

Bilan Carbone®
Entreprises et Collectivités

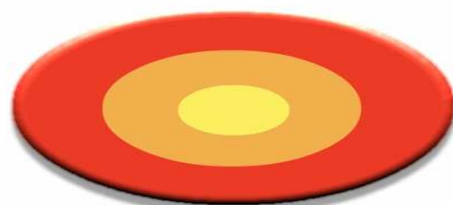
GUIDE DES FACTEURS D'ÉMISSIONS

Version 6.1

Calcul des facteurs d'émissions
et sources bibliographiques utilisées

Chapitre 4 – Prise en compte des transports

Juin 2010



BILAN CARBONE



TABLE DES MATIERES

4 PRISE EN COMPTE DES TRANSPORTS	6
4.1 Transport routier de personnes	6
4.1.1 Voitures particulières	6
4.1.1.1 Amortissement des voitures particulières	6
4.1.1.1.1 Emissions ajoutées de la filière automobile	7
4.1.1.1.2 Emissions liées aux matériaux utilisés et résultat	8
4.1.1.2 Calcul de la consommation de référence des voitures particulières	10
4.1.1.2.1 Emissions approchées par type de carburant et zone de résidence du conducteur, France métropolitaine	10
4.1.1.2.2 Emissions approchées par type de carburant et ancienneté du véhicule, France métropolitaine	12
4.1.1.2.3 Emissions approchées par type de carburant et puissance administrative, France métropolitaine	13
4.1.1.3 Déplacements entre domicile et travail	15
4.1.1.3.1 Facteurs d'émission par personne venant en voiture, cas de la France métropolitaine	15
4.1.1.3.2 Facteurs d'émission par personne venant en voiture, kilométrage connu	18
4.1.1.4 Déplacements en voiture pour motifs professionnels	19
4.1.1.5 Déplacements en voiture au titre de la mobilité quotidienne des résidents d'un territoire.....	19
4.1.1.6 Déplacements en voiture au titre de la mobilité longue distance des résidents d'un territoire.....	21
4.1.2 Bus et cars	22
4.1.2.1 Amortissement des bus et autocars	23
4.1.2.2 Emissions par véhicule.km	23
4.1.2.3 Emissions par passager.km	25
4.1.2.3.1 Cas général	25
4.1.2.3.2 Kilométrage par défaut pour les déplacements domicile-travail	25
4.1.2.4 Déplacements en bus au titre de la mobilité quotidienne des résidents d'un territoire	26
4.1.2.5 Déplacements en bus au titre de la mobilité longue distance des résidents d'un territoire.....	28
4.1.3 Deux-roues	29

4.1.3.1 Amortissement des deux-roues	29
4.1.3.2 Emissions par véhicule.km liées à la combustion.....	30
4.2 Transport routier de marchandises.....	30
4.2.1 Amortissement des camions et camionnettes.....	30
4.2.2 Consommations moyennes par véhicule.km par classe de PTAC.....	35
4.2.3 Facteurs d'émission par véhicule.km tenant compte du taux de remplissage et de parcours à vide.....	38
4.2.3.1 Raisonnement.....	38
4.2.3.2 Détermination des consommations à vide et à pleine charge	40
4.2.3.3 Réintégration des émissions de fabrication.....	42
4.2.4 Facteurs d'émission par tonne.km tenant compte du taux de remplissage et de parcours à vide.....	43
4.2.5 Incertitudes des méthodes exposées au 4.2.3 et 4.2.4.....	45
4.2.6 Calculs exacts des distances routières.....	46
4.2.7 Tonnes.km par habitant et par région.....	46
4.2.7.1 Tonnes.km expédiées par habitant et par région.....	46
4.2.7.2 Tonnes.km réceptionnées par habitant et par région.....	47
4.3 Transport aérien	47
4.3.1 Emissions par passager.km (avions de ligne)	48
4.3.1.1 Principe général.....	48
4.3.1.2 Emissions de CO ₂	49
4.3.1.3 Emissions hors CO ₂	50
4.3.2 Consommations par tonne.km pour les marchandises (jets de ligne).....	52
4.3.3 Reconstitution de distances parcourues en avion.....	55
4.3.3.1 Lieu de départ et d'arrivée connus.....	55
4.3.3.2 Détermination d'une moyenne pour l'ensemble des Français	55
4.3.4 Gain ultérieur en précision.....	56
4.4 Transport ferroviaire.....	56
4.4.1 Généralités	56
4.4.2 Transports de personnes.....	57
4.4.2.1 Train de voyageurs en France	57
4.4.2.2 Train de voyageurs en Europe	59
4.4.2.3 Kilométrages annuels moyens effectués au titre de la mobilité longue distance.....	60
4.4.3 Fret ferroviaire	60

4.4.3.1 Fret ferroviaire en France.....	60
4.4.3.2 Fret ferroviaire en Europe	62
4.4.4 Calculs exacts des distances ferroviaires	63
4.5 Transport Maritime	63
4.5.1 Emissions liées à la fabrication des bateaux	63
4.5.2 Fret maritime, émissions liées au carburant consