur le chantier et de mise en œuvre des matériaux. Ils font appel aux facteurs d'émissions des différents matériaux mis en œuvre lors de la construction, notamment pour la structure et l'enveloppe, le partitionnement et le revêtement de sol. Les facteurs d'émissions intermédiaires de chacun de ces matériaux sont repris en annexe du guide méthodologique de l'ADEME¹⁵¹.

Tableau 73 : Rappel des facteurs d'émissions utilisés dans la feuille de calcul « développement territorial », postes d'émissions et valeur de passage associés (Source : Stratec, Rapport de phase 1 partie 2, 2011)

¹⁵⁰ Bilan Carbone appliqué au bâtiment, Guide Méthodologique, ADEME, CSTB, 2010
¹⁵¹ Bilan Carbone appliqué au bâtiment, Guide Méthodologique, ADEME, CSTB, 2010, page 53

| Type de bâtiment | | FE générique moyen (en kq eq. CO ₂ /m ² SHON) Incertitude relative calculée par l'ADEME (en %) | | | | | | |
|------------------|-------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| | | Solution constructive | | | | | | |
| | | Structure ossature bois | Structure béton voile porteur | Structure monomur terre cuite | Structure brique | Structure mixte bois&béton | Structure acier (façade acier) | Structure mixte béton&acier |
| Résidentiel | Maison individuelle | 107 (25%) | 170 (50%) | 180 (15%) | 150 (15%) | | | |
| | Logement collectif | | 205 (25%) | 270 (35%) | | | | 210 (15%) |
| Tertiaire | Bâtiment bureau administratif | | 220 (25%) | | | | | 300 (50%) |
| | Commerce | | | | | | 190 (15%) | |

Tableau 74 : kg équivalent CO₂ par m² SHON construit selon la typologie du bâtiment et les matériaux utilisés pour sa construction (Source : Facteurs d'émissions bâtiment génériques extraits de Bilan Carbone appliqué au bâtiment, Guide Méthodologique, ADEME, CSTB, 2010). Remarque : les bâtiments génériques modélisés sont conformes aux standards de l'ancienne RT 2010, à savoir une consommation par unité de surface de l'ordre de 150 kWh/m²/an

Compte tenu du fait qu'il est difficile pour l'utilisateur de renseigner précisément la nature des matériaux mis en œuvre pour l'ensemble des nouveaux bâtiments d'ici à 2035, une approche plus globale « par les surfaces » a été adoptée. Elle consiste en l'utilisation d'un facteur d'émission unique pour chaque typologie de bâtiment (résidentiel individuel, résidentiel collectif ou tertiaire), dépendant uniquement de la quantité de surfaces à construire. Pour ce faire, la valeur des facteurs d'émissions A, B et F est calculée en se basant sur les pourcentages moyens des différents matériaux que l'on retrouve actuellement dans les structures des logements et des bâtiments tertiaires. Ces pourcentages permettent ainsi de calculer une valeur actuelle pondérée du facteur d'émissions.

Pour le logement individuel, les pourcentages suivants ont été retenus¹⁵² : 5% de part de marché pour l'ossature bois, 75% pour la structure en béton, 8% pour le monomur en terre cuite et 12% pour la brique. Le FE A ainsi obtenu est égal à 165,3 kq eq.CO₂/m² SHON (incertitude relative recalculée : 42%).

Pour le logement collectif, le même ratio béton/monomur en terre cuite a été utilisé, faute de données détaillées sur le sujet. Le FE F ainsi obtenu est égal à 213,5 kq eq.CO₂/m² SHON (incertitude relative recalculée : 21%). Cela signifie qu'à l'heure actuelle la construction d'1m² de logements collectifs génère, en moyenne, 29% d'émissions de CO₂ de plus que la construction d'1m² de logement individuel.

Enfin, en ce qui concerne les bureaux, il n'existe pas d'information précise sur les parts de marché du béton et de l'acier dans la construction. Par souci de précaution, le facteur d'émission le plus important est retenu, à savoir 300 kq eq.CO₂/m² SHON (Cf Tableau 74). Ce facteur d'émission a été agrégé à celui des surfaces commerciales (190 kq eq.CO₂/m² SHON), compte tenu de la part que les bureaux et les commerces représentent dans les m² SHON franciliens¹⁵³. Un FE B de 286,0 kq eq.CO₂/m² SHON a ainsi été obtenu (incertitude relative recalculée : 45%).

Par ailleurs, les objectifs quantifiés de réduction des consommations énergétiques et des émissions de GES des bâtiments résidentiels et tertiaires neufs ont été fixés dans la loi de

programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'Environnement publiée en août 2009. Deux dates clefs sont à retenir :

- 2012 : les nouveaux bâtiments doivent respecter a minima la norme basse consommation, c'est-à-dire une consommation d'énergie primaire par usage inférieure ou égale à 50 kWh/m²/an ;
- 2020 : bâtiments à énergie positive : une maison, un immeuble devra produire plus d'énergie qu'il n'en consomme (bilan moyen de l'ordre de -50kWh/m²/an).

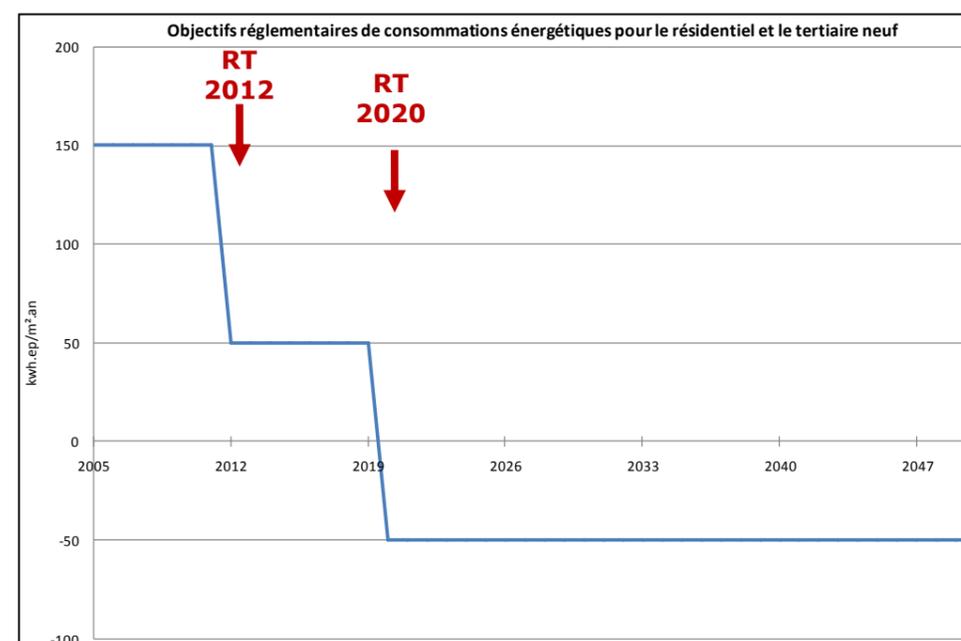


Figure 104 : Objectifs de consommations énergétiques annuelles par m² de résidentiel et de tertiaire neuf, en énergie primaire (kWhEP), selon l'évolution de la Réglementation Thermique en France d'ici à 2050 (Source : Stratec (2012) d'après Bilan Carbone appliqué au bâtiment, Guide Méthodologique, ADEME, CSTB, 2010). Remarques : « RT » : Réglementation Thermique – La RT 2012 est applicable dès 2012 pour le tertiaire et entrera en vigueur en janvier 2013 pour le logement – Il est fait l'hypothèse que la RT2020 sera applicable dès janvier 2020 pour le tertiaire et le résidentiel.

Pour tenir compte de l'augmentation des émissions de CO₂ de la construction en parallèle du renforcement des objectifs de la RT¹⁵⁴, les évolutions annuelles des facteurs d'émissions A, B et F suivent une courbe croissante par palier¹⁵⁵. La construction de ces courbes se base sur les modélisations réalisées dans le cadre du projet européen REGENER¹⁵⁶ (logiciel EQUER). Cette étude d'analyse du cycle de vie du bâtiment a notamment calculé les émissions de CO₂ créées par la construction d'un logement typique francilien (standards RT 2005) et d'une maison passive (6kWh/m².an pour le chauffage) et, ce, à superficie et géométrie équivalentes. Les chiffres extraits de cette étude et utilisés pour le calcul des valeurs annuelles FE A, FE B et FE F sont repris à la Figure 105 (page 120). Ils sont synthétisés dans le Tableau 75 associé.

¹⁵⁴ Davantage de matériaux et/ou des matériaux plus performants seront nécessaires pour respecter des normes de plus en plus restrictives

¹⁵⁵ Il est fait l'hypothèse qu'aucun progrès en termes d'émissions de CO₂ ne sera apporté aux techniques de construction du bâtiment d'ici 2035.

¹⁵⁶ Voir notamment Peuportier, B., Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context, Energy and Building, 2001

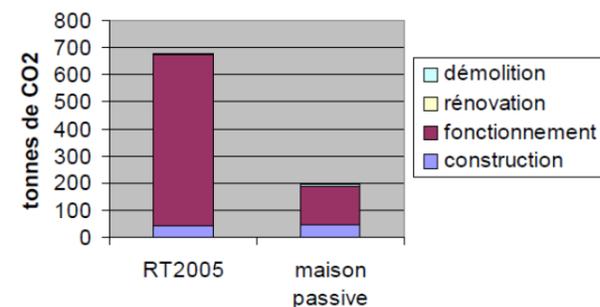


Figure 105 : Comparaison des émissions de CO₂ sur une durée de 80 ans par poste entre une maison d'Ile-de-France respectant les normes standards (Réglementation Thermique 2005) et une maison passive (Source : Projet européen REGENER, Analyse de cycle de vie des bâtiments, B. PEUPORTIER, Ecole des Mines de Paris, 1995-1996)

| Maison modélisée | Consommation moyenne annuelle de chauffage (kWh/m ² /an) | Emissions de CO ₂ liées à la construction par unité de surface (kg CO ₂ /m ²) | Variation par rapport à la référence par unité de surface (%) |
|--------------------|---|---|---|
| « RT 2005 » | 75 | 163,0 | |
| « maison passive » | 6 | 177,8 | 9,1% |

Tableau 75 : Données chiffrées relatives aux deux typologies de logements modélisés dans l'étude REGENER (Source : Stratec, 2011, d'après Projet européen REGENER, Analyse de cycle de vie des bâtiments, B. PEUPORTIER, Ecole des Mines de Paris, 1995-1996)

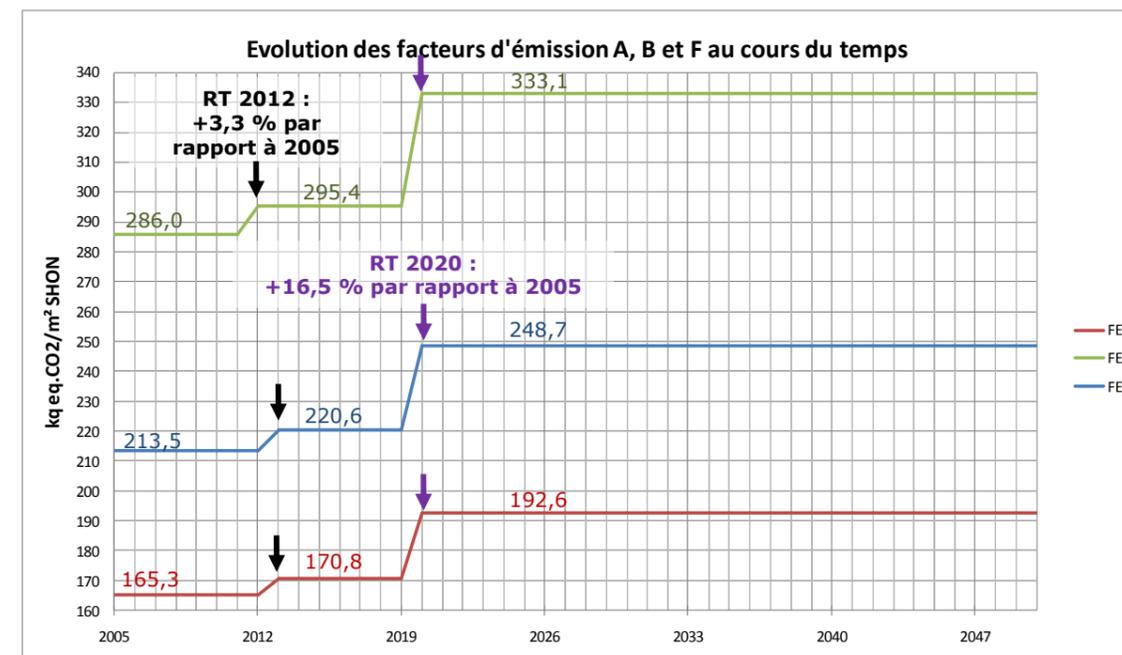


Figure 106 : Evolution des facteurs d'émissions A, B et F au cours du temps (Source : Stratec, 2012, sur base de Bilan Carbone appliqué au bâtiment, Guide Méthodologique, ADEME, CSTB, 2010 et Peuportier, B., Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context, Energy and Building, 2001). Incertitudes relatives: FE A : 42% ; FE F : 21% ; FE B : 45%.

Les hypothèses utilisées pour le calcul de l'évolution du FE A, du FE B et du FE F sont les suivantes :

- La valeur initiale des facteurs d'émissions A, B et F pour les années comprises entre 2005 et 2012 (ou 2013 pour le résidentiel) est celle définie à la page 119, respectivement 165,3 kq eq.CO₂/m² SHON, 286,0 kq eq.CO₂/m² SHON et 213,5 kq eq.CO₂/m² SHON ;
- L'augmentation du FE A de 9.1% entre 6kWh/m²/an et 75kWh/m²/an (Cf. Tableau 75) a été extrapolée linéairement en fonction de la consommation cible par m² de plancher. Cette évolution a été appliquée de manière similaire au FE B et au FE F ;
- La valeur du facteur d'émission a été calculée pour les périodes 2012(ou 2013)-2020 et 2020-2050 selon l'objectif de kWh/m²/an fixé par la norme RT en vigueur et, ce, à partir de l'objectif de consommation actuel.

Les valeurs annuelles des facteurs d'émissions A, B et F ainsi calculées sont reprises dans la figure suivante.

Pour rappel, le FE A représente les émissions de CO₂ créées par la construction d'un m² SHON de logement individuel. FE F représente les émissions de CO₂ créées par la construction d'un m² SHON de logement collectif. FE B représente les émissions de CO₂ créées par la construction d'un m² SHON 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).

Remarque : dans la présente étude, il est fait l'hypothèse qu'entre 2035 et 2050, les mouvements du parc bâti n'auront plus un lien de cause à effet avec le projet de réseau de transport public du Grand Paris. Les mouvements du parc bâti après 2035 ne sont donc pas intégrés dans le calcul des émissions de CO₂ induites par le projet.

3.7.2 La démolition des bâtiments résidentiels et tertiaires

| Numérotation | Description |
|--------------|---|
| FE E | émissions de CO ₂ créées par la démolition d'un m ² SHON de logement ou de bâtiment tertiaire (y compris transport et évacuation des déchets de cette destruction). |

Etant donné que le processus de démolition est un processus difficile à évaluer d'un point de vue émissions de CO₂ (difficulté d'assumer une augmentation de l'efficacité du processus de démolition et de réutilisation des matériaux dans les années à venir¹⁵⁷), peu d'études sur le sujet

¹⁵⁷ Source : The influence of construction materials on life-cycle energy use and carbon dioxide emissions of medium size commercial buildings, N.P.Fernandez, July 2008

sont disponibles dans la littérature. Deux études japonaises relatives au résidentiel¹⁵⁸ et au tertiaire¹⁵⁹ soulignent cependant le fait que les émissions de CO₂ issues de la destruction d'un bâtiment représentent une part relativement faible par rapport à celles liées à sa construction. D'après ces études, les émissions de CO₂ liées à la démolition d'un m² de surface résidentiel ou tertiaire représentent entre 5 et 7% (selon le type de matériaux utilisés) des émissions liées à la construction.

Comme les émissions de la destruction représentent une proportion faible de l'ensemble des émissions de CO₂ du bâtiment sur toute sa durée de vie, une valeur commune a été utilisée, d'une part, pour les surfaces résidentielles et tertiaires détruites. Par mesure de précaution, les valeurs maximales des variables ont été utilisées pour calculer cette valeur. Celle-ci est égale à 7% des émissions actuelles de construction d'un m² tertiaire (Cf. point 3.7.1), c'est-à-dire 7% de 286,0 kg eq.CO₂/m² SHON, soit 20,0 kg eq.CO₂/m² SHON. D'autre part, étant donné le taux d'incertitude élevé sur l'évolution de cette valeur au cours du temps, celle-ci a été considérée constante quelques soient les années. En d'autres termes, il a été supposé qu'aucune amélioration du processus de démolition ne sera effectuée d'ici à l'horizon 2050.

Remarque : dans la présente étude, il est fait l'hypothèse qu'entre 2035 et 2050, les mouvements du parc bâti n'auront plus un lien de cause à effet avec le projet de réseau de transport public du Grand Paris. Les mouvements du parc bâti après 2035 ne sont donc pas intégrés dans le calcul des émissions de CO₂ induites par le projet.

3.7.3 La rénovation des bâtiments résidentiels et tertiaires

| Numérotation | Description |
|--------------|--|
| FE C | émissions de CO ₂ créées par la rénovation d'un m ² SHON de logement |
| FE D | émissions de CO ₂ créées par la rénovation d'un m ² SHON de bâtiment tertiaire (bureaux, commerce) |

La définition de la valeur actuelle des facteurs d'émissions FE C et FE D se base premièrement sur les résultats du projet RAPPE (Rénovation Architecturale Patrimoniale et Performance Energétique)¹⁶⁰. A l'aide du logiciel CO²CON¹⁶¹, cette étude a consisté en une analyse comparative de différentes solutions constructives visant l'amélioration énergétique de logements (objectif : 50kWh/m²/an) et de leurs émissions de CO₂ en phases construction et exploitation. Les résultats du projet RAPPE soulignent notamment qu'en phase construction une opération de réhabilitation standard émet environ 30% de CO₂ en moins qu'une opération de démolition/reconstruction conventionnelle (Cf. Figure 107 ci-dessous).

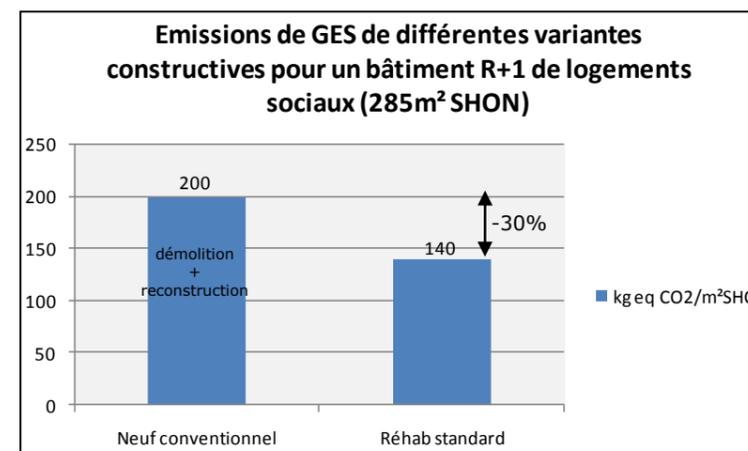


Figure 107 : Emissions de GES à la construction (en kg eq.CO₂/m² SHON) de différentes variantes constructives pour un bâtiment R+1 de logements sociaux (Source : Stratec, 2012, d'après les résultats du projet RAPPE (Rénovation Architecturale Patrimoniale et Performance Energétique), SA HLM des CHALETS Toulouse, LRA-GRECAU, L. Floissac, logiciel CO²CON, 2008)

Détails des bâtiments modélisés (configurations géométriques identiques) :

- "Neuf conventionnel" : fondation en béton, parpaing, laine V, plaque de plâtre, planchers béton, tuiles, menuiserie en PVC
- "Réhab standard" : soubassement pur, laine de verre, plaque de plâtre, planchers béton, tuiles, menuiserie en PVC¹⁶²

En considérant que l'opération de démolition soit responsable de 7% des émissions de CO₂ du processus « démolition/reconstruction » (Cf. point 3.7.2, page 120), nous retenons une différence de 23% entre les émissions de CO₂ d'une opération de réhabilitation et celle d'une construction neuve (Cf. Figure 107 ci-dessus) visant un objectif de 50kWh/m²/an. Par hypothèse, ce ratio a été utilisé pour le résidentiel et le tertiaire. Il a ainsi été appliqué aux valeurs de FE A et FE B correspondante afin de déterminer les valeurs respectives de FE C et de FE D. Les calculs sont détaillés ci-dessous :

$$FE C_{(50kWh/m^2/an)} = FE C_{(2050)} = 0.77 * FE A_{(50kWh/m^2/an)} = 0.77 * FE A_{(2013)} = 0.77 * 170,8 = 131,5 \text{ kg eq.CO}_2/\text{m}^2 \text{ SHON}$$

$$FE D_{(50kWh/m^2/an)} = FE D_{(2050)} = 0.77 * FE B_{(50kWh/m^2/an)} = 0.77 * FE B_{(2012)} = 0.77 * 295,4 = 227,5 \text{ kg eq.CO}_2/\text{m}^2 \text{ SHON}$$

Deuxièmement, les hypothèses utilisées pour le calcul des valeurs du FE C et du FE D dans les années futures sont similaires à celles de FE A, FE B et FE D (pour plus détails, Cf. page 120). Les valeurs annuelles de FE C et FE D suivent également une courbe d'évolution croissante par palier, en lien avec la mise en œuvre progressive des objectifs de la loi Grenelle 1 spécifiques aux bâtiments existants. Les objectifs Grenelle 1 sont schématisés à la Figure 108. Quant aux valeurs annuelles de FE C et FE D qui en découlent, elles sont reprises sur le graphique de la Figure 109 (page 122).

¹⁵⁸ Life cycle CO₂ emission reduction predictions for japan's housing sector towards 2030, M. DEJIMA, Graduate school of engineering, Utsunomiya University, Japan

¹⁵⁹ 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

¹⁶⁰ RAPPE (Rénovation Architecturale Patrimoniale et Performance Energétique), SA HLM des CHALETS Toulouse, LRA-GRECAU, L. Floissac, logiciel CO²CON, 2008

¹⁶¹ Développé par ECOSPHERE, plus d'informations sur <http://www.eosphere.fr/COCON-comparaison-solutions-constructives-confort.html>

¹⁶² Pour plus de détails, voir notamment : http://www.arpe-mip.com/html/files/COLLOQUE_LOGEMENT_SOCIAL_2010/COMPTE_RENDU_SA_Chalets_RAPPE.pdf

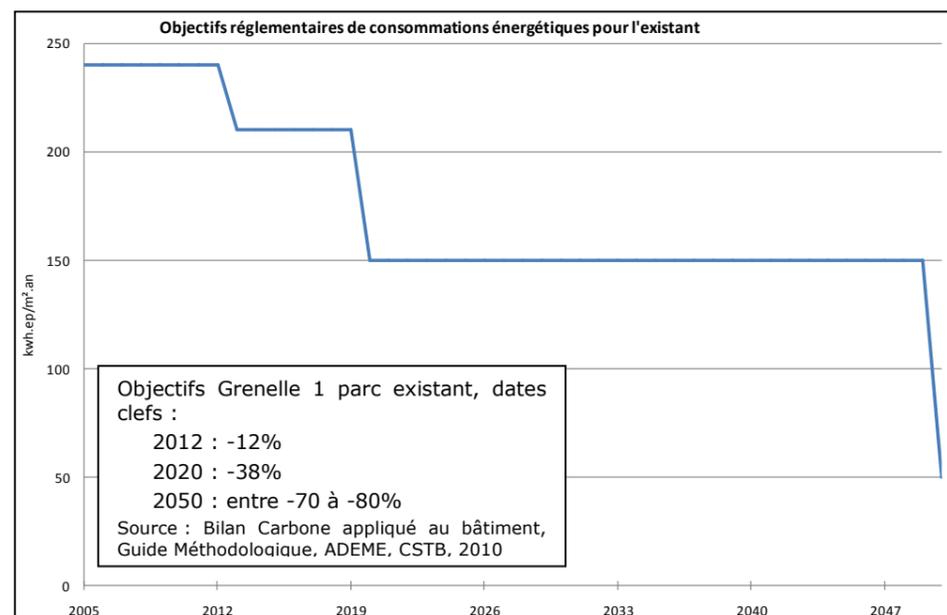


Figure 108 : Objectifs de consommations énergétiques annuelles par m² de résidentiel et de tertiaire existant, en énergie primaire (kWhEP), selon l'évolution de la Réglementation Thermique en France d'ici à 2050 (Source : Stratec (2012) d'après Bilan Carbone appliqué au bâtiment, Guide Méthodologique, ADEME, CSTB, 2010)

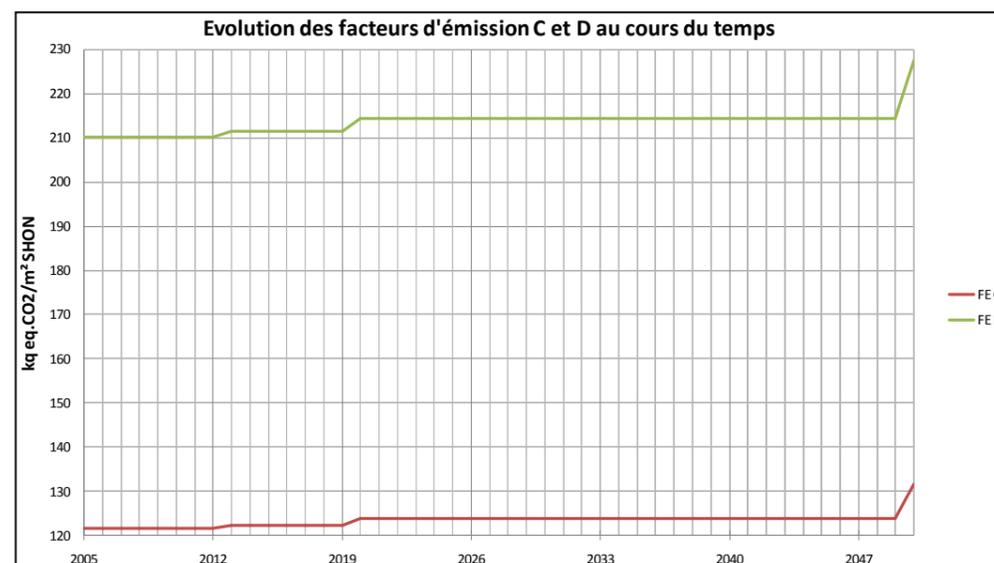


Figure 109 : Evolution des facteurs d'émissions C et D au cours du temps (Source : Stratec, 2012, sur base des résultats du projet RAPPE (Rénovation Architecturale Patrimoniale et Performance Energétique), SA HLM des CHALETS Toulouse, LRA-GRECAU, L. Floissac, logiciel CO²CON, 2008). Incertitudes relatives : 50%

Pour rappel, le FE C et le FE D représentent les émissions de CO₂ créées respectivement par la rénovation d'un m² SHON de logement et d'un m² SHON de tertiaire.

Remarque : dans la présente étude, il est fait l'hypothèse qu'entre 2035 et 2050, les mouvements du parc bâti n'auront plus un lien de cause à effet avec le projet de réseau de transport public du Grand Paris. Les mouvements du parc bâti après 2035 ne sont donc pas intégrés dans le calcul des émissions de CO₂ induites par le projet.

3.7.4 Le changement d'affectation des espaces ruraux

| Numérotation | Description |
|--------------|--|
| FE G | émissions de CO ₂ créées par le déstockage de la matière organique contenue dans le sol et la végétation d'un hectare urbanisé d'une part et, d'autre part, par les émissions des années suivant cette urbanisation qui ne pourront être évités grâce à l'utilisation de ces surfaces pour produire de l'énergie renouvelable |

FE G permet, à partir de la différence annuelle d'hectares ruraux consommés par l'urbanisation entre un scénario avec et un scénario sans projet, de calculer les teq CO₂ résultantes de ces évolutions de changement d'occupation des sols.

Pour l'année *n* d'urbanisation du terrain, le facteur FE G(*n*) est appliqué. Celui-ci correspond à la quantité de CO₂ libérée suite au déstockage de la matière organique contenue dans le sol et la végétation de l'hectare d'espace rural qui est urbanisé. Pour la détermination de FE G(*n*), les chiffres publiés par le GIEC ont été utilisés. Ceux-ci sont repris dans la Figure 110.

Contenu en carbone des forêts par hectare

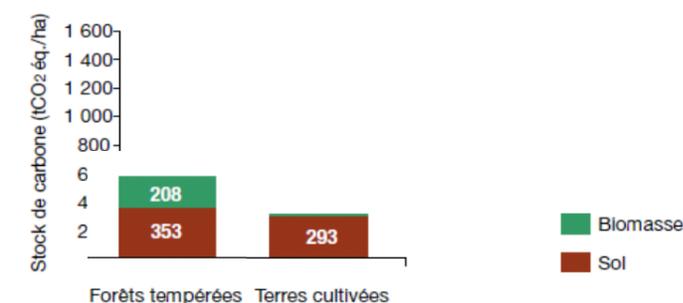


Figure 110 : Stocks de carbone contenus dans la biomasse et le sol selon le type d'occupation du territoire (Source : GIEC, 2000)

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 bio combustibles). C'est pourquoi le facteur d'émission FE G(*n*+) est utilisé pour les années *n*+1, *n*+2, etc. Ce facteur prend en compte :

1. L'utilisation des forêts pour la production d'énergie renouvelable

Le remplacement de surfaces boisées par des surfaces urbanisées supprime l'utilisation potentielle de ces forêts pour la production de matières combustibles (bûches, plaquettes, etc.). La forêt s'apparente, en effet, à une usine écologique de production d'énergie renouvelable qui, non seulement, immobilise une quantité de carbone mais produit également continuellement de la biomasse pouvant être exportée pour la production de chaleur par combustion.

La quantité de matière combustibles exportées annuellement par hectare de forêt est très variable en fonction de l'espèce et du type de matières extraites pour être utilisées comme combustible (bûches, plaquettes, etc.). D'après l'Inventaire Forestier National, la production de bois est globalement pour la France de 5.3 m³/ha, ce qui correspond approximativement à 4.4 tonnes/ha/an (poids humide). Mais les nouveaux systèmes de production dédiés spécifiquement à la production de biomasse peuvent produire jusque 10 à 20 tonnes de matières sèches/ha/an.

Il est considéré ici que la production d'un hectare de forêt produira en moyenne 5 tonnes de matières humides (40% humidité) par ha et par an. Cette valeur assez faible correspond à un système de production non intensif car il est peu probable que toutes les surfaces en question soient converties en cultures intensives. Le contenu énergétique de ces matières est évalué à 2.8 MWh/tonne¹⁶³. Un hectare de forêt permet donc la production de 14 MWh/ha/an.

Les chaudières à plaquettes ou à granulés étant en expansion continue et leur rendement étant similaire (de 75 à 90%¹⁶⁴) à ceux des chaudières traditionnelles, il est considéré que la quantité d'énergie utile obtenue à partir du bois-énergie sera similaire à celle provenant d'une quantité de gaz de contenu énergétique égal.

En posant l'hypothèse que cette énergie non produite en cas d'urbanisation des surfaces forestières serait remplacée par l'électricité, le gaz naturel et le mazout en proportions similaires à celles de la répartition actuelle entre ces énergies pour le chauffage des habitations (approximativement 16% mazout, 51% gaz, 33% électricité), on obtient alors un total de 2,58 tonnes éq CO₂ évitées. Il ne faut pas oublier de déduire de ces émissions évitées les émissions nécessaires à la transformation et au transport du bois-énergie qui s'élèvent à 204 kg éq CO₂ (calculé à partir du facteur d'émissions 14,6kg éq CO₂ / MWh¹⁶⁵).

Au final, on obtient donc 2.38 tonnes éq CO₂ évités par hectare et par an grâce à la non suppression de surfaces forestières.

2. L'utilisation des surfaces agricoles pour la production de biocarburants

La production de biocarburants est limitée par les surfaces agricoles disponibles pour leur culture. Il est considéré que toutes les surfaces préalablement agricoles qui seront transformées en surfaces urbanisées représentent une diminution des quantités de biocarburants pouvant être produits.

Pour calculer les émissions qui ne pourront être évitées, les quantités de biocarburants qui auraient pu être produites par hectare de surface doivent être analysées pour, ensuite, calculer les émissions évitées en utilisant ces biocarburants plutôt que des carburants fossiles.

Selon l'ONIGG¹⁶⁶, les rendements pour une culture destinée aux biocarburants sont de 1,45 tonnes de biodiesel/ha/an et de 3,32 tonnes de bioéthanol/ha/an. Ceci est cohérent avec les valeurs présentées par l'ADEME et reprises dans le tableau ci-dessous :

| Culture pour biodiesel | t EMHV / ha ¹ | Proportion de la production (%) ² | T EMHV / ha moyen |
|-------------------------|--------------------------|--|----------------------|
| Colza | 1.32 | 87.5 | 1.28 |
| Tournesol | 0.96 | 12.5 | |
| Culture pour bioéthanol | T éthanol / ha | Proportion de la production (%) | T éthanol / ha moyen |
| Betterave | 5.76 | 35 | 3.58 |
| Blé | 2.25 | 51 | |
| Maïs | 2.992 | 14 | |

Tableau 76 : Rendements de la production de biocarburants par culture et en moyenne pour la France. Sources : ¹ Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France, ² Biocarburants 2010 : Quelles utilisations des terres en France, 2007, Office National Interprofessionnel des Grandes Cultures (ONIGG).

Sur base des valeurs du tableau, si l'on considère une répartition entre les cultures dédiées à la production de biodiesel et celles dédiées au bioéthanol similaire à celle de la France

¹⁶³ Guide des facteurs d'émissions v6.1, ADEME, 2010

¹⁶⁴ Le bois-énergie, ADEME, www.ademe.fr/midi-pyrenees/a_2_02.html

¹⁶⁵ Guide des facteurs d'émissions V6.1, ADEME, 2010

¹⁶⁶ Biocarburants 2010 : Quelles utilisations des terres en France, 2007, Office National Interprofessionnel des Grandes Cultures (ONIGG).

(respectivement 87% et 13% des surfaces), 1 hectare permet donc la production de 1.11 tonnes de biodiesel et 0.47 tonnes de bioéthanol par année de culture. On peut considérer par ailleurs que ces cultures ne peuvent représenter que deux tiers des utilisations de la rotation agricole (la troisième année pouvant être utilisée pour la jachère, par exemple) et donc qu'un hectare permettrait de produire en moyenne 0.74 tonne de biodiesel et 0.31 tonne de bioéthanol par an. Ceci correspond en équivalent énergétique à 0.58 tonne de diesel fossile et à 0.19 tonne d'essence fossile. En comptant, comme nous l'avons vu, que le biodiesel permet une réduction de 67.5% des émissions par rapport au diesel et le bioéthanol une réduction de 63.6% par rapport à l'essence, et en reprenant les émissions totales estimées pour l'utilisation de carburants (3.741 kg éq CO₂/kg essence et 3.471 kg éq CO₂/kg diesel), on obtient un total de 1.82 tonnes éq CO₂/ha/an d'émissions qui auraient pu être évitées.

3.7.5 Les opérations de viabilisation des zones urbanisées

| Numérotation | Description |
|--------------|---|
| FE H | émissions de CO ₂ générées par la construction des VRD pour un kilomètre linéaire de lotissement, nécessaire à l'extension des zones d'habitat et d'activité |

Le manuel d'utilisation de l'outil Bilan Carbone Territoire¹⁶⁷ préconise différents facteurs d'émissions relatifs à la construction des voiries et des parkings. Ces facteurs d'émissions sont fonction de la largeur et de la longueur des infrastructures routières, de la catégorie de voie ainsi que de la structure utilisée :

| Catégorie de voie ¹⁶⁸ | Structure de la voie routière | | |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------|----------|
| | ciment | semi rigide | bitumeux |
| TC1 | 85 | 40 | 15 |
| TC2 | 87 | 45 | 20 |
| TC3 | 92 | 45 | 25 |
| TC4 | 100 | 54 | 28 |
| TC5 | 105 | 57 | 32 |
| TC6 | 115 | 60 | 37 |
| TC7 | 125 | 65 | 40 |

Tableau 77 : kg éq C/m² voirie construite selon la catégorie de voirie et sa structure (Source : guide d'utilisation de l'outil Bilan Carbone Territoire, ADEME, juin 2010).

Dans la présente étude, un facteur commun à tous les types de route, fonction uniquement du kilométrage de voirie a été utilisé. Un profil « générique » de route a été retenu. Ce profil est 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 (TC2). Ainsi, d'après le Tableau 14, le facteur d'émission résultant est égal à 586 295,3 kg éq CO₂/km. Pour le calcul du facteur d'émissions associé à la construction des réseaux, nous nous sommes basés sur les hypothèses de la page suivante.

¹⁶⁷ ADEME, juin 2010

¹⁶⁸ Cf. nomenclature des travaux publics : « TC1 correspond à une voie prévue pour accueillir moins de 35 poids-lourds par jour (dans chaque sens), et TC7 à une voie prévue pour en accueillir de 2 500 à 5 000. Les parkings "normaux" (par exemple les parkings de grandes surfaces) sont construits comme des voies de classe TC2, et les parkings "intensifs" (par exemple les aires de stationnement sur autoroute) sont assimilables à des voies de classe TC3.» (Guide d'utilisation de l'outil Bilan Carbone Territoire, ADEME, 2010)

| Réseaux | Côté de la voirie ¹⁶⁹ | Matériau | Section par câble (mm ²) | Masse volumique (t/m ³) | Masse (kg/U) | Facteur d'émission (kgCO ₂ e/kg) | Facteur d'émissions (kg eqCO ₂ /km de voirie) |
|---|----------------------------------|----------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------|---|--|
| Electricité | 2 | 1 câble en aluminium | 150 | 2.7 | 0.4 | 6.1 | 4 880 ¹⁷⁰ |
| Evacuation et assainissement (eaux pluviales, eaux usées) | 2 | Canalisation PVC | | | | | 6 200 ¹⁷¹ |

Tableau 78 : Caractéristiques des matériaux mis en œuvre pour la construction des réseaux nécessaires à la viabilisation des terrains, par kilomètre de parcellaire, et émissions de CO₂ induites (Source : Stratec, 2012).
Remarque : faute de données spécifiques aux facteurs d'émissions des réseaux de gaz, de télécommunication et d'éclairage public, ceux-ci n'ont pas été considérés.

Soit un facteur d'émissions, pour un kilomètre de linéaire de lotissement, de 11 080 kg eq CO₂/km. Ces émissions représentent des coûts "primaires" et non la totalité des dépenses engendrées par les viabilisations puisque, généralement, il est nécessaire de développer de nouvelles infrastructures pour relier l'opération au réseau (charges secondaires).

Ainsi, si l'on considère l'ensemble des VRD à construire pour la viabilisation d'un kilomètre linéaire de parcellaire, on obtient un facteur d'émissions FE H de 597 375.3 kg eq CO₂/km. A noter que la construction de la voirie représente 98% de ces émissions.

En ce qui concerne l'estimation de l'amélioration des émissions créées par ces coûts de construction, nous utiliserons les mêmes taux que ceux de l'étude du Centre d'Analyse Stratégique¹⁷² qui considère une réduction de 0.3 à 0.45% par an de ces taux. Nous utiliserons les mêmes hypothèses que précédemment¹⁷³ et retiendrons une réduction de 0.3% par an du facteur d'émission FE H à partir de 2005, et donc une réduction de 13.5 % de FE H entre 2005 et 2050.

Remarque : dans la présente étude, il est fait l'hypothèse conservatrice qu'entre 2035 et 2050, les mouvements du parc bâti n'auront plus un lien de cause à effet avec le projet de réseau de transport public du Grand Paris. Les émissions des opérations de viabilisation des zones urbanisées après 2035 ne sont donc pas intégrées dans le calcul des émissions de CO₂ induites par le projet.

3.7.6 Les consommations de chauffage des bâtiments résidentiels et tertiaires

| Numérotation | Description |
|--------------|--|
| FE I | émissions de CO ₂ créées par le chauffage d'un m ² de logement durant une année, fonction de l'année de sa construction/rénovation |
| FE J | émissions de CO ₂ créées par le chauffage d'un m ² de bâtiment tertiaire durant une année, fonction de l'année de sa construction/rénovation |

¹⁶⁹ Extrait de 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

¹⁷⁰ Cf. chapitre construction de l'infrastructure

¹⁷¹ D'après les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) de la base de données INIES http://www.inies.fr/Upload/Prod387_doc1.pdf

¹⁷² Source : Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 : rapport de la commission Energie présidée par Jean Syrota, Centre d'Analyse Stratégique, 2007

¹⁷³ Cf chapitres précédents

Concrètement, l'utilisateur doit encoder la structure détaillée du parc bâti par affectation et par tranche d'âge dans un scénario de référence en 2005 et 2035 et les actions supplémentaires sur ce parc (construction/rénovation/démolition) dans un scénario avec projet (Cf. Figure 111). Ainsi, la structure détaillée du parc bâti avec et sans projet peut être définie pour chaque année entre 2005 et 2050.

—Input n°1-Structure détaillée du parc bâti dans le scénario de référence

| | Surfaces résidentielles | | | Surfaces tertiaires | | |
|--|-------------------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|
| | [2006-2013] | [2013-2020] | [2020-2035] | [2006-2012] | [2012-2020] | [2020-2035] |
| Construction (m ² SHON) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rénovation du parc (m ² SHON) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Démolition (m ² SHON) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Surfaces résidentielles | 2005 | 2035 |
|---------------------------------|------|------|
| Total m ² SHON | 50 | 50 |
| < 1949 m ² SHON | 10 | 10 |
| [1949-1974] m ² SHON | 10 | 10 |
| [1975-1981] m ² SHON | 10 | 10 |
| [1982-1998] m ² SHON | 10 | 10 |
| [1999-2005] m ² SHON | 10 | 10 |
| [2006-2013] m ² SHON | - | 0 |
| [2013-2020] m ² SHON | - | 0 |
| [2020-2035] m ² SHON | - | 0 |

| Surfaces tertiaires | 2005 | 2035 |
|---------------------------------|------------|------------|
| Total m ² SHON | 55 000 000 | 55 000 000 |
| Avant 2005 m ² SHON | 55 000 000 | 55 000 000 |
| [2006-2012] m ² SHON | - | 0 |
| [2012-2020] m ² SHON | - | 0 |
| [2020-2035] m ² SHON | - | 0 |

—Input n°2-Actions sur le parc bâti dans le scénario avec projet par rapport à l'évolution du parc bâti dans le scénario de référence

Surfaces supplémentaires entre le scénario avec projet et le scénario de référence...

| Surface résidentielles | | [2006-2013] | [2013-2020] | [2020-2035] |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | | |
| construit (m ² SHON) | rénovées (m ² SHON) | 0 | 0 | 0 |
| | démolies (m ² SHON) | 0 | 0 | 0 |

| Surfaces tertiaires | | [2006-2012] | [2012-2020] | [2020-2035] |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | | |
| construit (m ² SHON) | rénovées (m ² SHON) | 0 | 0 | 0 |
| | démolies (m ² SHON) | 0 | 0 | 0 |

-> Voici la structure détaillée du parc bâti dans le scénario avec projet selon les hypothèses définies ci-dessus :

| Surfaces résidentielles | 2005 | 2035 |
|---------------------------------|------|------|
| Total m ² SHON | 50 | 50 |
| < 1949 m ² SHON | 10 | 10 |
| [1949-1974] m ² SHON | 10 | 10 |
| [1975-1981] m ² SHON | 10 | 10 |
| [1982-1998] m ² SHON | 10 | 10 |
| [1999-2005] m ² SHON | 10 | 10 |
| [2006-2013] m ² SHON | - | 0 |
| [2013-2020] m ² SHON | - | 0 |
| [2020-2035] m ² SHON | - | 0 |

| Surfaces tertiaires | 2005 | 2035 |
|---------------------------------|------|------|
| Total m ² SHON | 0 | 0 |
| Avant 2005 m ² SHON | 0 | 0 |
| [2006-2012] m ² SHON | - | 0 |
| [2012-2020] m ² SHON | - | 0 |
| [2020-2035] m ² SHON | - | 0 |

Figure 111 : Aperçu de la feuille de calcul « développement territorial » : inputs spécifiques à la structure détaillée du parc bâti pour l'année de calcul considérée (Source : Stratec, 2012)

FE I permet de convertir les m² résidentiels, définis année après année par tranche d'âge, en teq CO₂ émises pour le chauffage annuel de ces logements. FE J permet de convertir les m² tertiaires, définis pour l'année de calcul par tranche d'âge, en teq CO₂ émises pour le chauffage annuel de ces bureaux, commerces, etc. FE I et FE J permettent ainsi de calculer les émissions annuelles de CO₂ pour l'ensemble du parc bâti dans un scénario avec projet, d'une part, et, d'autre part, dans un scénario de référence. La différence entre ces deux consommations représente l'impact induit du projet sur la consommation de chauffage du parc bâti pour une année donnée.

Remarque : dans la présente étude, il est fait l'hypothèse qu'entre 2035 et 2050, les mouvements du parc bâti n'auront plus un lien de cause à effet avec le projet de réseau de transport public du Grand Paris. Les mouvements du parc bâti après 2035 ne sont donc pas intégrés dans le calcul des émissions de CO₂ induites par le projet. Par contre, les gains énergétiques induits par l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments construits ou rénovés avant 2035 sont comptabilisés jusqu'à 2050.

Les valeurs de FE I et de FE J varient selon :

- l'âge des surfaces résidentielles ou tertiaires ;
- le mode de construction des surfaces : si ce sont des surfaces déjà existantes, si elles ont été construites ou plutôt rénovées, et quand elles l'ont été ;
Ces deux critères vont définir le nombre de kWh/m² annuels consommés en énergie de chauffage, constants entre l'année de construction/rénovation du bâtiment jusqu'à sa fin de vie.
- l'année de calcul : elle va influencer le nombre de kg eq CO₂ émis par chaque kWh consommé, selon le mix énergétique du moment et le contenu CO₂ de chaque énergie de chauffage.

Concrètement, la définition de FE I et celle de FE J sont basées sur 3 hypothèses fortes :

1. L'évolution des consommations annuelles de chauffage pour le neuf et le réhabilité en parallèle des objectifs de la RT ;
2. L'évolution du mix énergétique pour le chauffage ;
3. L'évolution des facteurs d'émissions des énergies de chauffage (Cf. point 3.8 page 131).

Ces hypothèses sont décrites dans les pages suivantes.

3.7.6.1 Consommations annuelles de chauffage pour les logements existants

La définition des consommations annuelles de chauffage pour le parc résidentiel existant (i.e. avant 2005) ainsi que la répartition « individuel/collectif » pour le parc de logement existant s'appuient sur les résultats d'un travail de modélisation du parc francilien mené par Energies Demain pour le compte de l'IAURIF en 2010¹⁷⁴. Issus de l'utilisation d'un modèle discret construit sur une base de données détaillée du parc bâti francilien (informations thermiques, caractéristiques architecturales, mix énergétique pour le chauffage, etc.), les consommations résultantes sont ventilées par typologie (individuel/collectif) et par tranche d'âge. Ces consommations sont reprises dans le tableau qui suit.

¹⁷⁴ L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, 2010

| Tranche d'âge | Effectif (en % du nombre de résidences principales par tranche d'âge) | | Consommation moyenne annuelle du bâtiment pour le chauffage sur toute sa durée de vie (kWh/m ² /an) | | |
|---------------|--|--------------|--|--------------|--------------------------|
| | Maisons | Appartements | Maisons | Appartements | Pondération par effectif |
| <1949 | 27 | 73 | 243,67 | 187,4 | 202,85 |
| 1949-1974 | 22 | 78 | 211,53 | 174,23 | 182,29 |
| 1975-1981 | 34 | 66 | 118,6 | 81,26 | 93,88 |
| 1982-1998 | 40 | 60 | 108,06 | 75,96 | 88,81 |
| 1999-2005 | 33 | 67 | 100,9 | 60,12 | 73,76 |

Tableau 79 : Consommation moyenne annuelle des logements franciliens pour le chauffage selon la typologie de logement et la tranche d'âge (Source : Stratec, 2012, d'après les résultats d'ENERTER 2005 (Energie Demain)/INSEE in L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, PREBAT, 2010)

Les deux premières colonnes représentent, pour chaque tranche d'âge, le pourcentage de maisons (2ème colonne) et d'appartement (3ème colonne), en termes d'effectif, au sein de cette tranche d'âge en Ile-de-France.

La troisième et la quatrième colonne donnent les consommations moyennes annuelles de chauffage pour une maison et un appartement appartenant à chaque tranche d'âge considérée. Ce sont ces consommations qui ont été utilisées dans l'outil.

3.7.6.2 Evolution des consommations annuelles de chauffage des logements

Les consommations actuelles de chauffage en énergie primaire des logements construits récemment (période 1999-2005) sont extraites de l'étude de modélisation de l'IAURIF sur le parc de logements franciliens¹⁷⁵. Les valeurs moyennes extraites de cette étude sont ici discriminées par typologie de logement et par énergie de chauffage utilisée. Elles sont reprises dans le Tableau 80 :

| Typologie | Energie | Logements construits entre 1999 et 2005 |
|------------|------------------|---|
| | | Moyenne IDF (kWh ep/m ² /an) |
| Individuel | Gaz naturel | 111,2 |
| | Fioul | 114,7 |
| | GPL | 101,3 |
| | Electricité | 66,5 |
| | Bois | 211,9 |
| | Chauffage urbain | 0,0 |
| Collectif | Gaz naturel | 69,1 |
| | Fioul | 126,6 |
| | GPL | 99,7 |
| | Electricité | 36,0 |
| | Bois | 234,1 |
| | Chauffage urbain | 96,7 |
| | Charbon | 0,0 |

Tableau 80 : Estimations des consommations réelles de chauffage (en kWh/m²/an) des logements franciliens construits ou rénovés entre 1999 et 2005 par typologie et selon l'énergie de chauffage utilisée (Source : Stratec, 2012, d'après L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, 2010 (données 2005))

¹⁷⁵ Source : L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, 2010 (données 2005)

L'évolution des consommations de chauffage par unité de surface en énergie primaire est calée sur les normes $C_{ep\ max}$ de la réglementation thermique¹⁷⁶, c'est-à-dire :

- dès janvier 2013 : généralisation des logements à basse consommation (BBC) et limite de 210kWh/m²/an pour l'existant rénové ;
- puis, à l'horizon 2020, développement des bâtiments neufs BEPOS et limite maximale de 150kWh/m²/an pour le rénové.

Les hypothèses suivantes ont été fixées :

- La part du chauffage au sein de ces 5 postes de consommation évolue de la même manière que sur la période 2005-2009 (-0.6%/an¹⁷⁷) ;
- Les consommations actuelles de chauffage selon le type d'énergie utilisée évoluent toutes de la même manière : elles diminuent en accord avec les objectifs de la RT et proportionnellement à la part du chauffage au sein de ces 5 postes de consommation.

Ainsi, l'application de ces hypothèses conduit :

- En 2013 : à -69% de consommation de chauffage pour le neuf et -18% pour le rénové, par rapport à la consommation moyenne de 2005 ;
- En 2020 : à -100% de consommation de chauffage pour le neuf (hypothèse : consommation considérée comme nulle) et -45% pour le rénové.

et, ce, pour chaque énergie de chauffage considérée.

3.7.6.3 Evolution des consommations annuelles de chauffage des bâtiments tertiaires

Les consommations moyennes actuelles de chauffage pour les surfaces tertiaires, présentées au Tableau 81, sont extraites du guide des facteurs d'émissions de l'ADEME. Celui-ci propose une méthode d'estimation des consommations moyennes par m² chauffés selon la nature de l'activité exercée dans les locaux et l'énergie utilisée (3^{ème} colonne). Les valeurs extraites du guide de l'ADEME ont une incertitude associée de 30%. Par souci de simplification, une pondération de ces valeurs a été effectuée en tenant compte de la part des surfaces de chaque activité dans le parc immobilier tertiaire francilien (dernière colonne).

Il faut rappeler que du point de vue énergétique, le secteur du tertiaire est globalement méconnu et souffre d'un déficit de suivi statistique pour évaluer les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre associées¹⁷⁸. Ainsi, aucune valeur n'a été trouvée dans la littérature quant aux consommations moyennes de chauffage au GPL, au bois, au charbon et via le chauffage urbain. Par conséquent, c'est la valeur maximale de consommation par m² par énergie entre un logement individuel et un logement collectif construit entre 1999 et 2005 qui a été retenue (Cf. 4 dernières lignes du Tableau 80). L'incertitude sur ces valeurs est, par conséquent, beaucoup plus importante. Toutefois, comme nous le verrons, la part de ces trois énergies dans le mix énergétique du chauffage des surfaces tertiaires est très faible et tend à diminuer. Cette incertitude aura donc un impact faible sur les émissions de CO₂ du poste « consommation de chauffage ».

| Energie de chauffage | Affectation | Moyenne sur le parc français (kWh/m ² /an) | Moyenne pondérée par les surfaces en IDF (kWh/m ² /an) |
|-------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| Gaz naturel ¹ | Bureaux, moyennes toutes surfaces | 194,7 | 186,3 |
| | Commerces, toutes surfaces | 156,2 | |
| | Enseignement, tous niveaux | 118,8 | |
| | Santé, toutes activités | 147,4 | |
| Fioul ¹ | Bureaux, moyennes toutes surfaces | 272,8 | 264,8 |
| | Commerces, toutes surfaces | 216,7 | |
| | Enseignement, tous niveaux | 177,1 | |
| | Santé, toutes activités | 321,2 | |
| Electricité ¹ | Bureaux, moyennes toutes surfaces | 119,3 | 114,2 |
| | Commerces, toutes surfaces | 86,2 | |
| | Enseignement, tous niveaux | 84,7 | |
| | Santé, toutes activités | 113,4 | |
| GPL ² | ensemble tertiaire | 101,3 | |
| Bois ² | ensemble tertiaire | 234,1 | |
| Chauffage urbain ² | ensemble tertiaire | 96,7 | |
| Charbon ² | ensemble tertiaire | 237,7 | |

Sources :

1 : Guide des facteurs d'émissions, Bilan Carbone Entreprises et Collectivités, version 5.0, ADEME, janvier 2007 sur base des chiffres du CEREN, 1990-2003 sur base des données de l'Observatoire de l'Energie (2001) et du CEREN (1990, 2003)

Valeurs corrigées en fonction d'un coefficient de correction spécifique à la zone climatique H1
La consommation électrique moyenne était exprimée pour le chauffage et l'ECS. Elle a été recalculée (Stratec, 2012) pour le chauffage selon la part que ces postes représentent dans la consommation totale du tertiaire

2 : utilisation des valeurs maximum pour le résidentiel de la période 99-2005

Tableau 81 : Estimations des consommations réelles de chauffage (en kWh/m²/an) pour l'ensemble du parc de bâtiments tertiaires en Ile-de-France selon l'énergie de chauffage utilisée (Source : Stratec, 2012, sur base des sources précitées)

Comme pour le résidentiel (Cf. page 125), l'évolution de la consommation de chauffage par unité de surface tertiaire est calée sur les normes $C_{ep\ max}$ de la Réglementation Thermique¹⁷⁹. Les hypothèses suivantes ont été fixées :

- L'évolution de la part du chauffage dans le total des usages du tertiaire consommateurs d'énergie est basée les projections tendanciennes réalisées par le SES¹⁸⁰ en 2001. En 2005, cette part a été estimée à 48,6% puis, d'après cette étude, elle diminue progressivement (-0.3%/an) pour atteindre une valeur projetée de 44,3% en 2020.
- Les consommations actuelles de chauffage selon le type d'énergie utilisée évoluent toutes de la même manière : elles diminuent en accord avec les objectifs de la RT et proportionnellement à la part du chauffage au sein de ces 5 postes de consommation.

Ainsi, l'application de ces hypothèses conduit :

- En 2012 : à -78% de consommation de chauffage pour le neuf et -43% pour le rénové, par rapport à la consommation moyenne de 2005 ;
- En 2020 : à -100% de consommation de chauffage pour le neuf (consommation de chauffage considérée comme nulle) et -61% pour le rénové.

et, ce, pour chaque énergie de chauffage considérée.

¹⁷⁶ Ce $C_{ep\ max}$ comprend 5 postes de consommation : chauffage, refroidissement, production d'ECS, éclairage, auxiliaires de chauffage, de refroidissement, d'ECS et de ventilation.

¹⁷⁷ Source : statistiques CEREN. Cette baisse s'effectue au profit, notamment, de l'électricité spécifique et de la climatisation.

¹⁷⁸ Cf. partie 1 de la phase 1

¹⁷⁹ Ce $C_{ep\ max}$ comprend 5 postes de consommation : chauffage, refroidissement, production d'ECS, éclairage, auxiliaires de chauffage, de refroidissement, d'ECS et de ventilation.

¹⁸⁰ Source : Consommation d'énergie et émissions de carbone du secteur tertiaire, M.GIRAULT sur base des données de producteurs d'énergie, du CEREN, projection SES-ENERDATA. Cette baisse s'effectue au profit, notamment, de l'électricité spécifique et de la climatisation.

3.7.6.4 Evolution du mix énergétique pour le chauffage des logements

Le calcul du mix énergétique pour le chauffage résidentiel se base sur :

- Les valeurs actuelles pour le résidentiel francilien, résultantes d'une modélisation du parc francilien menée par Energies Demain pour le compte de l'IAURIF en 2010¹⁸¹ (Cf. Figure) ;
- Les hypothèses d'évolution du mix énergétique pour le chauffage dans le parc de logements en France à l'horizon 2020 ou 2050, auxquelles s'ajoutent des hypothèses spécifiques des particularités du territoire d'Ile-de-France ;
- Des calculs d'interpolation et d'extrapolation linéaires des tendances d'évolution des parts de marché des énergies.

Le mix énergétique actuel pour le chauffage des logements francilien neufs ou rénovés entre 1999 et 2005, est repris des figures ci-dessous. Il correspond aux parts respectives des énergies de chauffage dans les logements récents, soit individuels, soit collectifs.

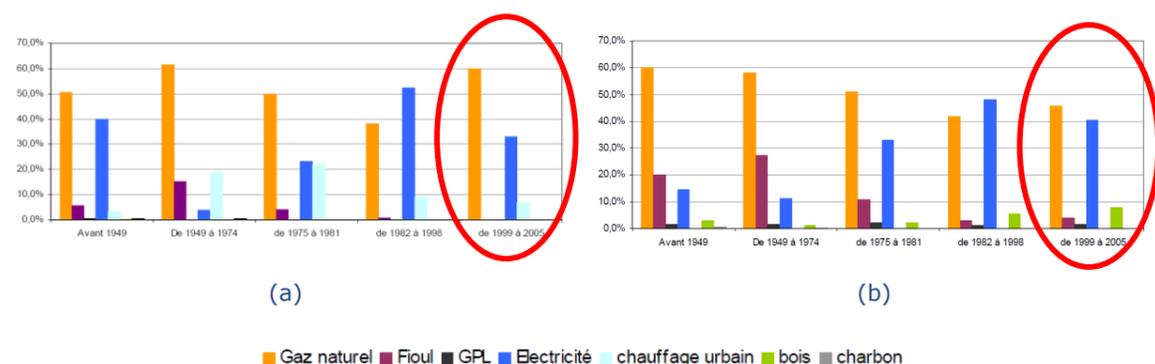


Figure 112 : Part des énergies utilisées en Ile-de-France pour le chauffage selon l'époque de construction en (a) logement collectif et (b) en maison individuelle. Source : ENERTER 2005 (Energie Demain)/INSEE in L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, 2010)

Le calcul du mix énergétique entre 2005 et 2050 se base sur les résultats du travail prospectif du CEREN¹⁸² concernant l'évolution des parts de marché des énergies de chauffage pour les logements français entre 2000 et 2020. Il s'appuie également sur l'étude du CLIP¹⁸³ concernant les perspectives de réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat d'ici à 2050. Les hypothèses fortes de ce calcul sont les suivantes :

- Pour l'individuel :
 - la part de marché de chaque énergie de chauffage évolue de la même manière dans le neuf et dans le rénové (hypothèse Stratec, 2012) ;
 - la part de marché du gaz naturel progresse et évolue de +8% sur la période 2005-2020 ;
 - inversement, la part de l'électricité diminue de 8% entre 2005 et 2020 ;
 - le fioul, le charbon et le GPL, quasiment absents de la construction dans la période récente, diminuent progressivement et ont une part nulle en 2050 ;

¹⁸¹ L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, 2010

¹⁸² Projection tendancielle de la consommation d'énergie des logements, M.Girault, F.Lecouvey, CEREN, 2001

¹⁸³ 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

- le bois augmente légèrement et possède le reste des parts des marchés (8% en 2005, 12% en 2050) ;
- Pour le collectif : les mêmes hypothèses sont appliquées, exception faite :
 - du bois : avec une part de marché négligeable d'ici à l'horizon 2050 ;
 - de l'électricité, dont la part de marché diminue davantage (-15% entre 2005 et 2020) au profit du développement progressif de l'énergie géothermique. L'Ile-de-France dispose en effet d'un gisement important de géothermie profonde¹⁸⁴ qui est supposé accroître la part de marché du chauffage urbain d'ici (6,8%) à 2050 (7,4%).

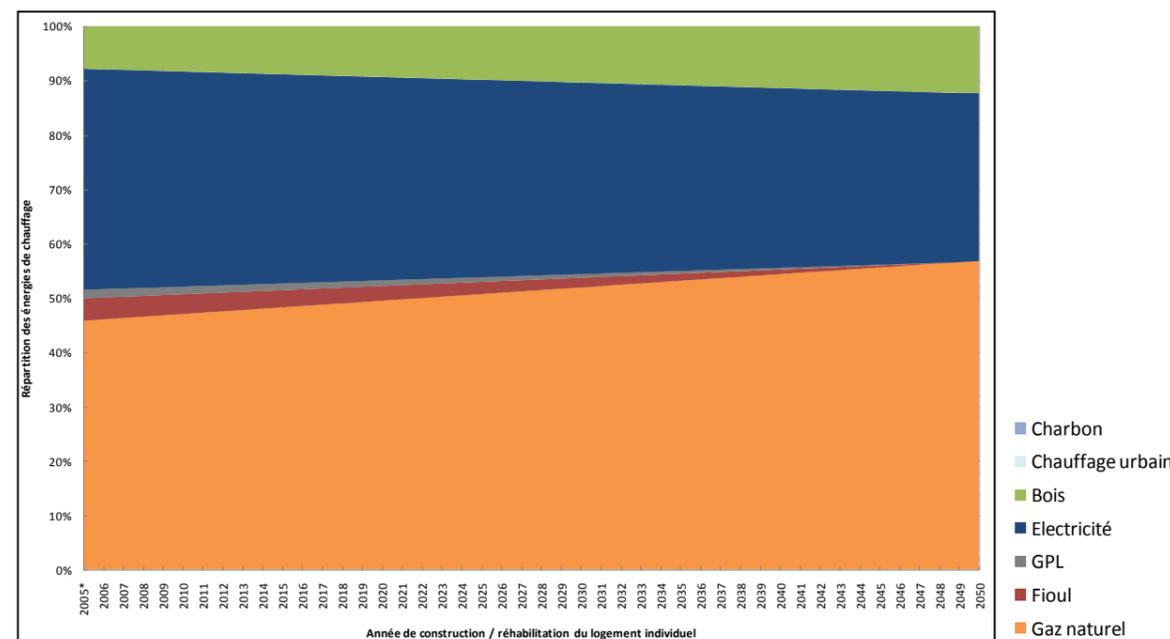


Figure 113 : Estimation de l'évolution du mix énergétique pour le chauffage d'un logement individuel neuf ou réhabilité entre 2005 et 2050

¹⁸⁴ Source : 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

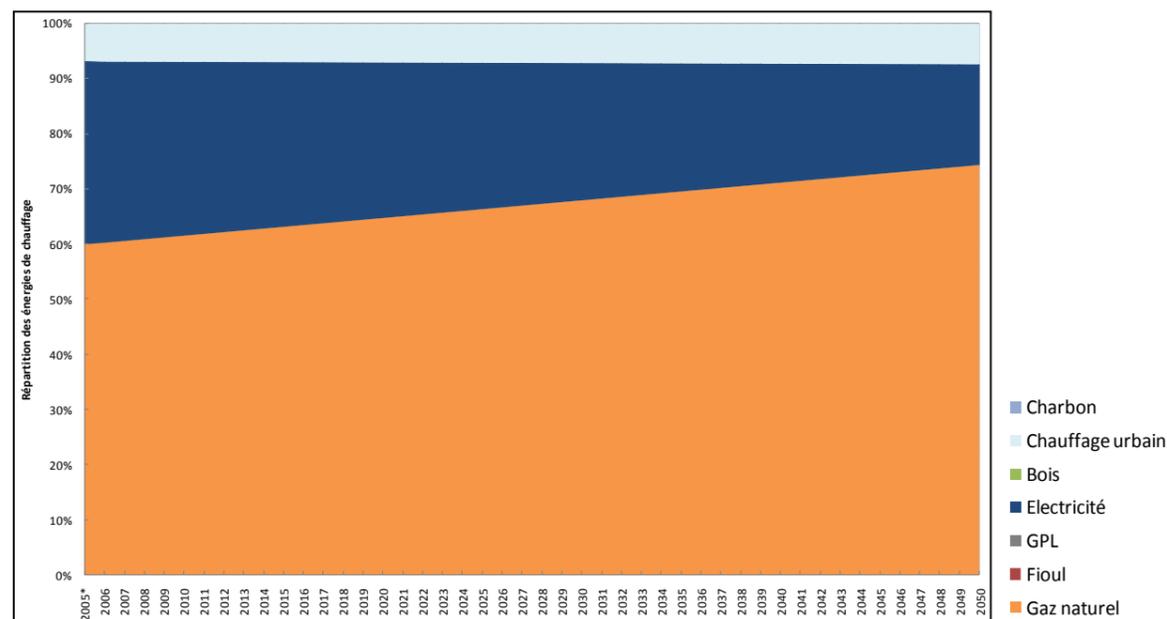


Figure 114 : Estimation de l'évolution du mix énergétique pour le chauffage d'un logement collectif neuf ou réhabilité entre 2005 et 2050, Source des deux graphiques : Stratec, 2012, d'après :
 - L'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, 2010 (données 2005)
 - Projection tendancielle de la consommation d'énergie des logements, M.Girault, F.Lecouvey, CEREN, 2001 (hypothèses d'évolution 2005-2020)
 - 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 (hypothèses d'évolution 2005-2050))

3.7.6.5 Evolution du mix énergétique pour le chauffage des bâtiments tertiaires

Le calcul du mix énergétique pour le chauffage tertiaire se base sur :

- Les statistiques récentes du CEREN¹⁸⁵ ;
- Les hypothèses d'évolution du mix énergétique pour le chauffage dans le parc tertiaire en France à l'horizon 2020 ;
- Des calculs d'interpolation et d'extrapolation linéaires des tendances d'évolution des parts de marché.

Le mix énergétique actuel pour le chauffage des bâtiments tertiaires (tous usages confondus) est repris ci-dessous. Il correspond aux parts respectives des énergies de chauffage dans le total des consommations du tertiaire pour cet usage entre 1990 et 2009.

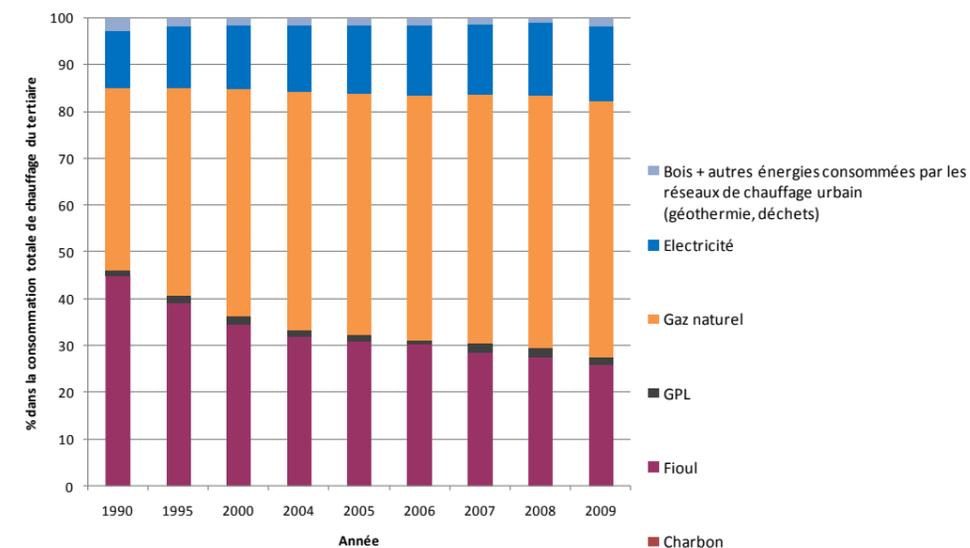


Figure 115 : Part des consommations de différentes énergies dans le poste chauffage des bâtiments tertiaires entre 1990 et 2009 en France (en % de Mtep) (Source : CEREN, données mises à jour en juin 2011)

Le calcul du mix énergétique après 2009 se réfère à l'étude du SES de 2001. Celle-ci se base sur les hypothèses utilisées dans le scénario tendanciel de l'Observatoire de l'Energie et du scénario « société de marché » du Commissariat général du Plan. Les hypothèses fortes qui en découlent, concernant le chauffage, sont les suivantes :

- La part de marché de l'électricité est stable d'ici à 2020 ;
- Le gaz se développe au détriment du fuel (respectivement +10% et -20% entre 2009 et 2020) ;
- Le charbon disparaît en 2020, ainsi que le GPL ;
- Le bois et le chauffage urbain représentent les consommations restantes ;
- Ces tendances se poursuivent après 2020 (extrapolations linéaires).

L'estimation du mix énergétique pour le chauffage du tertiaire est représentée à la Figure 116.

¹⁸⁵ Voir en particulier : [http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/energie-climat/r/residentiel-tertiaire.html?tx_ttnews\[tt_news\]=21063&cHash=9f0e986e0a2dd7b05e0cfb6e782ac795](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/energie-climat/r/residentiel-tertiaire.html?tx_ttnews[tt_news]=21063&cHash=9f0e986e0a2dd7b05e0cfb6e782ac795)

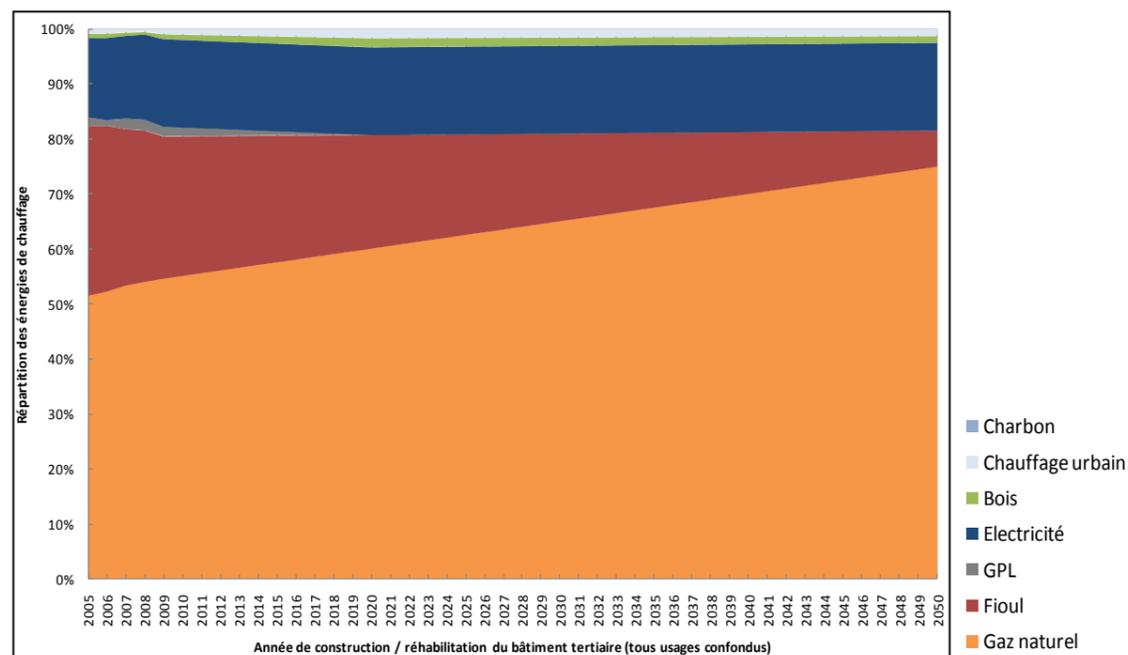


Figure 116 : Estimation de l'évolution du mix énergétique pour le chauffage d'un bâtiment tertiaire neuf ou réhabilité entre 2005 et 2050 (Source : Stratec, 2012, d'après les statistiques du CEREN 2005-2009 et les hypothèses pour 2020 extraites de Consommation d'énergie et émissions de carbone du secteur tertiaire, M.GIRAULT sur base des données de producteurs d'énergie, du CEREN, projection SES-ENERDATA)

Remarque : bien qu'il soit supposé ici que la mise en œuvre du réseau de transport public du Grand Paris n'influencera plus directement l'évolution du parc bâti après 2035, le projet continuera à générer les réductions de consommations énergétiques sur cette période grâce à l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments construits ou rénovés avant 2035 dans un scénario avec projet par rapport à un scénario de référence.

3.7.6.6 Résultats : émissions annuelles de CO₂ par unité de surface de bâtiments pour le poste de chauffage

Sur base de toutes les hypothèses présentées ci-avant, et des facteurs d'émissions de production de l'énergie consommée l'outil effectue, pour chaque année entre 2005 et 2050, les calculs suivants :

- Il somme le nombre de kWh consommés durant l'année de calcul par l'ensemble du parc résidentiel et tertiaire selon la consommation moyenne annuelle de chaque m², fonction de son âge, de sa typologie et de s'il a été construit ou rénové (1) ;
- Il multiplie l'ensemble de ces kWh par un contenu moyen de CO₂ que contient le kWh pour l'année de calcul considérée (fonction du contenu CO₂ de chaque énergie et du mix énergétique, Cf point suivant pour plus de détails sur ces contenus CO₂) (2).

3.7.7 Les opérations de maintenance et de rénovation des VRD, l'exploitation des services publics dans les zones urbanisées

| Numérotation | Description |
|--------------|--|
| FE K | émissions de CO ₂ créées, d'une part, par la maintenance et les diverses opérations effectuées sur les VRD et, d'autre part, par l'exploitation des services publics qui desservent les zones d'habitat et d'activité |

Le calcul de FE K prend en compte, premièrement, l'exploitation des services publics qui desservent les zones urbanisées, en l'occurrence le système de collecte des déchets et celui de distribution du courrier. Pour cela, les hypothèses suivantes ont été fixées :

| Service public | Type de véhicules de service | Facteur d'émission du véhicule ¹⁸⁶ (g éq CO ₂ /km) | Nombre de passage à l'année | Emissions annuelles de CO ₂ pour l'exploitation du service public (kg éq CO ₂ /km/an) |
|--------------------------|------------------------------|--|-----------------------------|---|
| Collecte des déchets | Poids-lourd PTAC 11-19t | 938,5 | 52 | 48,802 |
| Distribution du courrier | VP | 239,3 | 260 | 62,218 |
| Total : | | | | 111,02 kg éq CO₂/km/an |

Tableau 82 : Estimations des émissions de CO₂ émises par l'exploitation des services publics par kilomètre de parcelle (Source : 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 »)

Le calcul de FE K tient compte, deuxièmement, des émissions de CO₂ liées à l'exploitation et à l'entretien des réseaux et des voiries ainsi que des émissions liées à la rénovation et au renouvellement de ces VRD. Les opérations d'entretien des VRD sont récurrentes et régulières alors que celles de rénovation ont un caractère plus exceptionnel et irrégulier. De plus, les émissions de CO₂ créées par l'exploitation et l'entretien des VRD apparaissent dès l'installation d'une nouvelle canalisation ou infrastructure, alors que les opérations de rénovation n'interviennent généralement qu'après un certain nombre d'années.

Les émissions annuelles liées à l'exploitation et à l'entretien des VRD ont été fixées, par défaut, à 5% des émissions liées à leur construction. De plus, il a été considéré que les émissions liées à la rénovation des VRD étaient égales à 20% des émissions dues à leur construction. En tenant compte de la durée de vie typique de chaque VRD (3^{ème} colonne du Tableau 83) ainsi que de la fréquence des travaux de rénovation sur ces VRD (5^{ème} colonne du Tableau 83), les émissions d'exploitation et de rénovation ont été rapportées à l'année (dernière colonne du Tableau 83).

¹⁸⁶ Cf. partie « mobilité des individus », facteur d'émissions de 2005, supposé constant au cours du temps (par simplification)

| VRD | Côté de la voirie | Durée de vie typique ¹⁸⁷ | Nature des travaux de rénovation | Fréquence des travaux de rénovation ¹⁸⁸ | Facteur d'émission pour la construction du VRD (kg éq CO ₂ /km) ¹⁸⁹ | Emissions annuelles de CO ₂ pour l'entretien, l'exploitation et la rénovation du VRD (kg éq CO ₂ /km/an) |
|---|-------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--|---|--|
| Voiries | 2 | 200 | Réparation | 30 | 586 295,3 | 32 832,54 |
| Electricité | 2 | 35 | Câble et/ou transformateur | 10 | 4 880 | 327,66 |
| Evacuation et assainissement (eaux pluviales, eaux usées) | 2 | 50 | Canalisations/vannes | 30 | 6 200 | 334,8 |
| Total : | | | | | | 33 495 kg éq CO₂/km/an |

Tableau 83 : Estimations des émissions de CO₂ émises par l'entretien et l'exploitation des VRD par kilomètre de parcelle (Source : Stratec, 2012)

Le facteur d'émissions FE K est obtenu en sommant les émissions annuelles liées à l'exploitation des services publics et celles liées à l'entretien, à la maintenance et à la rénovation des VRD. Au total, on obtient un FE K de 33 606,02 kg éq CO₂/km/an, qui est supposé, par souci de simplification, constant au cours du temps.

3.7.8 La mobilité des individus influencée par les formes urbaines

| Numérotation | Description |
|--------------|---|
| FE L | émissions de CO ₂ créées par individu pour un trajet domicile-travail selon la densité d'activité humaine nette de la zone urbanisée |
| FE M | émissions de CO ₂ créées par individu pour un trajet domicile-travail selon la mixité fonctionnelle nette de la zone urbanisée |

Attention : il est important de rappeler que les émissions de CO₂ calculées pour le poste n°3 « la mobilité des individus influencée par les formes urbaines », à l'aide des facteurs d'émissions FE L et FE M, ne seront pas comptabilisées dans le bilan final d'émissions de CO₂ du projet (voir partie 2 de la phase 1 de la présente étude). FE L et FE M sont utilisés ici pour effectuer une analyse de sensibilité optionnelle, permettant d'obtenir un ordre de grandeur des effets de la densité et de la mixité urbaine sur la mobilité des individus et des émissions de CO₂ induites. Les variations d'émissions de CO₂ calculées par le biais de FE L et de FE M seront affichées uniquement à titre indicatif.

La définition du facteur d'émissions FE L s'appuie sur une étude du Centre de Recherche en Sciences de la Ville, du Territoire et du Milieu rural (LEPUR)¹⁹⁰. Les résultats de cette étude sont

représentés à la Figure 78. Ce graphique représente le nombre de kg_{eq} CO₂ émis sur un trajet domicile-travail moyen en fonction de la densité d'activité humaine nette¹⁹¹ dans la zone étudiée.

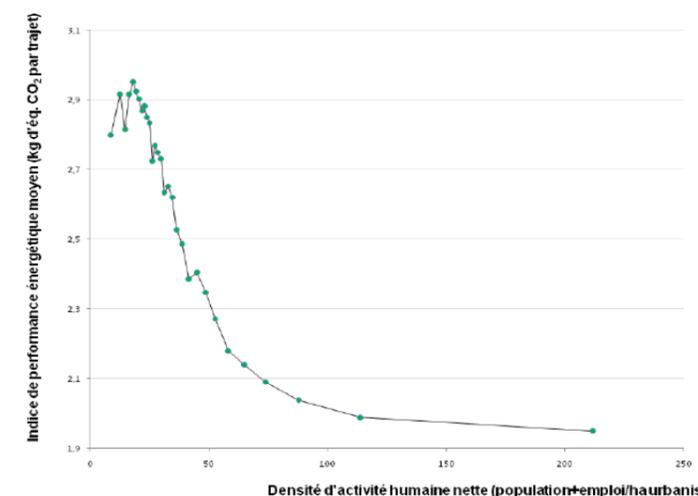


Figure 117 : Evolution des émissions de CO₂ liées aux déplacements domicile-travail par classe de densité (Source : Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des gaz à effets de serre, LEPUR, Université de Liège)

La valeur de FE L est considérée constante au cours du temps. Nous considérons que chaque employé effectue 2 trajets domicile-travail par jour de travail (aller-retour) et que les jours effectifs de travail de chaque employé représentent 85% des jours ouvrables¹⁹². On obtient ainsi une valeur moyenne de 442 trajets/emploi/an.

Ainsi, si l'utilisateur encode la variation de densité d'activité humaine entre une situation avec et une situation sans projet, le facteur d'émission FE L permettra de donner un ordre de grandeur de l'effet de cette variation de densité sur les teqCO₂ émises par an par les employés.

La définition du facteur d'émissions FE M s'appuie également sur l'étude du LEPUR¹⁹³. La Figure 118 représente le nombre de kg_{eq} CO₂ émis sur un trajet domicile-travail moyen en fonction de la mixité fonctionnelle nette¹⁹⁴ dans la zone. Tout comme FE L, FE M est considéré constant au fil des années. FE M est égal à la valeur correspondant à la mixité fonctionnelle nette spécifiée par l'utilisateur, multipliée par un nombre moyen de trajets domicile-travail par employé et par an (442, Cf. plus haut) et par le nombre total d'employés.

¹⁸⁷ Source : base de données INIES

¹⁸⁸ Extrait 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

¹⁸⁹ Cf. descriptif du facteur d'émission FE H

¹⁹⁰ Source : Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des gaz à effets de serre, LEPUR, Université de Liège

¹⁹¹ Pour rappel, la densité d'activité humaine nette représente le rapport entre le total de population et d'emploi dans une zone sur l'emprise au sol des surfaces urbanisées dans cette zone. La méthode conseillée pour calculer cet input est décrite dans le guide de l'utilisateur.

¹⁹² Pour tenir compte des jours fériés, du télétravail, des congés, etc.

¹⁹³ Source : Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des gaz à effets de serre, LEPUR, Université de Liège

¹⁹⁴ Pour rappel, la mixité fonctionnelle nette constitue un ratio de diversité d'occupation du sol à partir d'un maillage du territoire. La méthode conseillée pour calculer cet input est décrite dans le guide de l'utilisateur.

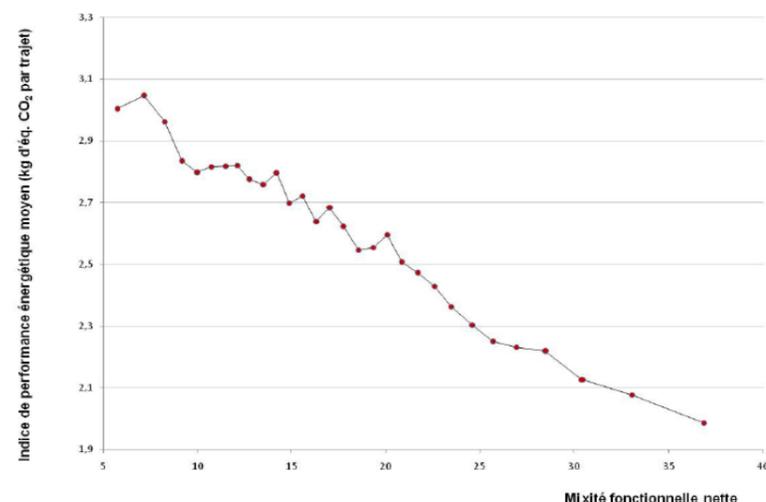


Figure 118 : Evolution des émissions de CO₂ liées aux déplacements domicile-travail par classe de mixité fonctionnelle nette (Source : Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des gaz à effets de serre, LEPUR, Université de Liège)

3.8 Energies

3.8.1 L'électricité

Comme présenté en détails au § 3.1.1 du rapport de phase 1, partie 2, un facteur d'émission moyen du réseau sera utilisé. Ce facteur d'émission a été défini par le rapport de l'ensemble des émissions annuelles du parc de production par l'ensemble des émissions de GES générées. Cette définition permet d'avoir une vision prospective en intégrant l'évolution des moyens de production au cours du temps. Les valeurs récentes du facteur d'émissions moyen français varient entre 75 et 90 g de CO₂ par kWh produit (en sortie de centrale, hors perte en ligne et de transformation). Pour l'évolution d'ici 2050, nous proposons de prendre les mêmes hypothèses que celles retenues dans le cadre du Bilan Carbone de la LGV Rhin-Rhône, à savoir un facteur d'émissions de l'ordre de 60 g éq CO₂/kWh en 2020, qui est un chiffre prévisionnel RTE (Réseaux de Transport d'Electricité), et 50 g éq CO₂/kWh à horizon 2050, hypothèse qui avait été formulée par l'ADEME lors du travail avec RFF.

Les émissions correspondantes sont représentées graphiquement ci-après.

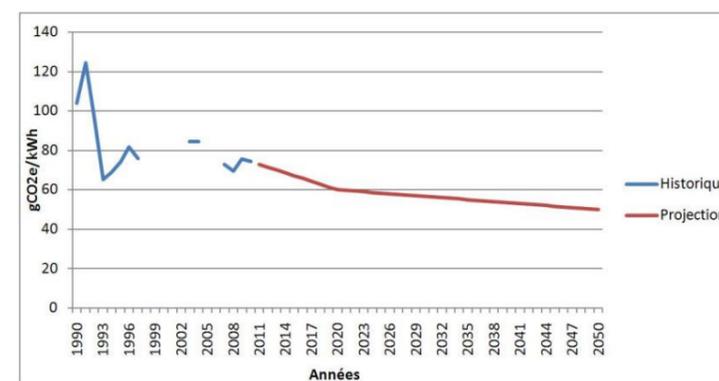


Figure 119 : facteur d'émissions moyen français de l'électricité (source : ADEME, RTE).

En outre, le facteur d'émission tient compte des pertes en ligne estimées à 8%¹⁹⁵. Le facteur d'émissions global par kWh consommé est donc le suivant :

| FE électricité : | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| g éq CO ₂ /kWh centrale | 84.3 | 74.3 | 67.2 | 60.0 | 58.3 | 56.7 | 55.0 | 53.3 | 51.7 | 50.0 |
| g éq CO ₂ /kWh final | 91.7 | 80.8 | 73.0 | 65.2 | 63.4 | 61.6 | 59.8 | 58.0 | 56.2 | 54.3 |

Tableau 84 : Facteur d'émissions de consommation d'énergie électrique du réseau de distribution

3.8.2 Essence et fioul

En tenant compte de l'insertion progressive des biocarburants dans l'essence et le fioul (diesel et chauffage) et de l'amélioration des techniques industrielles de production tel que présenté au § 3.6.1.1, on obtient les facteurs d'émissions suivants :

| | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | kg éq CO ₂ / kg | | | | | | | | | |
| essence | 3.741 | 3.538 | 3.495 | 3.452 | 3.410 | 3.368 | 3.326 | 3.284 | 3.243 | 3.202 |
| diesel | 3.471 | 3.276 | 3.237 | 3.198 | 3.159 | 3.121 | 3.082 | 3.044 | 3.006 | 2.968 |

Tableau 85 : Facteurs d'émissions d'utilisation d'essence et de fioul (diesel ou chauffage). Source des facteurs d'émissions 2005 : Guide des facteurs d'émissions V6.1, Ademe 2010

3.8.3 Autres énergies

Pour le gaz naturel et le GPL, aucune incorporation de biocarburants ne sera considérée. Les émissions ne varieront dans le temps que grâce aux améliorations technologiques de la chaîne

¹⁹⁵ Guide des facteurs d'émissions V6.1, ADEME 2010

de production considérées comme permettant une réduction des émissions de 0.3% par an à partir de 2005¹⁹⁶. Les facteurs d'émissions retenus sont les suivants :

| | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Kg éq CO ₂ / kg | | | | | | | | | | |
| GPL | 3.492 | 3.484 | 3.476 | 3.467 | 3.459 | 3.451 | 3.443 | 3.434 | 3.426 | 3.418 |

Tableau 86 : facteur d'émissions d'utilisation de GPL. Source des facteurs d'émissions 2005 : Guide des facteurs d'émissions V6.1, Ademe 2010

| | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| g éq CO ₂ / kWh | | | | | | | | | | |
| Gaz naturel | 238 | 238 | 237 | 237 | 236 | 235 | 235 | 234 | 234 | 233 |

Tableau 87 : facteur d'émissions d'utilisation de gaz naturel. Source des facteurs d'émissions 2005 : Guide des facteurs d'émissions V6.1, Ademe, 2010

Le facteur d'émissions d'utilisation du bois ne concerne lui que les émissions de transformation et d'acheminement des matières combustibles (bûches, copeaux, plaquettes,...). Le facteur varie à nouveau grâce aux améliorations des techniques de production (-0.3% des émissions/an) :

| | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| g éq CO ₂ / kWh | | | | | | | | | | |
| Bois | 4.0 | 3.9 | 3.9 | 3.8 | 3.8 | 3.7 | 3.6 | 3.6 | 3.5 | 3.5 |

Tableau 88 : facteur d'émissions d'utilisation de bois (plaquettes forestières) pour le chauffage. Source des facteurs d'émissions 2005 : Guide des facteurs d'émissions V6.1, Ademe, 2010

Finalement, le facteur d'émissions du chauffage urbain est considéré comme égal à 0.2 kg éq CO₂ / kWh¹⁹⁷. Ce facteur sera considéré comme constant dans le temps.

¹⁹⁶ Source : perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 : rapport de la commission Energie présidée par J.Syrota, Centre d'Analyse Stratégique, 2007

¹⁹⁷ 1- Amélioration énergétique du parc résidentiel francilien, les enjeux socio-économiques, IAURIF, PREBAT, 2010 / 2-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 /

4. Guide de l'utilisateur

4.1 Introduction

Le développement de CarbOptimum[®], calculateur d'émissions de gaz à effet de serre (GES), s'inscrit dans le cadre de la démarche innovante menée par la Société du Grand Paris depuis le lancement des premières réflexions sur le projet de Réseau de transport public du Grand Paris. Il est le résultat final d'une étude complète à double vocation : d'une part, préparer la réalisation du bilan carbone spécifique qui sera produit dans le cadre des études d'impact environnemental préalables à l'obtention des déclarations d'utilité publique ; d'autre part, alimenter et enrichir la réflexion sur les évaluations *ex ante* qui sont menées en mettant à la disposition de la Maîtrise d'ouvrage et des acteurs du projet un véritable outil d'aide à la décision en matière d'émissions de GES.

L'étude a ainsi été menée en plusieurs phases afin :

- dans une première étape, d'identifier les flux de CO₂, positifs et négatifs, directement ou indirectement liés à la réalisation du Réseau de transport public du Grand Paris ;
- dans une seconde étape, de développer la méthodologie pour l'évaluation des postes d'émissions retenus dans le cadre du projet.

Ces phases ont abouti à 3 rapports principaux (phase 1 partie 1, phase 1 partie 2 et phase 2) qui détaillent l'ensemble de la réflexion spécifique aux gaz à effet de serre qui a mené au développement du calculateur. Toutes les hypothèses qui ont été retenues ainsi que les facteurs d'émissions qui sont utilisés dans le calculateur sont également explicités en détails dans ces rapports.

Le guide pratique de l'utilisateur associé à l'outil de calcul fait suite à ces rapports et a pour objectif principal d'expliquer et d'illustrer comment utiliser l'outil. Il ne s'agit donc pas d'un guide théorique détaillant les raisons de la prise en compte des différents postes d'émissions ou la façon de délimiter le périmètre de l'étude mais plutôt d'un guide pratique expliquant comment entrer les données dans le calculateur et visionner les résultats. Pour toutes les questions théoriques, nous renvoyons l'utilisateur vers les trois rapports précédents.

4.2 Présentation générale de l'outil

CarbOptimum[®] consiste en un tableur Excel simple, constitué de plusieurs onglets de calculs inter-liés.

La structure des onglets est identique à celle utilisée tout au long de l'étude et séparée en 6 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.

Des onglets supplémentaires ont également été intégrés pour présenter les résultats des bilans et préciser l'ensemble des facteurs d'émissions utilisés.

Tous ces onglets sont accessibles directement en cliquant sur les liens prévus au centre de la page d'accueil ou en cliquant sur les onglets visibles en bas de la page (Figure 120).

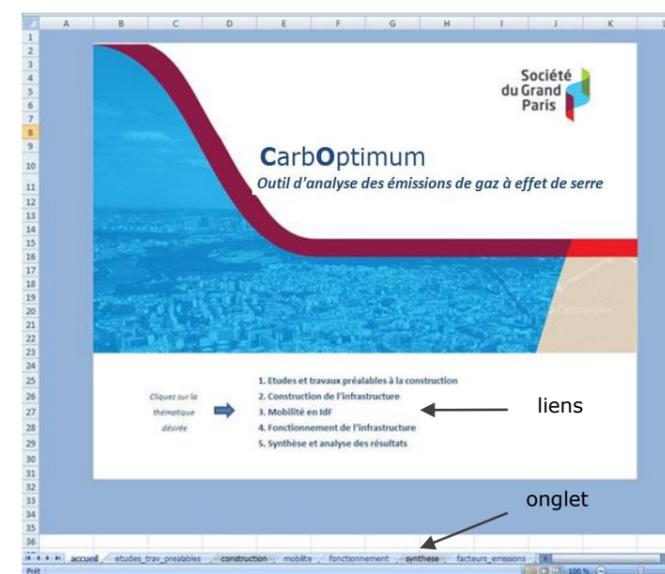


Figure 120 : Page d'accueil du calculateur

Dans tous les onglets, un code couleur a été respecté. Les cellules grises correspondent aux valeurs à entrer par l'utilisateur, les cellules rouges présentent les facteurs d'émissions et les cellules vertes présentent les résultats des calculs en kg ou t éq CO₂ (Figure 121). Les cellules laissées blanches sont, quant à elles, des cellules de calculs intermédiaires ou des cellules de légende.

| | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Surfaces utilisées (m ²) | | | | | | | |
| Consommation moyenne (kWh/m ² /an) | 121 | 121 | 121 | 121 | 121 | 121 | 121 |
| Consommation (kWh) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Facteur d'émissions (kg éq CO ₂ /kWh) | 0,092 | 0,085 | 0,079 | 0,076 | 0,082 | 0,081 | 0,079 |
| Emissions (kg éq CO ₂) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Consommation moyenne (kWh/m ² /an) | 202 | 202 | 202 | 202 | 202 | 202 | 202 |
| Consommation (kWh) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Facteur d'émissions (kg éq CO ₂ /kWh) | 0,241 | 0,241 | 0,240 | 0,240 | 0,240 | 0,240 | 0,240 |
| Emissions (kg éq CO ₂) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Emissions totales (kg éq CO ₂) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Emissions totales (t éq CO ₂) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figure 121 : Illustration du code couleur

Excepté pour des changements structurels de l'outil, l'utilisateur ne doit donc modifier que les cases grises des onglets thématiques. Les facteurs d'émissions repris dans les cases rouges proviennent tous des onglets *facteurs_emissions* et *bd_construction* et ne doivent être modifiés que dans ces derniers.

4.4 Construction de l'infrastructure

La partie « Construction de l'infrastructure » de CarbOptimum® est constituée de deux onglets :

- Un onglet *Construction* : il s'agit du calculateur en tant que tel ;
- Un onglet *bd_construction* qui regroupe dans une base de données :
 - Les facteurs d'émission utilisés,
 - Les valeurs par défaut retenues dans l'outil,
 - Les items des listes déroulantes.

4.4.1 Onglet Construction

4.4.1.1 Un bloc de calcul par type d'infrastructures

CarbOptimum® traite successivement de haut en bas les différents types d'infrastructures ferroviaires rencontrés sur le tronçon étudié, les équipements ferroviaires, les bâtiments et enfin l'organisation du chantier. A chaque élément traité correspond un bloc de calcul.

Nous avons donc :

- 3 blocs de calcul pour les tunnels permettant d'envisager 3 types de tunnels différents ;
- 3 blocs de calcul pour les tranchées couvertes permettant d'envisager 3 types de tranchées couvertes ;
- 1 bloc de calcul pour les sections de surface ;
- 1 bloc de calcul pour les équipements ferroviaires ;
- 1 bloc de calcul pour les bâtiments et voiries ;
- 1 bloc de calcul pour l'organisation du chantier.

La présentation des blocs se fait par des groupements de lignes qu'il est possible de regrouper/déployer, donnant ainsi une vision arborescente :

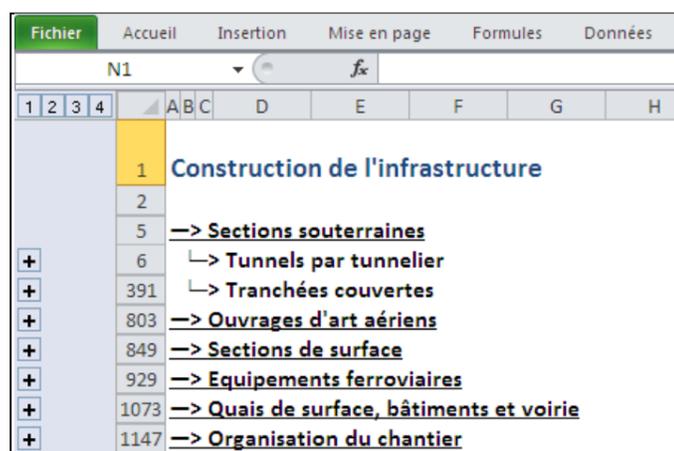


Figure 126 : Vue du calculateur – Organisation par type d'infrastructure

4.4.1.2 Des sous-blocs pour préciser le calcul

Chaque bloc de calcul est dissocié en plusieurs sous-blocs de couleur bleue. Le premier sous-bloc, appelé « Paramétrage général » permet de renseigner les paramètres indispensables pour le calcul (nombre de kilomètres de voies, dimensions principales des infrastructures, année de réalisation...).

Les sous-blocs suivants permettent, thématique par thématique et ligne par ligne, d'affiner le cas échéant les valeurs retenues par défaut dans le calculateur (précision du type de béton, distances d'approvisionnement par mode de transport...). L'utilisateur a ainsi la possibilité d'adapter l'outil aux données dont il dispose pour chaque tronçon.

Toutes les données d'entrée nécessaires aux calculs sont regroupées sur trois colonnes :

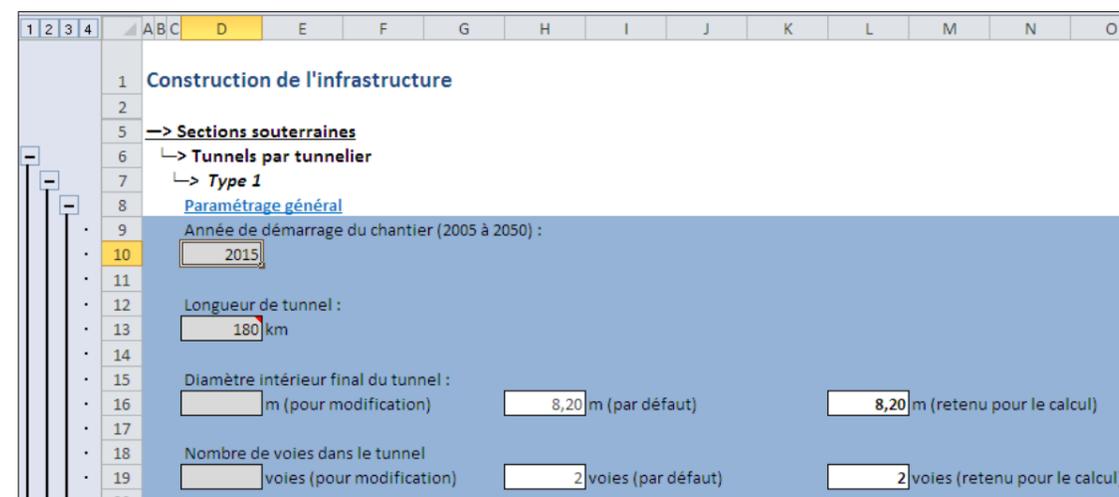


Figure 127 : Vue du sous-bloc Paramétrage général du tunnel Type 1

- La **colonne D** rassemble les cellules modifiables par l'utilisateur ; ce sont les cellules grisées, prévues pour affiner le calcul lorsque les données sont disponibles,
- Les cellules sur fond blanc de la **colonne H** correspondent aux valeurs définies par défaut dans l'outil et rappelées depuis l'onglet de base de données,
- Les cellules sur fond blanc de la **colonne L** rappellent les valeurs retenues pour le calcul, à savoir la valeur par défaut de la ligne si l'utilisateur ne renseigne rien en colonne D, et la valeur renseignée en colonne D par l'utilisateur si tel est le cas.

Compte tenu du degré de précision des facteurs d'émission, qui varie de quelques % (carburant, émissions directes...) à plus de 10% pour les émissions hors site, la présentation des résultats est à réaliser avec deux, ou trois chiffres significatifs au maximum. Pour éviter les interprétations erronées, les valeurs sont affichées avec un nombre limité de chiffres significatifs. (Ce nombre de chiffres est paramétrable dans le tableur).

Afin de pouvoir réaliser des opérations sans induire d'erreurs, il est nécessaire de conserver les valeurs non arrondies. Ainsi, pour chaque tableau en valeurs arrondies, est présent un tableau en valeurs non arrondies. Ce tableau non arrondi est masqué en dessous du récapitulatif. Ces lignes masquées se manifestent par des numéros de ligne manquants :

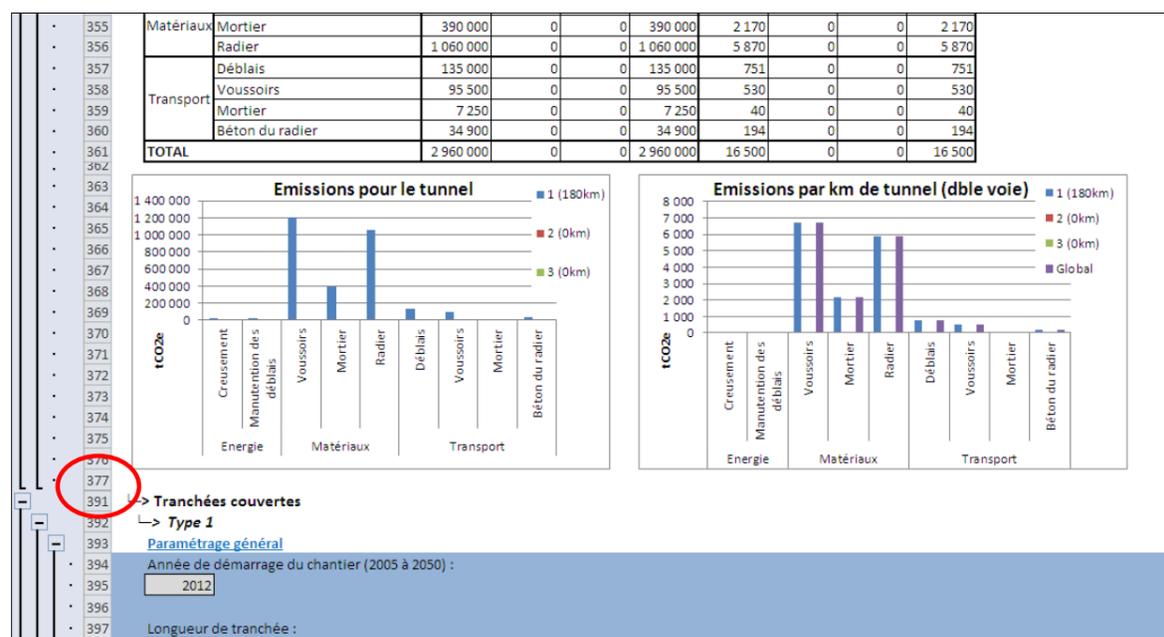


Figure 132 : Identification des lignes masquées

Un tableau au code couleur différent avec les valeurs non arrondies apparaît lorsqu'on utilise la fonction « afficher les lignes masquées » du tableur.

Récapitulatif des émissions (tunnels par tunnelier)

| Emissions (tCO ₂ e) | | pour le tunnel | | | | par km de dble voie | | | |
|--------------------------------|-------------------------|----------------|---------|---------|-----------|---------------------|---------|---------|--------|
| | | 1 (180km) | 2 (0km) | 3 (0km) | Somme | 1 (180km) | 2 (0km) | 3 (0km) | Global |
| Energie | Creusement | 16 700 | 0 | 0 | 16 700 | 93 | 0 | 0 | 93 |
| | Manutention des déblais | 16 800 | 0 | 0 | 16 800 | 94 | 0 | 0 | 94 |
| Matériaux | Voussoirs | 1 210 000 | 0 | 0 | 1 210 000 | 6 720 | 0 | 0 | 6 720 |
| | Mortier | 390 000 | 0 | 0 | 390 000 | 2 170 | 0 | 0 | 2 170 |
| Transport | Radier | 1 060 000 | 0 | 0 | 1 060 000 | 5 870 | 0 | 0 | 5 870 |
| | Déblais | 135 000 | 0 | 0 | 135 000 | 751 | 0 | 0 | 751 |
| Transport | Voussoirs | 95 500 | 0 | 0 | 95 500 | 530 | 0 | 0 | 530 |
| | Mortier | 7 250 | 0 | 0 | 7 250 | 40 | 0 | 0 | 40 |
| TOTAL | Béton du radier | 34 900 | 0 | 0 | 34 900 | 194 | 0 | 0 | 194 |
| | | 2 960 000 | 0 | 0 | 2 960 000 | 16 500 | 0 | 0 | 16 500 |

| Emissions (tCO ₂ e) | | pour le tunnel | | | | par km de dble voie | | | |
|--------------------------------|--|----------------|---|---|-----------|---------------------|---|---|--------|
| | | 180 | 0 | 0 | 180 | 180 | 0 | 0 | 180 |
| Emissions (tCO ₂ e) | | 1 | 2 | 3 | Somme | 1 | 2 | 3 | Global |
| Creusement | | 16 716 | 0 | 0 | 16 716 | 93 | 0 | 0 | 93 |
| Transport des déblais | | 135 123 | 0 | 0 | 135 123 | 751 | 0 | 0 | 751 |
| Manutention des déblais | | 16 848 | 0 | 0 | 16 848 | 94 | 0 | 0 | 94 |
| Voussoirs | | 1 208 988 | 0 | 0 | 1 208 988 | 6 717 | 0 | 0 | 6 717 |
| Transport des voussoirs | | 95 462 | 0 | 0 | 95 462 | 530 | 0 | 0 | 530 |
| Mortier | | 390 186 | 0 | 0 | 390 186 | 2 168 | 0 | 0 | 2 168 |
| Transport du mortier | | 7 249 | 0 | 0 | 7 249 | 40 | 0 | 0 | 40 |
| Radier | | 1 056 469 | 0 | 0 | 1 056 469 | 5 869 | 0 | 0 | 5 869 |
| Transport du béton radier | | 34 906 | 0 | 0 | 34 906 | 194 | 0 | 0 | 194 |
| TOTAL | | 2 961 946 | 0 | 0 | 2 961 946 | 16 455 | 0 | 0 | 16 455 |

Figure 133 : Affichage des lignes masquées

Les émissions présentées dans les tableaux récapitulatifs sont des arrondis des calculs. Les totaux présentés sont les arrondis de la somme des émissions exactes et non pas arrondies.

4.4.1.4 Valeurs par défaut calculées automatiquement

Pour le poste équipements ferroviaires, le calculateur ajuste automatiquement les valeurs par défaut en fonction du nombre de kilomètres de voies simples ou doubles renseigné plus haut dans le tableur par l'utilisateur pour les différents types d'infrastructures.

De même, le changement d'usage des sols se voit affecté par défaut une surface correspondant aux infrastructures définies en surface.

4.4.1.5 Vérification de cohérence

CarbOptimum® intègre pour certaines cellules de la colonne D des vérifications de cohérence permettant de mettre en garde l'utilisateur contre une valeur renseignée inhabituelle en indiquant sous la cellule concernée un message l'en informant :

| | | | | |
|-----|--|---|-------------------------------|---------------------------------|
| 201 | Largeur du radier | | | |
| 202 | | 9 m (pour modification) | 7,40 m (par défaut : L/D=0,9) | 9,00 m (retenu pour le calcul) |
| 203 | | Le radier est plus large que le tunnel, cette situation est IMPOSSIBLE | | |
| 403 | Nombre de voies dans le tunnel | | | |
| 404 | | 3 voies (pour modification) | 2 voies (par défaut) | 3 voies (retenu pour le calcul) |
| 405 | | Il y a moins de 3,5 m de largeur par voie (2,4 m), mais cette situation est possible. | | |
| 406 | Hauteur intérieure finale du tunnel : | | | |
| 409 | Profondeur moyenne de creusement du tunnel : | | | |
| 410 | | 3,50 m (pour modification) | 8,50 m (par défaut) | 3,50 m (retenu pour le calcul) |
| 411 | | Votre tunnel n'est pas totalement enterré car moins profond que sa hauteur, mais cette situation est possible | | |

Figure 134 : Exemples de messages mettant en garde l'utilisateur

4.4.2 Onglet bd_construction

L'onglet bd est constitué de tableaux rassemblant par thématique les valeurs par défaut nécessaires au calcul des émissions.

Les premières lignes sont consacrées aux facteurs d'émissions de l'énergie (électricité et carburants), des matériaux utilisés et des transports.

Les lignes suivantes correspondent aux ratios nécessaires au calcul des émissions : il s'agit des dimensions des infrastructures, des caractéristiques des matériaux utilisés, des volumes ou tonnages unitaires...

Les valeurs retenues et les méthodes de calcul associées ont fait l'objet des précédents rapports de l'étude.

| | A | B | C | D | E | F | G | H |
|----|-------------------------------|---|--------|-----|----------------------------|---|---|---|
| 19 | A. Facteurs d'émission | | | | | | | |
| 20 | | Matériaux génériques (kgCO ₂ e/kg) | | | | | | |
| 21 | | Acier (47% recyclé) | 2,2 | | | | | |
| 22 | | Aluminium (40% recyclé) | 6,1 | | | | | |
| 23 | | Cuivre (41% recyclé) | 2,6 | | | | | |
| 24 | | Ballast | 0,0073 | | | | | |
| 25 | | Ciment Portland (type) | 0,99 | | | | | |
| 26 | | Ciment type II (80% cli) | 0,834 | | | | | |
| 27 | | Ciment à 75% clinker | 0,782 | 75% | Proportion Clinker + chaux | | | |
| 28 | | Ciment à 70% clinker | 0,729 | 70% | Proportion Clinker + chaux | | | |
| 29 | | Ciment à 65% clinker | 0,677 | 65% | Proportion Clinker + chaux | | | |
| 30 | | Sable et grave | 0,015 | | | | | |
| 31 | | Eau | 0,0003 | | | | | |
| 32 | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | |

Figure 135 : Vue de la base de données - partie Facteurs d'émission des matériaux génériques

4.5 Fonctionnement du métro

CarbOptimum® prend en compte de manière successive les différentes composantes en jeu identifiées précédemment, c'est-à-dire :

1. L'énergie de traction
2. La consommation en énergie des gares et des bâtiments techniques
3. Les activités de gestion, de pilotage, d'entretien courant,...
4. Le renouvellement et les opérations lourdes de rénovation.

Pour chacun de ces postes, plusieurs niveaux de détails sont prévus. L'utilisateur y accède comme précédemment en utilisant les boutons déroulant situés à la gauche du tableur.

La structure générale est à nouveau la même que dans l'onglet « études et travaux préalables ».

Notons tout de même une spécificité du calcul des émissions dues à l'énergie de traction sans connaître la consommation précise du métro, pour lequel l'utilisateur peut préciser le nombre de places offertes par rame de métro. Lorsque cette valeur est différente de la valeur par défaut (112), la consommation moyenne de la rame par km parcouru est automatiquement modifiée.

L'utilisateur peut également préciser dans deux cases à menu déroulant le type de technologie choisi (sur fer ou sur pneu et en utilisant ou non des technologies avancées de récupération de l'énergie au freinage) (Figure 136).

| | | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|---|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Distances parcourues | (rame.km) | | | | | | | | | | |
| Places offertes/rame (par défaut) | (nombre) | 112 | 112 | 112 | 112 | 112 | 112 | 112 | 112 | 112 | 112 |
| Consommation (rame=112 places offertes) | (kWh/rame.km) | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 |
| Places offertes/rame (précisé) | (nombre) | | | | | | | | | | |
| Consommation retenue | (kWh/rame.km) | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 |
| Réduction système de roulement sur fer | non | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 |
| Réduction système technologique avancé | non | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 | 2.38 |
| Consommation | (kWh) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Facteur d'émissions | kgéqCO ₂ /kWh | 0.092 | 0.085 | 0.079 | 0.076 | 0.082 | 0.081 | 0.079 | 0.078 | 0.076 | 0.075 |
| Emissions | (kg éq CO ₂) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Emissions | (t éq CO ₂) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Spécification des technologies utilisées Spécification des places offertes/rame

Figure 136 : Calcul des émissions dues à l'énergie de traction des rames de métro dans le cas où la consommation précise des machines n'est pas connue.

4.6 Mobilité en Ile-de-France

L'impact du projet de réseau de transport sur la mobilité en Ile-de-France est réparti en deux volets distincts :

- La diminution de l'utilisation des véhicules particuliers, des deux roues motorisés et dans une moindre mesure des poids lourds et en conséquence des émissions qui en découlent ;
- La redistribution des utilisateurs des transports publics sur le réseau (bus, tram, métro, RER, train).

| | | |
|-----|---|-------------|
| 5 | Effets induits sur le réseau routier : | |
| 6 | | |
| 7 | | |
| 8 | -- Voiture particulière | non utilisé |
| 43 | | |
| 44 | | |
| 45 | | |
| 46 | -- Deux roues motorisés | non utilisé |
| 75 | | |
| 76 | | |
| 77 | | |
| 78 | -- Poids-lourds | non utilisé |
| 99 | | |
| 100 | | |
| 101 | | |
| 102 | -- Récapitulatif | |
| 105 | | |
| 106 | | |
| 107 | | |
| 108 | Effets induits sur le réseau de transports en commun : | |
| 109 | | |
| 110 | | |
| 111 | | |
| 112 | -- Variations dans l'utilisation des modes de transport en commun | non utilisé |
| 113 | | |
| 140 | | |
| 141 | | |

Figure 137 : vue globale de l'onglet mobilité en Ile-de-France

Le tableur inclut donc ces deux volets dans des cadres distincts.

Figure 138 : Détails de la prise en compte des effets induits sur l'utilisation des voitures particulières

Figure 139 : Calculateur pour la prise en compte des variations d'utilisation des transports en communs

Les tableaux concernant les impacts sur le trafic routier ont une structure identique pour les voitures particulières, les 2 roues motorisés et les poids lourds. Pour chaque type de véhicules, l'utilisateur doit entrer les distances parcourues avec et sans projet. Le tableau calcule alors les émissions induites ou évitées en cas de projet à l'aide d'un facteur d'émissions moyen tenant compte du parc automobile et des carburants utilisés. Les modifications éventuelles concernant le parc ou les carburants ne peuvent être faites dans cet onglet mais doivent être réalisées dans l'onglet sur les facteurs d'émissions.

Le tableau permet également la prise en compte de l'impact sur la consommation moyenne des véhicules. L'utilisateur doit au préalable déterminer le ratio entre la consommation moyenne avec projet et la consommation sans projet à l'aide d'un logiciel spécifique tel que COPERT IV.

Le ratio est déterminé par l'équation ci-dessous :

$$\text{Influence du projet sur la consommation de carburant} = \frac{C_{ap} / D_{ap}}{C_{sp} / D_{sp}} = \frac{\text{Consommation moyenne avec projet}}{\text{Consommation moyenne sans projet}}$$

Avec : C_{ap} = consommation totale de carburant avec projet
 D_{ap} = distances parcourues avec projet
 C_{sp} = consommation totale de carburant sans projet

On obtient ainsi une valeur qui sera inférieure à 1 dans le cas où le projet induit une diminution de la consommation moyenne en carburant et supérieure à 1 dans le cas où le projet induit une augmentation de la consommation moyenne en carburant.

Lorsque cette valeur est précisée dans la feuille de calcul, la sous- ou sur-consommation est évaluée et transformée en équivalents CO₂.

En ce qui concerne l'utilisation des transports en commun, l'utilisateur doit introduire les augmentations ou diminutions d'utilisation des différents modes de transports : bus, tramway, métro, RER et train pour chaque année considérée.

4.7 Développement territorial

4.7.1 Les termes utilisés

Afin d'être en accord sur les termes fréquemment utilisés dans ce guide, voici, pour rappel, leur signification :

- **Inputs** : valeurs à encoder par l'utilisateur dans les cellules grisées. Ce sont des résultantes des schémas d'urbanisation définis dans un scénario avec et un scénario sans projet. Ces inputs peuvent être obligatoires à renseigner, ou optionnels. On parle alors d'« inputs bonus » ;
- **Valeur de passage** : c'est la valeur (dans une unité spécifiée) d'un input pour une année de calcul considérée.

4.7.2 Objectifs

Cet onglet vise à calculer les variations d'émissions de tonnes équivalents CO₂ entre un scénario avec projet et un scénario de référence. La finalité de cette feuille de calcul est de proposer une première approche quantitative permettant de montrer en quoi la densification et l'accélération du renouvellement du parc bâti induites par le projet du Grand Paris peuvent être sources de réduction d'émissions de CO₂ dans le domaine du bâtiment et de la mobilité.

4.7.3 Périmètre de calcul et horizon temporel

Les trois postes d'émissions de gaz à effet de serre considérés pour ces calculs sont :

- Poste n°1 (P1) : la construction des bâtiments (résidentiels ou tertiaires), des voiries et des réseaux divers. P1 comporte comme sous-postes :
 - la fabrication, l'acheminement et l'utilisation des matériaux pour le chantier des bâtiments (SP 1.1) ;
 - les coûts de viabilisation des zones urbanisées (SP 1.2) ;
 - le changement d'utilisation des terrains lors de la construction des bâtiments (SP 1.3) ;

- Poste n°2 (P2) : l'exploitation des bâtiments, qui comporte comme sous-postes :
 - la consommation de chauffage des bâtiments (SP 2.1) ;
 - les coûts de maintenance et d'opération des VRD et des services publics qui desservent les bâtiments (SP 2.2) ;
- Poste n°3 (P3) : la mobilité des individus influencée par les formes urbaines (poste optionnel, non intégré dans le bilan global des émissions liées au développement territorial).

La feuille de calcul est adaptée à toute aire géographique. Des scénarios de développement territorial tant à l'échelle régionale que communale peuvent ainsi être testés. Attention, toutefois, à ce que les périmètres géographiques soient constants entre les différents scénarios comparés. On notera par ailleurs que certains facteurs d'émissions ont été calculés sur base des normes réglementaires françaises en la matière. Pour un projet étranger, il convient donc d'adapter les valeurs des facteurs d'émissions.

L'horizon temporel est similaire à celui des autres feuilles de calcul, à savoir chaque année d'ici à 2050.

4.7.4 Principe et fonctionnement

La partie « Développement territorial » de CarbOptimum[®] est constituée de deux onglets :

- Un onglet *developpement_territorial* : il s'agit du calculateur en tant que tel ;
- Un onglet *facteurs_emission* qui regroupe dans une base de données l'ensemble des facteurs d'émission utilisés dans le calculateur (numérotés de A à M¹⁹⁸).

4.7.5 L'onglet *developpement_territorial*

4.7.5.1 Procédures, étapes de calcul et aperçu général de la structure de l'onglet

0. Avant toute utilisation de l'onglet, l'utilisateur doit effectuer des calculs préalables pour définir les valeurs des données d'entrée;

1. Ensuite, l'utilisateur encode dans les cases grisées les valeurs des 5 inputs nécessaires à l'ensemble des calculs et, s'il le souhaite, les valeurs des 4 inputs bonus.



Il peut :

- Soit encoder les valeurs de ces inputs pour 2005 et 2035, puis l'outil calcule les valeurs des inputs pour les années intermédiaires sur base d'extrapolations linéaires.
 - ➔ Exemple sur la figure ci-dessous avec l'encodage des valeurs de l'input n°1 :
 - En gris : valeurs encodées par l'utilisateur ;
 - En blanc : valeurs calculées automatiquement par l'outil ;

—Input n°1-Structure détaillée du parc bâti dans le scénario de référence

| | Surfaces résidentielles | | | Surfaces tertiaires | | |
|--|-------------------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|
| | [2006-2013] | [2013-2020] | [2020-2035] | [2006-2012] | [2012-2020] | [2020-2035] |
| Construction (m ² SHON) | 10 | 20 | 30 | 4 | 5 | 3 |
| Rénovation du parc (m ² SHON) | 0 | 50 | 60 | 10 | 20 | 5 |
| Démolition (m ² SHON) | 5 | 2 | 1 | 10 | 2 | 3 |

| Surfaces résidentielles | 2005 | 2035 |
|---------------------------------|-------|-------|
| Total m ² SHON | 1 410 | 1 462 |
| < 1949 m ² SHON | 10 | 0 |
| [1949-1974] m ² SHON | 200 | 92 |
| [1975-1981] m ² SHON | 300 | 300 |
| [1982-1998] m ² SHON | 400 | 400 |
| [1999-2005] m ² SHON | 500 | 500 |
| [2006-2013] m ² SHON | - | 10 |
| [2013-2020] m ² SHON | - | 70 |
| [2020-2035] m ² SHON | - | 90 |

| Surfaces tertiaires | 2005 | 2035 |
|---------------------------------|------|------|
| Total m ² SHON | 500 | 524 |
| Avant 2005 m ² SHON | 500 | 450 |
| [2006-2012] m ² SHON | - | 14 |
| [2012-2020] m ² SHON | - | 25 |
| [2020-2035] m ² SHON | - | 35 |

- Soit encoder les valeurs de ces inputs de manière plus fine (s'il possède des données plus détaillées), pour chaque année entre 2005 et 2035.
 - ➔ Exemple sur la figure de la page suivante avec l'encodage des valeurs de l'input n°1 : l'utilisateur a encodé lui-même les surfaces du parc bâti de référence pour toutes les années

¹⁹⁸ Cf phase 2 de la présente étude

| | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Total | 1 410 | 1 411 | 1 411 | 1 412 | 1 413 | 1 414 | 1 414 | 1 415 | 1 418 | 1 420 | 1 423 |
| < 1949 | 10 | 9 | 9 | 8 | 7 | 6 | 6 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| [1949-1974] | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 198 | 190 | 183 |
| [1975-1981] | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| [1982-1998] | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| [1999-2005] | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| [2006-2013] | 0 | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| [2013-2020] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 20 | 30 |
| [2020-2035] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|-------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|-------|--------|------|
| Total | 500 | 499 | 498 | 497 | 496 | 495 | 494 | 494 | 495 | 495 | 496 |
| Avant 2005 | 500 | 496,67 | 493,33 | 490,00 | 486,67 | 483,33 | 480,00 | 477 | 474,5 | 471,75 | 469 |
| [2006-2012] | 0 | 2,33 | 4,67 | 7,00 | 9,33 | 11,67 | 14,00 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| [2012-2020] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 6 | 9 | 13 |
| [2020-2035] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

2. L'outil convertit pour chaque année entre 2005 et 2050 ces valeurs annuelles en tonnes équivalent CO₂ par le biais de différents facteurs d'émissions¹⁹⁹.

→ Exemple avec le calcul des émissions de CO₂ pour le sous-poste 1.1 :

Lignes rouges : valeurs des facteurs d'émissions pour chaque année

Lignes vertes : résultat de la conversion de l'input en kg eq CO₂ via le facteur d'émissions

Détails des calculs masqués (par défaut) mais possibilité pour l'utilisateur d'afficher ces détails

3. Le bilan global des émissions est calculé pour l'entièreté du projet de développement territorial. Il peut également être ventilé par année ou par poste d'émissions.

La Figure 140 de la page suivante schématise cette procédure. La Figure 141, quant à elle, décrit la structure générale de la feuille de calcul *developpement_territorial* selon ces étapes de calcul.

Les résultats partiels obtenus à partir de ces facteurs d'émissions et des inputs encodés sont masqués dans l'outil, mais ils peuvent être affichés si l'utilisateur le souhaite.

¹⁹⁹ Cf phase 2 de la présente étude

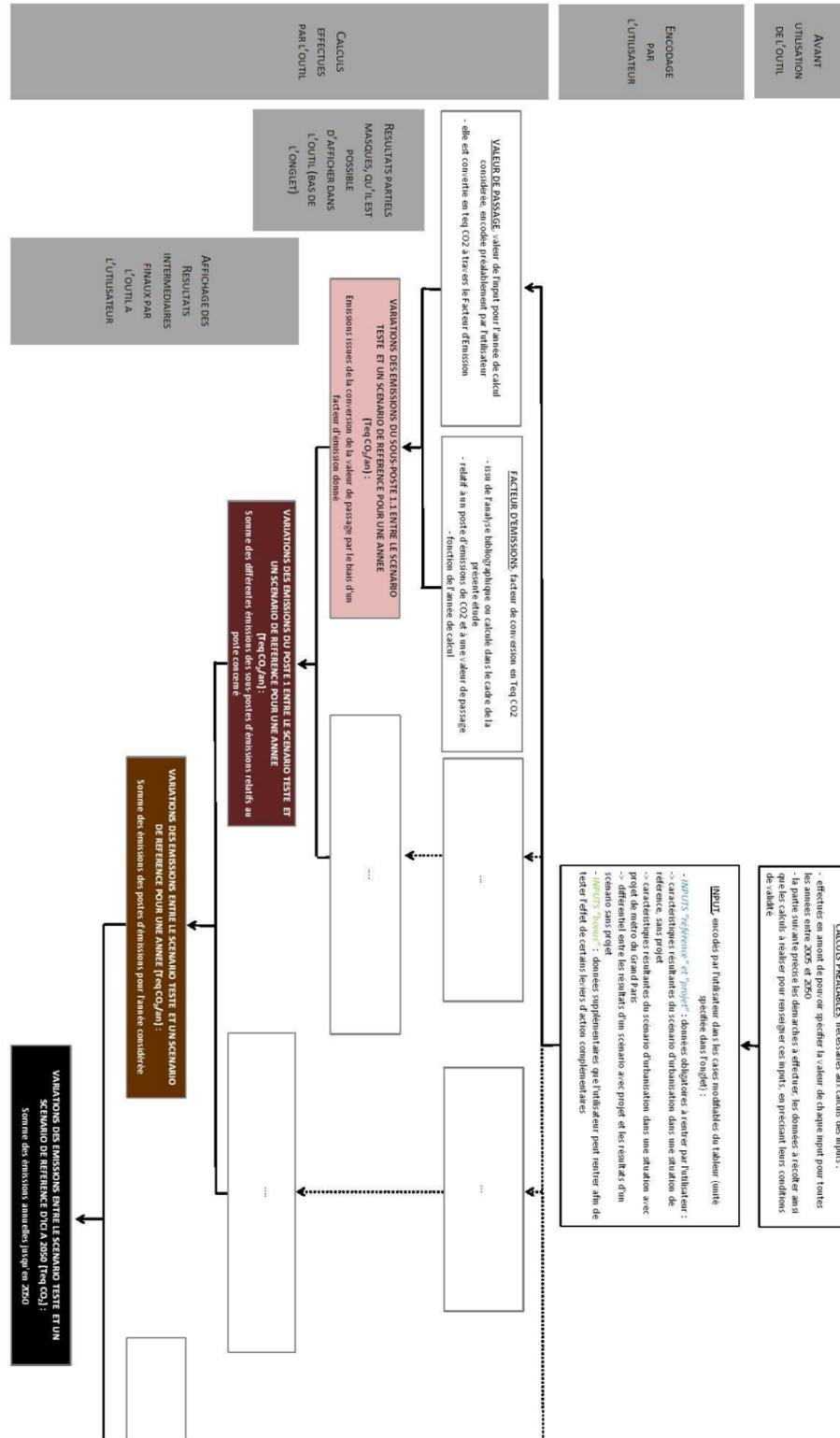


Figure 140 : Procédures et étapes de calcul de la feuille « développement territorial »

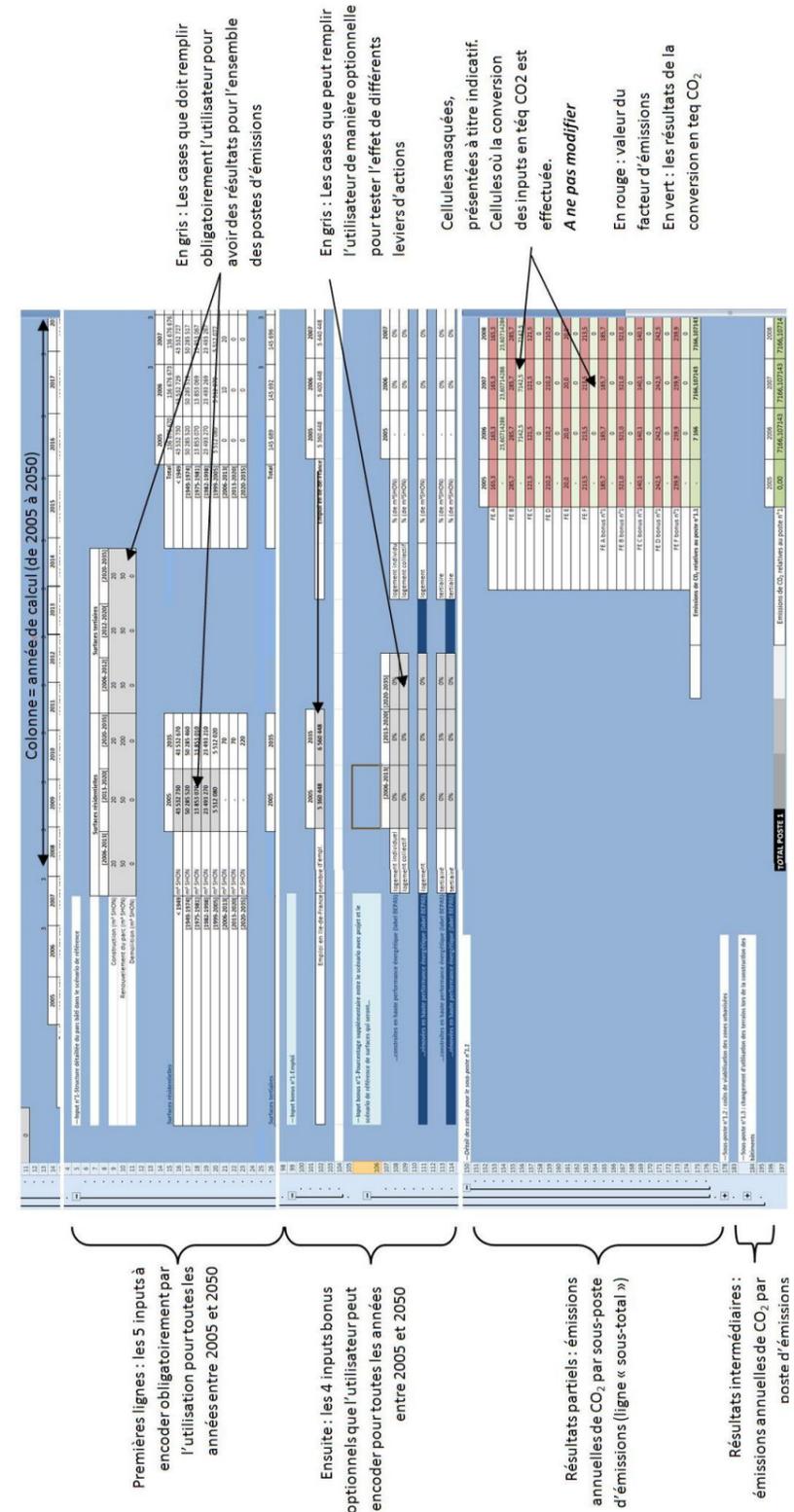


Figure 141 : Découpage de la feuille de calcul « developpement_territorial » selon les étapes de calcul

4.7.5.2 Les inputs nécessaires et optionnels

Les inputs nécessaires au calcul global des émissions de CO₂ liées au développement territorial

Le Tableau 89 reprend la liste des inputs qu'il est demandé de renseigner dans les cases grisées, soit pour les années 2005 et 2035 (puis l'outil calcule les valeurs pour les années intermédiaires), soit pour toutes les années entre 2005 et 2035. Ces inputs sont requis afin que le bilan des émissions de CO₂ liées au développement territorial puisse être calculé.

| | Description | Unité |
|------------------|--|---------------------|
| Input n°1 | Structure détaillée du parc bâti dans le scénario de référence | m ² SHON |
| Input n°2 | Actions sur le parc bâti dans le scénario avec projet par rapport à l'évolution du parc bâti dans le scénario de référence ²⁰⁰ | m ² SHON |
| Input n°3 | Pourcentage supplémentaire d'immeubles collectifs construits ou rénovés chaque année entre le scénario avec projet et le scénario de référence | % |
| Input n°4 | Longueur supplémentaire de VRD à construire pour les surfaces neuves entre le scénario avec projet et le scénario de référence | kilomètres |
| Input n°5 | Différence de surfaces rurales consommées pour l'urbanisation en extension entre le scénario avec projet et le scénario de référence | hectares |

Tableau 89 : Liste des inputs obligatoires pour la feuille de calcul « developpement_territorial »

Si l'utilisateur souhaite s'intéresser aux émissions de CO₂ d'un poste ou d'un sous-poste en particulier, il peut ne renseigner que les inputs nécessaires à ce calcul. Pour cela, il est nécessaire de se référer au Tableau 90 afin de savoir quel(s) input(s) sont nécessaires pour obtenir les résultats souhaités :

| | Input n°1 | Input n°2 | Input n°3 | Input n°4 | Input n°5 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Poste n°1 : la construction des bâtiments (résidentiels ou tertiaires), des voiries et des réseaux divers | x | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Sous-Poste 1.1 : fabrication, l'acheminement et l'utilisation des matériaux pour le chantier des bâtiments | x | ✓ | ✓ | x | x |
| Sous-Poste 1.2 : les coûts de viabilisation des zones urbanisées | x | x | x | ✓ | x |
| Sous-Poste 1.3 : le changement d'utilisation des terrains lors de la construction des bâtiments | x | x | x | x | ✓ |
| Poste n°2 : l'exploitation des bâtiments | ✓ | ✓ | x | ✓ | x |
| Sous-Poste 2.1 : la consommation de chauffage des bâtiments | ✓ | ✓ | x | x | x |
| Sous-Poste 2.2 : les coûts de maintenance et d'opération des VRD et des services publics qui desservent les bâtiments | x | x | x | ✓ | x |

✓ input requis pour le calcul des émissions du poste/sous-poste

x input non requis pour le calcul des émissions du poste/sous-poste

Tableau 90 : les inputs requis pour le calcul des émissions de CO₂ de chaque poste et sous-poste d'émissions intervenant dans le bilan global « développement territorial »

²⁰⁰ Permet de calculer automatiquement la structure détaillée du parc bâti dans le scénario avec projet, par rapport au parc défini pour la situation de référence

Les inputs bonus intervenant dans les calculs d'émissions de CO₂ liées au développement territorial

Le Tableau 91 reprend la liste des inputs « bonus » que l'utilisateur peut renseigner de manière optionnelle :

| | Description | Unité |
|------------------------|---|---|
| Input bonus n°1 | Pourcentage supplémentaire entre le scénario avec projet et le scénario de référence de surfaces résidentielles ou tertiaires qui seront construites ou rénovées en label BEPAS | % |
| Input bonus n°2 | Densité humaine nette dans le scénario avec et sans projet | Population et emploi par hectare urbanisé |
| Input bonus n°3 | Mixité fonctionnelle dans le scénario avec projet | Sans unité |
| Input bonus n°4 | Emploi en Ile-de-France | Nombre d'emplois |

Tableau 91 : Liste des inputs bonus pour la feuille de calcul « developpement_territorial »

Voici en quoi ces inputs bonus influencent le calcul²⁰¹ d'un ou de plusieurs sous-postes d'émissions :

| | Input bonus n°1 | Input bonus n°2 | Input bonus n°3 | Input bonus n°4 |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Poste n°1 : la construction des bâtiments (résidentiels ou tertiaires), des voiries et des réseaux divers | ✓ | x | x | x |
| Sous-Poste 1.1 : fabrication, l'acheminement et l'utilisation des matériaux pour le chantier des bâtiments | ✓ | x | x | x |
| Sous-Poste 1.2 : les coûts de viabilisation des zones urbanisées | x | x | x | x |
| Sous-Poste 1.3 : le changement d'utilisation des terrains lors de la construction des bâtiments | x | x | x | x |
| Poste n°2 : l'exploitation des bâtiments | ✓ | x | x | x |
| Sous-Poste 2.1 : la consommation de chauffage des bâtiments | ✓ | x | x | x |
| Sous-Poste 2.2 : les coûts de maintenance et d'opération des VRD et des services publics qui desservent les bâtiments | x | x | x | x |
| Poste n°3 : mobilité des individus influencée par les formes urbaines | x | ✓ | ✓ | ✓ |

✓ input bonus intervenant dans le calcul des émissions du poste/sous-poste

x input bonus n'ayant pas d'effet sur le calcul des émissions du poste/sous-poste

Tableau 92 : l'intervention des inputs bonus dans le calcul des émissions de CO₂ de chaque poste et sous-poste d'émissions intervenant dans le bilan global « développement territorial »

Remarque : le poste n°3 permet une analyse de sensibilité optionnelle de l'effet de la mixité et de la densité sur la mobilité des individus et des émissions induites. Ces émissions ne sont pas comptabilisées dans le bilan final « développement territorial »

²⁰¹ Pour plus de détails sur l'influence de ces inputs bonus, se référer à la phase 2 de la présente étude

4.7.5.3 Préalables : comment calculer ces inputs ?

Les inputs nécessaires au calcul global des émissions de CO₂ liées au développement territorial

Les valeurs de ces inputs sont issues de calculs préalables effectués par l'utilisateur. Ces calculs relèvent d'un exercice de définition d'un scénario d'urbanisation dans une situation avec et sans projet. Concrètement, cet exercice définit la construction à proprement parler des scénarios d'occupation du sol avec ou sans projet et des hypothèses sous-jacentes telles que la densité, la localisation de la construction, etc.

Nous décrivons ici les grandes étapes méthodologiques de ces calculs préalables. La méthodologie proposée s'inspire des travaux réalisés lors de l'Évaluation Stratégique Environnementale du métro du Grand Paris (Société du Grand Paris, 2009-2010). Ces travaux ont été affinés par la suite pour les besoins de l'Évaluation socio-économique (Société du Grand Paris, 2010). La méthode est détaillée en annexe. Il faut toutefois garder à l'esprit que ce ne sont que les grandes lignes d'un travail dont les hypothèses seront approfondies et affinées dans le cadre de la phase 2 des études d'impact du réseau de transport public du Grand Paris.

L'ensemble de la démarche de cet exercice s'appuie sur la construction de structures d'urbanisation permettant de définir un niveau d'augmentation potentielle du COS²⁰², appelé « ΔCOS », pour un type de surface constructible donné (urbain construit, urbain ouvert, rural) selon sa localisation et la situation étudiée à l'horizon 2035 (avec ou sans projet). Les hypothèses de construction/densification qui en découlent sont ensuite implémentées dans une boîte à outils basée sur l'utilisation d'un Système d'Information Géographique. De manière générale, l'approche méthodologique utilisée est basée sur trois hypothèses fortes :

- l'évolution de la population (P) et de l'emploi (E) à l'horizon 2035 ;
- la conversion de ces ΔP+E en ΔSHON ;
- les hypothèses d'application des ΔCOS sur le mode d'occupation du sol actuel.

Les deux premières hypothèses permettent d'estimer les besoins en SHON nécessaires à l'accueil des P+E par scénario. La troisième hypothèse est sous-jacente à l'évaluation de la capacité d'accueil des territoires aux ΔP+E définis par scénario.

Sur base de cette démarche, il est ainsi possible :

- d'estimer l'évolution des capacités SHON d'ici à 2035 par scénario ;
- d'en déduire la capacité d'accueillir les SHON nécessaires aux besoins des nouveaux habitants et des nouveaux emplois à venir selon le scénario ;
- de comparer l'évolution des capacités SHON d'ici à 2035 des deux scénarios après absorption des surfaces nécessaires à l'accueil de la population et de l'emploi nouveaux ;
- de traduire cette différence en termes architecturaux et urbains : typologies de parcellaire, hauteur moyenne des bâtiments construits, variation de la consommation des espaces ruraux, etc.

Et ainsi de calculer les valeurs des 5 inputs nécessaires aux calculs.

Les inputs bonus intervenant dans les calculs d'émissions de CO₂ liées au développement territorial

Pour calculer l'indicateur de densité d'activité humaine nette (population et emploi rapportés aux superficies urbanisées) pour les deux scénarios 2035, l'utilisateur doit :

4. Calculer l'emprise des surfaces urbanisées dans la zone d'étude à l'heure actuelle (à l'aide d'un SIG et du mode d'occupation du sol) ;
5. Calculer l'emprise des surfaces urbanisées dans la zone d'étude en 2035 en sommant les surfaces actuelles (point 1) aux espaces ruraux consommés pour l'extension nouvelle d'ici à 2035 pour chaque scénario ;
6. Diviser le volume de population et d'emploi défini dans la zone d'étude à l'horizon 2035 (pour le scénario donné) par l'emprise de surfaces urbanisées calculée au point 2.

Au sujet de la mixité fonctionnelle, l'Université de Liège a développé 2 méthodes de calcul²⁰³ de cet indicateur : l'une à l'échelle globale, l'autre plus adaptée à l'échelle locale. Dans la présente étude, la seconde méthode sera préconisée pour le calcul de cet input bonus. Elle consiste en un calcul de la mixité comme un ratio de diversité d'occupation du sol à partir d'un maillage du territoire (100m x 100m par exemple²⁰⁴). En fait, pour chaque maille de la zone étudiée, il s'agit de calculer un indicateur de « richesse relative »²⁰⁵ de la diversité du tissu. Celui-ci correspond aux différents types d'usages du sol que l'on retrouve dans la maille en question. La somme des indicateurs de richesse de chaque maille donne l'indicateur de mixité fonctionnelle de la zone étudiée. Concrètement, pour calculer cet input, l'utilisateur peut calculer l'indicateur de richesse relative actuel à l'aide d'un SIG. A partir de cette valeur, et en croisant les caractéristiques de l'évolution de l'occupation du sol qu'il aura définies à l'horizon 2035, il peut calculer la mixité fonctionnelle dans le scénario avec et sans projet.

Comment calculer la valeur de ces inputs année après année entre 2005 et 2035 ?

Pour calculer les valeurs annuelles de ces inputs, il faut se référer à une courbe d'évolution du parc bâti au fil du temps afin de répartir les surfaces supplémentaires construites, rénovées ou démolies d'ici à 2035 avec projet sur chaque année entre aujourd'hui et 2035.

La difficulté majeure de cet exercice réside dans le fait que cette évolution sera intimement liée aux dates de mise en application des CDT qui, aujourd'hui, sont encore incertaines. Il est toutefois possible de retenir 4 hypothèses fortes pour construire cette courbe d'évolution :

5. par souci de simplification, on peut supposer que les rythmes de construction, de rénovation et de démolition-reconstruction suivront la même courbe d'évolution et, ce, de la même manière pour les surfaces résidentielles et tertiaires ;
6. il est considéré que les CDT rentreront en vigueur en même temps que la mise en service de chaque tronçon du métro qui traverse ces territoires. Il y aura une forte accélération du rythme de construction/rénovation/démolition sur ces territoires dès la mise en service de chaque tronçon.
7. toutefois, un peu avant la mise en service de chaque tronçon, nous considérerons qu'il y aura un effet « d'anticipation » naturel du rythme de construction. On observera certainement une hausse progressive du rythme de construction/rénovation/démolition à partir de 2020. Toutefois, cette hausse peut être considérée comme relativement faible²⁰⁶.
8. On suppose que l'accroissement du rythme de construction/rénovation/démolition du parc bâti dû au projet aura des effets jusqu'en 2035.

²⁰³ Source : Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des gaz à effets de serre, LEPUR, Université de Liège

²⁰⁴ Le maillage sera à définir durant les calculs préalables effectués dans le cadre des études d'impact.

²⁰⁵ Forman, R.T.T. (1995). Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions, Cambridge University Press, Cambridge, UK

²⁰⁶ Hypothèse basée sur la thèse : Évaluation économique d'une infrastructure de transport en milieu urbain, Le cas du tramway T2 Val de Seine, E. Boucq, 2004.

²⁰² « Le coefficient d'occupation du sol qui détermine la densité de construction admise est le rapport exprimant le nombre de mètres carrés de plancher hors œuvre nette ou le nombre de mètres cubes susceptibles d'être construits par mètre carré de sol. » (Source : premier alinéa de l'article R 123-10 du Code de l'urbanisme)

On peut d'ores et déjà souligner le fait que la définition de cette courbe aura un rôle important dans les résultats des variations d'émissions de CO₂ obtenus. En effet, comme vu précédemment, l'accélération du renouvellement du parc a des effets tout au long du cycle de vie des bâtiments :

- en phase construction, elle engendre des émissions de GES plus importantes étant donné que la démolition/reconstruction ou la rénovation nécessitent des techniques et des matériaux plus dépensiers en énergie.
- durant l'exploitation du bâtiment, elle permet une réduction des consommations puisque le bâtiment a une isolation plus performante du fait du caractère évolutif de la réglementation thermique.

Ainsi, plus les surfaces supplémentaires construites avec projet seront créées tôt dans le temps, plus tôt la période de retour sur investissement sera atteinte. Par ailleurs, la variation annuelle du pourcentage d'immeubles collectifs construits suivra cette courbe d'évolution. La variation annuelle des longueurs de VRD construits et des espaces ruraux consommés entre les scénarios avec et sans projet évoluera proportionnellement à cette courbe, mais de manière décalée dans le temps. En effet, pour qu'une parcelle puisse être constructible, il faut d'abord qu'elle soit viabilisée, c'est-à-dire desservie par des voiries, un réseau de distribution d'eau, d'électricité, etc.

Si les valeurs annuelles des inputs ne sont pas spécifiées par l'utilisateur, l'outil calcule automatiquement :

- les m² du parc bâti avec et sans projet sur base des tendances de construction/rénovation/démolition spécifiées obligatoirement par l'utilisateur pour 3 périodes : 2006-2012/2013 ; 2012/2013-2020 ; 2020-2035 ;
- les pourcentages supplémentaires d'immeubles collectifs construits/rénovés pour ces 3 périodes en supposant ce pourcentage constant au cours du temps ;
- les kilomètres de VRD nouveaux construits et les hectares ruraux consommés chaque année à partir du total spécifié pour 2035 et selon le même rythme que la construction des m² résidentiels et tertiaires nouveaux

4.7.6 L'onglet *facteurs_emissions*

Cet onglet regroupe dans une base de données les principaux facteurs d'émission utilisés dans CarbOptimum® (numérotés de A à M).

Les valeurs affichées dans l'onglet *facteurs_emissions* sont issues de calculs effectués dans une feuille masquée appelée *Calculs_FE_ADT*. Les valeurs retenues et les méthodes de calcul associées ont fait l'objet des précédents rapports de l'étude.

Par mesure de précaution, il est fortement recommandé de ne pas modifier les valeurs des cellules de l'onglet *facteurs_emission*. Toutefois, si l'utilisateur souhaite affiner les valeurs annuelles d'un ou de plusieurs facteurs d'émissions, il peut effectuer ses nouveaux calculs dans la feuille *Calculs_FE_ADT* à la place des anciennes valeurs. Les valeurs résultantes des facteurs d'émissions se changent automatiquement dans l'onglet *developpement_territorial*. Attention : les valeurs initiales ne sont pas remises par défaut. Toute modification des valeurs des facteurs d'émissions entraîne la perte de celles-ci.

4.8 Onglets *synthèse* et *analyse résultats*

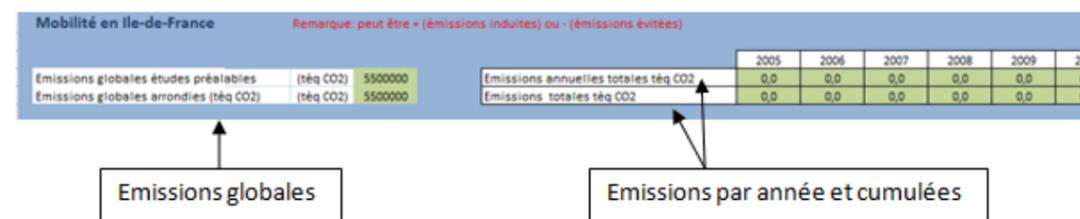
Ces deux onglets permettent d'avoir à la fois une vision globale du projet au fil du temps, mais aussi un aperçu par thématique. Il n'y a pas à saisir de données dans ces onglets.



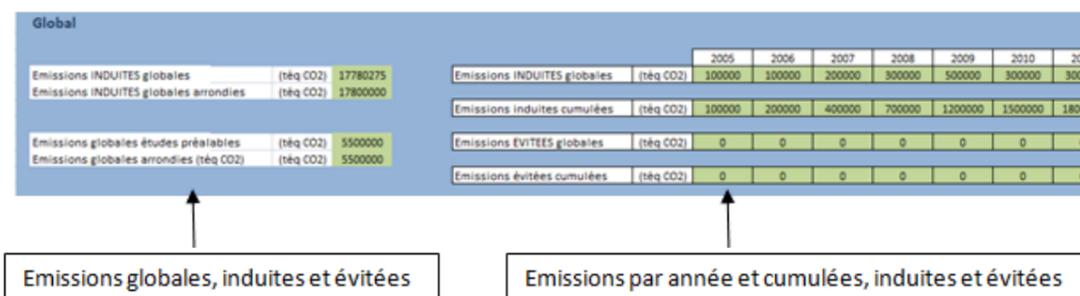
4.8.1 Onglet *synthèse*

L'onglet *synthèse* reprend et compile les données obtenues dans les différentes feuilles thématiques. Les résultats y sont repris par thématique, de façon globale et par année, mais aussi de façon générale avec le cumul des émissions de chaque thématique au cours des années.

Emissions par thématique :



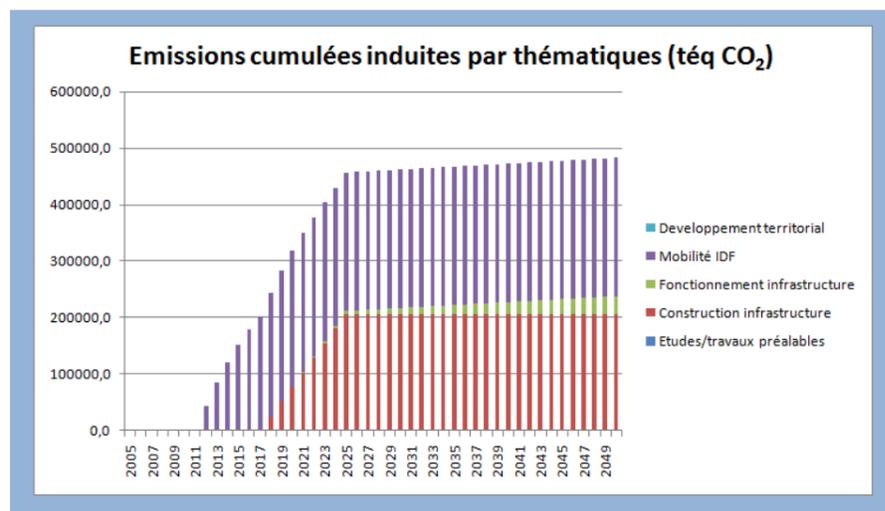
Emissions globales :



4.9 Onglet *analyse résultats*

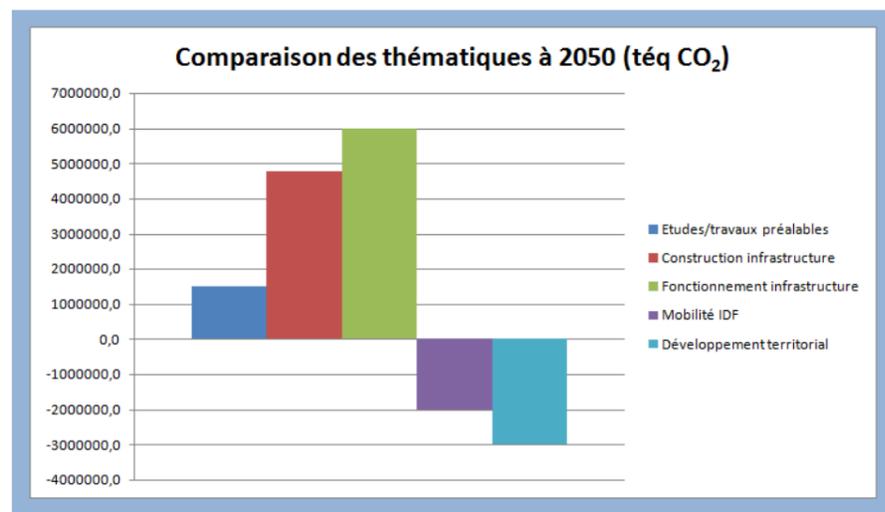
Dans cet onglet sont repris les résultats de l'onglet *synthèse* sous forme graphique. On y retrouve le cumul des émissions des différentes thématiques, induites puis évitées, ainsi qu'une comparaison des émissions induites (+) ou évitées (-) par chaque poste à l'horizon 2050. Voici à titre d'exemples ce qu'il pourrait être obtenu.

- Les émissions cumulées induites par thématique

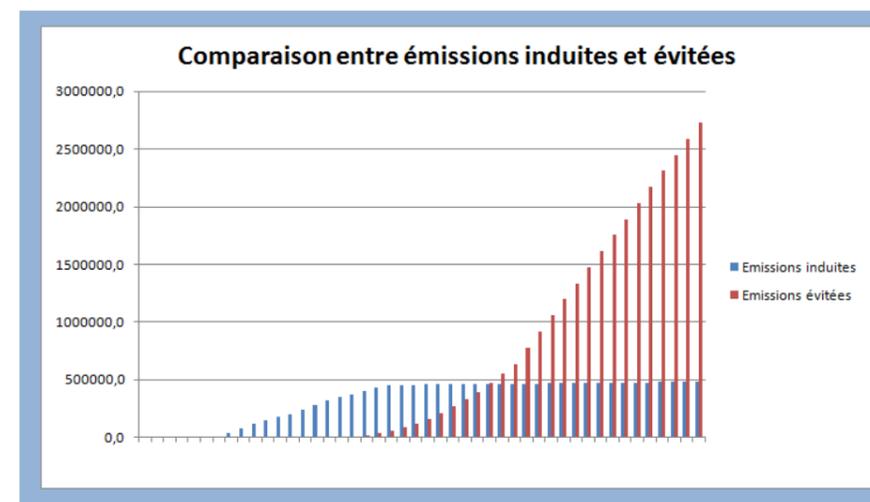


- La comparaison des thématiques à l'horizon 2050 reprend le résultat cumulé des émissions de 2005 à 2050 de chaque thématique (Ici, présentation de l'origine de la valeur pour la mobilité IDF).

| Mobilité en Ile-de-France | | Remarque: peut être + (émissions induites) ou - (émissions évitées) | | | | | | | | | |
|---|------------------------|---|------|------|------|-----|----------|----------|--|--|--|
| | (tég CO ₂) | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | ... | 2049 | 2050 | | | |
| Emissions globales études préalables | 5705000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | ... | 200000,0 | 5000,0 | | | |
| Emissions globales arrondies (tég CO ₂) | 5710000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | ... | 200000,0 | 200000,0 | | | |



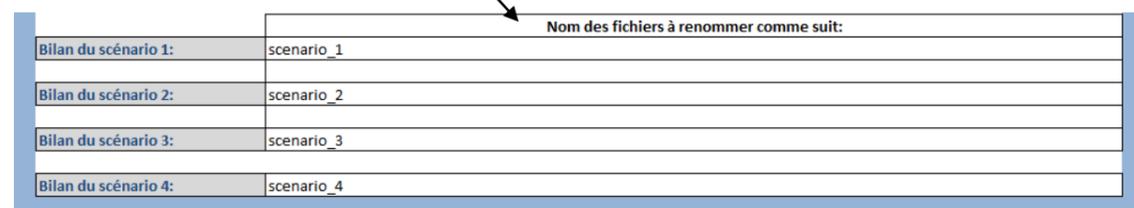
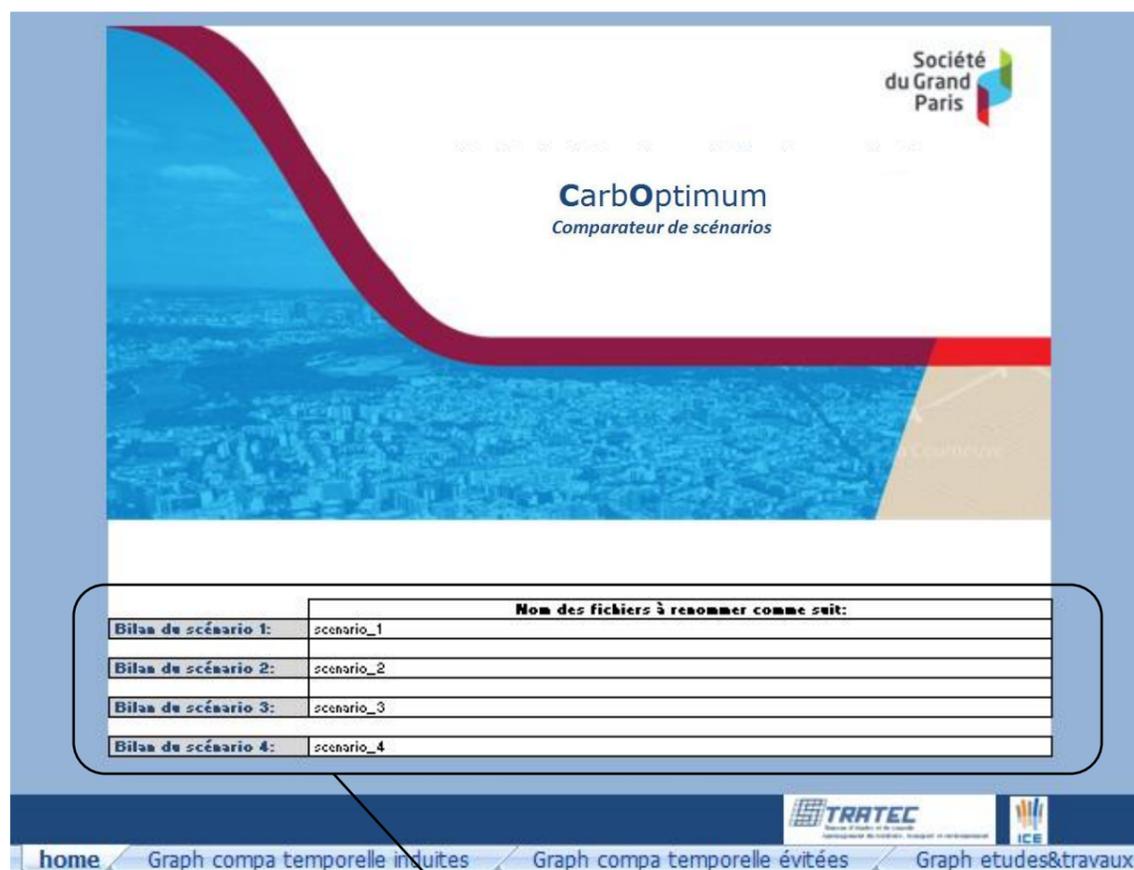
- La comparaison entre le cumul des émissions induites et le cumul des émissions évitées



4.10 Outil « comparateur de scénarios »

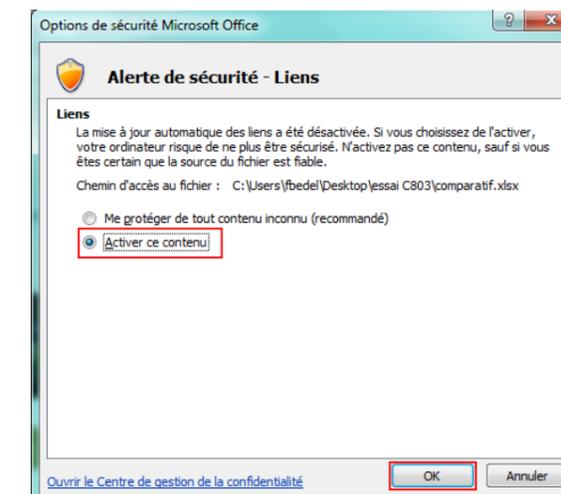
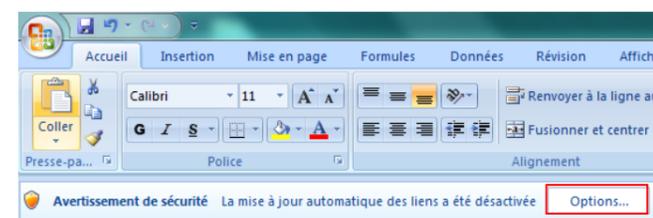
Cet outil permet de comparer jusqu'à 4 scénarios, de façon simple car visuelle. Tout d'abord, il faut disposer de 2 à 4 tableurs *Bilan des émissions de GES spécifique au projet de Réseau de transport public du Grand Paris*. Ces tableurs seront les scénarios à comparer et doivent se nommer comme suit afin d'être reconnus et utilisés par l'outil : *scenario_1* , *scenario_2* , *scenario_3* , *scenario_4* . Enfin, ces scénarios et l'outil *Analyse comparative des scénarios* doivent se trouver dans un même dossier.

La page d'accueil *home* de l'outil reprend les noms à attribuer aux fichiers.



Si la comparaison ne se fait qu'entre deux ou trois scénarios, il convient alors de placer des scénarii vides (valeurs à zéro) reprenant le numéro des scénarios non utilisés : *scenario_4* (et éventuellement *scenario_3*). Ce fichier vide est fourni.

Une fois les fichiers renommés afin qu'ils soient compatibles avec l'outil, ouvrir le comparateur et mettre à jour les valeurs. Pour cela, à l'ouverture du fichier, cliquer comme ci-dessous :

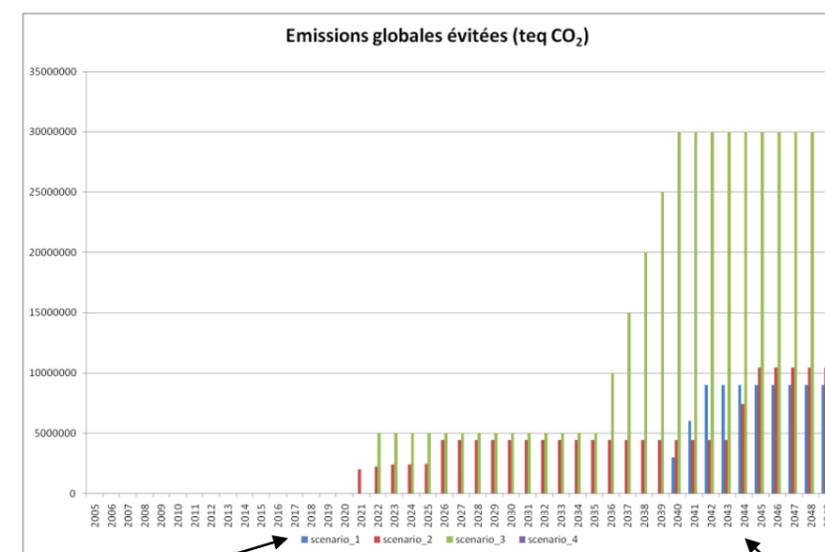


Les valeurs sont automatiquement mises à jour dans les onglets de données, *compa_thematique_resultats* et *compa_temporelle_resultats*. Aucune donnée n'est à entrer à la main.

Les résultats présents dans l'onglet *synthèse* des différents fichiers de scénario sont alors comparer. Les graphiques obtenus sont les suivants :

- Emissions globales induites (teq CO₂)
- Emissions globales évitées (teq CO₂)
- Comparaison entre émissions induites et évitées (teq CO₂)
- Emissions induites et évitées pour chaque thématique (teq CO₂): études et travaux préalables à la construction, construction de l'infrastructure, fonctionnement de l'infrastructure, mobilité en Ile-de-France, et développement territorial

Voici un exemple de graphique produit :



Différents scénarios

Années : 2005-2050

5. Annexes

Fiches analytiques des méthodologies d'évaluation des émissions de GES existantes

1. Bilan Carbone®
2. GHG Protocol
3. Analyse des émissions des projets AFD
4. GHG Indicator
5. Méthodologie Defra
6. GEMIS
7. Climate Registry Protocol
8. Baromètre carbone des CDT
9. Enerter
10. Indicator ECO₂ Climat
11. Base de données INIES
12. GES SCoT
13. Omega TP
14. Calculateur LGV

| | | | |
|---|---|-----------------|---------------|
| Nom : | Bilan Carbone® | | |
| Organisme : | Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) | | |
| Objectifs : | Calcul des émissions de gaz à effet de serre engendrées par les activités productrices de biens ou de services (entreprises ou collectivités) ainsi que toutes les activités d'un territoire. | | |
| Site web : | www.ademe.fr/bilan-carbone | | |
| Cible géographique: | France et Europe | | |
| Cible sectorielle: | | | |
| Particuliers : | Entreprises : | Collectivités : | Territoires : |
| x | ✓ | ✓ | ✓ |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversions proposés : | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | | ✓ | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | | ✓ | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | | ✓ | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | | ✓ | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | | indirectement | |
| Type de support : | logiciel de calcul sous format Excel. | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | détaillé (Guide des facteurs d'émissions) | | |
| Références : | GDF Suez, Ports de Paris, Réseau Ferré de France,... | | |
| Commentaires : | Méthodologie très complète permettant de tenir compte des consommations énergétiques, des intrants et emballages, du fret, des déplacements, des déchets, des bâtiments, des routes et autres infrastructures de transport,... Désavantages : le modèle est surtout conçu pour l'évaluation actuelle des émissions et peu pour l'évaluation de projets sur le long terme. Les coefficients n'évoluent pas dans le temps et la grille de calcul ne permet pas d'actualiser les valeurs dans le temps. Il n'y a pas non plus de fonction directe permettant la comparaison de plusieurs scénarios futurs. | | |

Fiche 1

| | | | |
|---|---|---------------|-----------------|
| Nom : | GHG Protocol | | |
| Organismes : | World Resources Institute World Business Council for Sustainable Development | | |
| Objectifs : | Calcul des émissions de GES engendrées par le transport, les consommations énergétiques et la production d'une série de matériaux. Les outils sont destinés principalement aux entreprises de grande taille et aux gouvernements. | | |
| Site web : | www.ghgprotocol.org | | |
| Cible géographique: | Monde entier | | |
| Cible sectorielle: | | | |
| | Particuliers : | Entreprises : | Collectivités : |
| | x | ✓ | x |
| | | | Territoires : |
| | | | ✓ |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversion proposés : | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | | indirectement | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | | partiellement | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | | ✓ | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | | ✓ | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | | x | |
| Type de support : | Suite de tableurs sous format Excel spécifiques aux différentes thématiques. La méthodologie propose également un grand nombre de protocoles écrits destinés à guider les entreprises et les gouvernements dans l'évaluation des émissions de CO ₂ . Ces documents font office de référence dans le monde entier et ont servi de base au développement de la plupart des autres méthodologies. | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | Référéncé | | |
| Références : | General Motors, Holcim, Dell, IKEA, ... | | |
| Commentaires : | Méthodologie couvrant un nombre restreint de secteurs mais de façon détaillée. Elle pourra donc être utilisée notamment en ce qui concerne : le transport, les consommations énergétiques et l'utilisation des matériaux suivants : l'aluminium, l'acier, le ciment, la chaux et le papier. Les protocoles proposés permettront également de définir les lignes directrices de la méthodologie et de vérifier l'adéquation avec ce qui est considéré comme une référence internationale en matière d'évaluation des émissions de CO ₂ . Le modèle est par contre aussi conçu pour l'évaluation actuelle des émissions et peu pour l'évaluation de projets sur le long terme. | | |

Fiche 2

| | | | |
|---|---|---------------|-----------------|
| Nom : | Analyse des émissions des projets AFD | | |
| Organisme : | Agence Française de Développement (AFD) | | |
| Objectifs : | Quantifier les émissions des projets et permettre d'approfondir l'analyse des possibilités de réduction des émissions. Outil destiné principalement aux personnes devant évaluer la pertinence de projets de développement. | | |
| Site web : | www.afd.fr | | |
| Cible géographique: | Monde entier | | |
| Cible sectorielle: | | | |
| | Particuliers : | Entreprises : | Collectivités : |
| | x | ✓ | ✓ |
| | | | Territoires : |
| | | | ✓ |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversion proposés : | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | | x | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | | ✓ | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | | ✓ | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | | Indirectement | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | | ✓ | |
| Type de support : | Tableur Excel. | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | Bien référencé. Les coefficients sont principalement extraits de la méthode Bilan Carbone de l'ADEME | | |
| Références : | Projets de l'AFD | | |
| Commentaires : | Méthodologie fortement inspirée du Bilan Carbone de l'ADEME mais adaptée aux spécificités des projets de développement. La méthodologie permet d'analyser l'évolution des émissions au cours du temps et d'évaluer la pertinence des projets sur le long terme. | | |

Fiche 3

| Nom : | | GHG Indicator | | | |
|---|--|--|--|-----------------|--|
| Organisme : | | United Nations Environment Programme (UNEP) | | | |
| Objectifs : | | Outil de calcul et directives pour l'estimation des émissions de GES destinés aux entreprises et aux organisations non-commerciales. Les directives sont aussi destinées aux gouvernements comme support au développement d'une méthodologie propre. | | | |
| Site web : | | www.unep.fr/energy/information/tools/ghg/ | | | |
| Cible géographique: | | Monde entier | | | |
| Cible sectorielle: | | | | | |
| Particuliers : | | Entreprises : | | Collectivités : | |
| x | | ✓ | | ✓ | |
| Territoires : | | x | | | |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversion proposés : | | | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | | indirectement | | | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | | ✓ | | | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | | ✓ | | | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | | indirectement | | | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | | x | | | |
| Type de support : | | Tableur Excel simple qui se complexifie au fur et à mesure que des thématiques sont ajoutées (création automatique de nouvelles pages). | | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | | Référéncé | | | |
| Références : | | Body Shop, Fiat, ING Group, Unilever, ... | | | |
| Commentaires : | | Méthodologie développée et approuvée par les Nations Unies et faisant office de référence internationale. Elle couvre cependant principalement les consommations énergétiques (transport, chauffage,...) et n'offre que peu de possibilités par rapport aux émissions liées à l'utilisation de matériaux de construction, à l'utilisation d'intrants divers ou à la gestion des déchets. | | | |

Fiche 4

| Nom : | | Méthodologie Defra | | | |
|---|--|--|--|-----------------|--|
| Organisme : | | Department for Environment Food and Rural Affairs (UK) (Defra) | | | |
| Objectifs : | | Méthodologie destinée à guider les entreprises et organisations de toutes tailles dans l'évaluation des émissions de GES liées à leurs activités. | | | |
| Site web : | | www.defra.gov.uk/publications/tag/greenhouse-gas-emissions/ | | | |
| Cible géographique: | | Royaume-Uni | | | |
| Cible sectorielle: | | | | | |
| Particuliers : | | Entreprises : | | Collectivités : | |
| x | | ✓ | | ✓ | |
| Territoires : | | x | | | |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversion proposés : | | | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | | indirectement | | | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | | ✓ | | | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | | ✓ | | | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | | indirectement | | | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | | indirectement | | | |
| Type de support : | | La méthodologie est surtout proposée sous forme d'un guide écrit (Guidance on how to measure and report your greenhouse gas emissions) pour le développement d'une méthodologie propre à chaque entreprise. Ce guide est cependant accompagné d'un recueil de nombreux facteurs d'émissions (Guidelines to Defra/DECC's GHG conversion factors for company reporting) sous format Excel et permettant des calculs simples d'émissions. | | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | | Détaillé | | | |
| Références : | | Non précisées | | | |
| Commentaires : | | Bien que la méthodologie ne propose pas un outil complexe de calcul des émissions, elle propose de nombreux facteurs de conversions définis sur base de références nationales et internationales fiables. Les domaines couverts sont non seulement les consommations d'électricité, de gaz et de pétrole mais aussi les émissions liées aux intrants divers, aux matériaux de construction ou encore à la gestion des déchets. | | | |

Fiche 5

| Nom : | Global Emission Model of Integrated Systems (GEMIS) | | | | | | | | | | |
|---|---|-----------------|---------------|----------------|---------------|-----------------|---------------|---|---|---|---|
| Organisme : | Öko-Institute.V.Institute for Applied Ecology (Germany) | | | | | | | | | | |
| Objectifs : | Outil de calcul permettant l'analyse détaillée des émissions de GES liées à un grand nombre de processus de transport, de consommation énergétique ou de production de différents matériaux et produits. L'outil peut être utilisé par tous les types d'entreprises, par les collectivités ou par les particuliers. La méthode a la particularité de proposer un détail très précis de toutes les émissions liées au processus étudié et de pouvoir servir comme outil d'aide à la décision grâce à un système de comparaison de différentes situations. | | | | | | | | | | |
| Site web : | www.gemis.de | | | | | | | | | | |
| Cible géographique: | Elle est fonction des références choisies mais globalement très internationale. La majorité des références sont allemandes mais il y a également de nombreuses références provenant des autres pays européens, d'Australie, des USA,... | | | | | | | | | | |
| Cible sectorielle: | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Particuliers :</th> <th>Entreprises :</th> <th>Collectivités :</th> <th>Territoires :</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">✓</td> <td style="text-align: center;">✓</td> <td style="text-align: center;">✓</td> <td style="text-align: center;">✗</td> </tr> </tbody> </table> | | | Particuliers : | Entreprises : | Collectivités : | Territoires : | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |
| Particuliers : | Entreprises : | Collectivités : | Territoires : | | | | | | | | |
| ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | | | | | | | | |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversion proposés : | | | | | | | | | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | ✓ | | | | | | | | | | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | ✓ | | | | | | | | | | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | ✓ | | | | | | | | | | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | indirectement | | | | | | | | | | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | ✗ | | | | | | | | | | |
| Type de support : | Logiciel exécutable sous Microsoft Windows. | | | | | | | | | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | Détaillé | | | | | | | | | | |
| Références : | Non précisées | | | | | | | | | | |
| Commentaires : | Méthodologie très complète qui permet une analyse détaillée des flux de CO ₂ liés à un grand nombre de processus de transport, de consommation énergétique ou de production de différents matériaux et produits. Elle tient compte et se base sur l'entièreté du cycle de vie des matériaux. Grâce à un système de hiérarchisation des processus, elle permet l'évaluation des émissions liées à des processus complexes par addition de tous les processus sous-jacents. Le bilan final d'un processus peut alors être décomposé entre toutes les émissions primaires qui sont induites. La définition de différents scénarios permet également la comparaison entre plusieurs solutions ou situations de projet. | | | | | | | | | | |

Fiche 6

| Nom : | The Climate Registry Protocol | | | | | | | | | | |
|---|--|-----------------|---------------|----------------|---------------|-----------------|---------------|---|---|---|---|
| Organisme : | The Climate Registry | | | | | | | | | | |
| Objectifs : | The Climate Registry est une organisation issue de la collaboration entre de nombreux états nord-américains (Etats-Unis et Canada) qui a pour objectif de rassembler dans une même base de données, les bilans d'émissions de CO ₂ d'un maximum d'entreprises et d'organismes du territoire. Cette base de données rassemble de nombreuses initiatives émanant des états membres dont le California Climate Action Registry. Les sites web du Climate Registry et du California Climate Action Registry permettent aux entreprises et aux organismes d'évaluer leurs émissions de CO ₂ et de les reporter dans le registre des émissions. Bien que l'outil de calcul online soit principalement destiné à l'introduction des données dans le registre, les sites proposent également de nombreux guides d'évaluation des bilans d'émissions tant du point de vue général (general reporting protocol) que du point de vue spécifique à certaines thématiques : production d'électricité (power generation utility reporting protocol), production de carburants (oil and gas production protocol) et production de ciment (cement reporting protocol). | | | | | | | | | | |
| Site web : | www.theclimateregistry.org (et www.climateregistry.org) | | | | | | | | | | |
| Cible géographique: | Amérique du nord | | | | | | | | | | |
| Cible sectorielle: | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Particuliers :</th> <th>Entreprises :</th> <th>Collectivités :</th> <th>Territoires :</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">✗</td> <td style="text-align: center;">✓</td> <td style="text-align: center;">✓</td> <td style="text-align: center;">✓</td> </tr> </tbody> </table> | | | Particuliers : | Entreprises : | Collectivités : | Territoires : | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Particuliers : | Entreprises : | Collectivités : | Territoires : | | | | | | | | |
| ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | | | |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversion proposés : | | | | | | | | | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | indirectement | | | | | | | | | | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | ✓ | | | | | | | | | | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | ✓ | | | | | | | | | | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | indirectement | | | | | | | | | | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | ✗ | | | | | | | | | | |
| Type de support : | Outil online et guides méthodologiques | | | | | | | | | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | Référéncé | | | | | | | | | | |
| Références : | Plus de 400 entreprises, organismes et autorités gouvernementales (ex : city of Seattle, Levi Strauss & Co, Shell, NY Power Authority,...) | | | | | | | | | | |
| Commentaires : | Les guides d'évaluation des émissions proposent des méthodologies assez complètes surtout en ce qui concerne les thématiques spécifiquement étudiées (production de ciment, de carburant et d'électricité). Cependant les facteurs sont souvent adaptés à la situation nord-américaine qui est assez différente de la situation européenne ou française. Le registre des émissions pourrait par contre être utile pour l'évaluation des émissions liées à la production de certains matériaux de construction. | | | | | | | | | | |

Fiche 7

| | | | |
|---|--|-----------------------------------|-----------------|
| Nom : | Baromètre carbone des Contrats de Développement Territorial (CDT) | | |
| Organisme : | Energies Demain pour le compte de la Caisse des Dépôts | | |
| Objectifs : | Outil permettant aux auteurs des Contrats de Développement Territorial d'évaluer l'impact des dispositions prises dans les CDT sur les émissions de GES. | | |
| Site web : | Outil non disponible actuellement. Site d'Energies Demain : http://www.energies-demain.com | | |
| Cible géographique: | Ile-de-France | | |
| Cible sectorielle: | | | |
| | Particuliers : | Entreprises : | Collectivités : |
| | x | x | ✓ |
| | | | Territoires : |
| | | | ✓ |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversions proposés : | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | | x | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | | x | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | | x | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | | ✓ (à l'échelle locale uniquement) | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | | ✓ | |
| Type de support : | Outil online | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | Dans un document annexe (à publier) | | |
| Références : | Outil testé par certains auteurs de CDT | | |
| Commentaires : | Outil destiné à des utilisateurs non expérimentés et ne permettant que peu d'ajustements. L'utilisateur entre les données relatives aux dispositions prises dans les CDT et le calculateur réalise un bilan des émissions de GES sur base des données de la situation existante. | | |

Fiche 8

| | | | |
|---|--|---------------|-----------------|
| Nom : | ENERTER[®], modélisation énergétique territoriale | | |
| Organisme : | Energies Demain | | |
| Objectifs : | Cet outil vise à reconstituer les consommations énergétiques du parc bâti par usage et par énergie pour les secteurs <u>résidentiel</u> ou <u>tertiaire</u> (2 versions du logiciel), et ce, à toute échelle de territoire pour différents scénarios. | | |
| Site web : | http://www.energies-demain.com/spip.php?article13 | | |
| Cible géographique: | France à toute échelle de territoire (depuis celle de la commune à celle du pays) | | |
| Cible sectorielle: | | | |
| | Particuliers : | Entreprises : | Collectivités : |
| | ✓ | ✓ | ✓ |
| | | | Territoires : |
| | | | ✓ |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversions proposés : | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | | non | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | | non | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | | non | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | | non | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | | ✓ | |
| Type de support : | Base de données (format Windev) | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | Licence privée donc payante | | |
| Références : | Programme de recherches financé par la DGUHC - Etude IAURIF sur les enjeux économiques de l'amélioration énergétique du parc résidentiel francilien (IAURIF, PUCA, CSTB, 2010, Cf fiche de lecture n°3) – GDF Enerbat - Plans Climats Territoriaux, Diagnostic et bilans énergétiques territoriaux | | |
| Commentaires : | <p><u>Description</u> : C'est un modèle discret (« bottom up ») construit sur une base de données détaillée compilant les informations thermiques et les caractéristiques architecturales relatives à 30 millions de logements de l'Hexagone et, à l'échelle communale, les surfaces réservées au tertiaire (Source : recensement de la population, INSEE, 99). Le logiciel calcule, pour chaque logement et pour l'ensemble des surfaces tertiaires communales, ses consommations énergétiques pour le chauffage, l'ECS et la cuisson en fonction de ses caractéristiques morphologiques et techniques, son occupation et sa localisation.</p> <p><u>Avantages</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Base de données que l'on peut facilement mettre jour (dynamique) - Modèle discret : les spécificités de chaque bâtiment sont pris en compte (pas d'agrégation) - Regroupe l'essentiel des variables entrant en jeu dans les consommations énergétiques du bâtiment en phase « exploitation » - Concerne également les bâtiments tertiaires <p><u>Inconvénients</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Payante - Ne prend pas en compte les coûts liés à la construction | | |

Fiche 9

| | | | |
|---|--|--------------------|----------------------|
| Nom : | Indicateur ECO₂ Climat | | |
| Organisme : | TF1 / Carbone 4 / INSEE / Service de l'Observation et des Statistiques (SOES) | | |
| Objectifs : | C'est une méthodologie mise au point pour calculer une estimation du bilan carbone du ménage français moyen (c'est-à-dire toutes les émissions, directes et indirectes, en France ou à l'étranger, qui découlent de sa consommation). Cet indicateur, exprimé en éq-CO ₂ /personne/mois, est présenté mensuellement sur la chaîne TF1. Le bureau d'études Carbone4 s'occupe de le mettre à jour. | | |
| Site web : | http://www.carbone4.com/fr/actualites/eco2climat | | |
| Cible géographique: | France (métropole + Outre-mer) | | |
| Cible sectorielle: | | | |
| | Particuliers : | Entreprises : | Collectivités : |
| | Particuliers : (outil informatif, pas opérationnel) | Entreprises : x | Collectivités : x |
| | | | Territoires : x |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversions proposés : | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | | non | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | | non | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | | non | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | | ✓ | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | | ✓ | |
| Type de support : | / | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | Bien référencé et détaillé. Les coefficients sont principalement extraits de la méthode Bilan Carbone de l'ADEME, ou alors estimés par Carbone 4 sur base d'études spécialisées. | | |
| Références : | Méthodologie spécifique à une campagne de communication, pas de portée opérationnelle | | |
| Commentaires : | <p><u>Description</u> : 6 grands postes considérés :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Logements (construction + entretiens) : le FE ne tient pas compte des différentes techniques de construction - Consommation d'énergie des logements - Alimentation - Autres biens de consommation (équipement du domicile, de la personne, automobile, etc) - Déplacements (mobilité quotidienne, mais aussi déplacements lointains pour motifs personnels) - Services publics (enseignement, santé, défense...) et privés (banque, coiffure, etc.). <p><u>Avantages</u> : méthodologie de calcul dynamique du facteur d'émissions de l'électricité très détaillée. Pour les autres facteurs d'émission : détail des hypothèses et utilisation d'« indice de robustesse » (niveau de fiabilité du facteur d'émission)</p> <p><u>Inconvénients</u> : facteurs d'émission pour toute la France</p> | | |

Fiche 10

| | | | |
|---|---|--------------------|----------------------|
| Nom : | INIES - Base de données française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction | | |
| Organisme : | Ministère en charge du développement durable et du logement - Ministère chargé de la santé - Ministère chargé de la culture - ADEME/CSTB | | |
| Objectifs : | INIES est la base de données nationale de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des matériaux et produits de construction. Elle met à disposition des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) de produits de construction fournies par les fabricants ou les syndicats et contrôlées par le conseil et de surveillance. La base de données contient aujourd'hui près de 5000 produits, et cette base est mise à jour régulièrement. | | |
| Site web : | http://www.inies.fr/ | | |
| Cible géographique: | France | | |
| Cible sectorielle: | | | |
| | Particuliers : | Entreprises : | Collectivités : |
| | Particuliers : (outil informatif, pas opérationnel) | Entreprises : ✓ | Collectivités : ✓ |
| | | | Territoires : ✓ |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversions proposés : | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | | ✓ | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | | ✓ | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | | non | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | | non | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | | ✓ | |
| Type de support : | Site Internet | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | Pas explicité | | |
| Références : | Guide des facteurs d'émissions (ADEME, 2007) | | |
| Commentaires : | Il est possible pour chaque matériau (couverture, façade, isolation, équipements sanitaires, structure, voirie, réseaux divers...) d'identifier le facteur d'émissions de GES relatif à sa production, son transport, sa mise en œuvre et également sa fin de vie. | | |

Fiche 11

| Nom : | GES SCoT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|------------|-----------------|------------|--|------------|------------|------------|------------|--------------------------------|--|--|--|--|--|---|--|----------------------------------|--|--|--|---|--|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---|--|--|--|---|--|--|--|--|--|
| Organisme : | Maîtrise d'ouvrage : Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN) du Ministère en charge du Développement Durable - CERTU - ADEME Maîtrise d'œuvre : Factor X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Objectifs : | GES SCoT est un outil d'aide à la décision pour l'évaluation des émissions de GES de différents scénarios d'aménagement du territoire dans le cadre de l'élaboration des SCoT. L'outil cible les thématiques pour lesquelles le SCoT peut avoir un impact ou disposer de leviers d'actions pour réduire les émissions de GES. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Site web : | Description plus détaillée : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/2FMarseilleCERTU.pdf | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cible géographique: | France, à l'échelle d'application des SCoT (régionale, supra-communale) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cible sectorielle: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Particuliers : | | Entreprises : | | Collectivités : | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| x | | x | | ✓ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | Territoires : | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | ✓ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversions proposés : | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | | non | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | | non | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | | non | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | | non | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | | ✓ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Type de support : | <p>Tableur Excel :</p> <p><i>Exemple de questionnaire</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>Scénario 1</th> <th>Scénario 2</th> <th>Scénario 3</th> <th>Scénario 4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="6">USAGE DE L'HABITAT NEUF</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Quel est le nombre de logements neufs à construire à l'horizon du SCoT (résidences principales) ?</td> <td>Nombre de logements à construire</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Veuillez indiquer la répartition de logements à construire au sein de l'armature urbaine (pôle urbain et espace péri-urbain et rural)</td> <td>% de logements collectifs à construire en pôles urbains</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>% de logements individuels à construire en pôles urbains</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>% de logements collectifs dans l'espace péri-urbain et rural et espace rural</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>% de logements individuels dans l'espace péri-urbain et rural</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="6">Surfaces par type de logement et par type de territoire</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;"><small>Source : CETE</small></p> | | | | | | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | USAGE DE L'HABITAT NEUF | | | | | | Quel est le nombre de logements neufs à construire à l'horizon du SCoT (résidences principales) ? | | Nombre de logements à construire | | | | Veuillez indiquer la répartition de logements à construire au sein de l'armature urbaine (pôle urbain et espace péri-urbain et rural) | | % de logements collectifs à construire en pôles urbains | | | | | | % de logements individuels à construire en pôles urbains | | | | | | % de logements collectifs dans l'espace péri-urbain et rural et espace rural | | | | | | % de logements individuels dans l'espace péri-urbain et rural | | | | Surfaces par type de logement et par type de territoire | | | | | |
| | | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| USAGE DE L'HABITAT NEUF | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Quel est le nombre de logements neufs à construire à l'horizon du SCoT (résidences principales) ? | | Nombre de logements à construire | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Veuillez indiquer la répartition de logements à construire au sein de l'armature urbaine (pôle urbain et espace péri-urbain et rural) | | % de logements collectifs à construire en pôles urbains | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | % de logements individuels à construire en pôles urbains | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | % de logements collectifs dans l'espace péri-urbain et rural et espace rural | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | % de logements individuels dans l'espace péri-urbain et rural | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Surfaces par type de logement et par type de territoire | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | Outil pas encore diffusé à ce stade d'avancement de l'étude | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Références : | Phase d'expérimentation durant l'année 2011 avec des collectivités (CETEs de Lyon, de l'Ouest, de l'Est, Normandie Centre, Nord Picardie, du Sud Ouest). | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Commentaires : | <p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> - C'est un outil de calcul qui englobe presque tous les postes d'émissions retenus dans la présente étude; - il est adapté à une échelle territoriale régionale ou communale et nécessite des données d'entrée plus ou moins détaillées selon l'échelle de travail ; - c'est un outil d'aide à la décision, sous forme d'un tableur Excel organisé par thématique, qui permet de tester différents scénarios d'aménagement et de repérer facilement les leviers d'actions ; - outil public, il sera gratuit et diffusable. <p>Inconvénients :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pas encore diffusé auprès des collectivités | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Fiche 12

| | | | | |
|---|---|---------------|--|-----------------|
| Nom : | Omega TP | | | |
| Organisme : | Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP) | | | |
| Objectifs : | Outil de calcul simplifié permettant à des personnes non expérimentées de réaliser un bilan d'émissions de GES d'un chantier de travaux publics. | | | |
| Site web : | http://www.fntp.fr/ | | | |
| Cible géographique: | France | | | |
| Cible sectorielle: | | | | |
| Particuliers : | | Entreprises : | | Collectivités : |
| x | | ✓ | | ✓ |
| | | | | Territoires : |
| | | | | x |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversions proposés : | | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | | x | | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | | ✓ | | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | | x | | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | | x | | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | | x | | |
| Type de support : | Tableur Excel | | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | La majorité des facteurs d'émission sont issus du Bilan Carbone®. Certains facteurs d'émissions supplémentaires viennent enrichir l'outil, en particulier sur les matériaux de construction (Source : Eurobithume, Colas...) | | | |
| Références : | Entreprises de travaux publics | | | |
| Commentaires : | Cet outil s'apparente à une simplification du Bilan Carbone® à l'échelle d'un chantier de travaux publics. Il comporte notamment les ongles suivants : Combustion sur site, électricité, déplacement de personnes, fret, fabrication de matériaux, gestion des déchets et amortissement des engins. | | | |

Fiche 13

| | | | |
|--|---|-----------------|---------------|
| Nom : | Calculateur LGV | | |
| Organisme : | RFF, SNCF, ADEME | | |
| Objectifs : | Calcul des émissions de gaz à effet de serre engendrées par la conception, la réalisation, l'exploitation et la maintenance d'une infrastructure ferroviaire de type LGV. | | |
| Site web : | www.bilan-carbone-lgvrr.fr/ | | |
| Cible géographique: | France (Europe avec adaptation) | | |
| Cible sectorielle: | Infrastructures ferroviaires | | |
| Particuliers : | Entreprises : | Collectivités : | Territoires : |
| x | ✓ | ✓ | ✓ |
| Domaines de pertinence des facteurs de conversions proposés : | | | |
| Etude et travaux préalables à la construction de l'infrastructure : | ✓ | | |
| Facteurs liés à la construction de l'infrastructure : | ✓ | | |
| Emissions liées au fonctionnement du métro : | ✓ | | |
| Evolution de la mobilité en Ile-de-France : | indirectement | | |
| Facteurs liés au développement du territoire : | x | | |
| Type de support : | logiciel de calcul sous format Excel. | | |
| Explicatif des coefficients de conversion retenus : | En cours d'étude : voir commentaires | | |
| Références : | LGV Rhin-Rhône, Grand Projet Ferroviaire du Sud-Ouest. | | |
| Commentaires : | <p>Suite à un entretien téléphonique avec RFF (7/11/2011), nous sommes en attente de réception des éléments techniques de leur part. Le rapport final de l'étude est en cours de validation par l'ADEME, aussi RFF ne pourra nous transmettre que la partie relative à la construction de l'infrastructure.</p> <p>A la vue des éléments dont nous disposons à l'heure actuelle, cette méthodologie est très complète de par le périmètre d'étude (3 phases : conception, construction et exploitation et maintenance), de par les facteurs d'émissions adaptés à la construction d'infrastructures ferroviaires (création de facteurs d'émissions linéaire pour plusieurs types de viaducs, tunnel mono tube...)</p> <p>Une présentation de variante a été réalisée, nous n'avons pas encore vu l'outil sur cet aspect.</p> <p>Comme la grande majorité des méthodes, les coefficients n'évoluent pas dans le temps et la grille de calcul ne permet pas d'actualiser les valeurs dans le temps.</p> | | |

Fiche 14



Société du Grand Paris
Immeuble « Le Cézanne »
30, avenue des Fruitiers
93200 Saint-Denis

www.societedugrandparis.fr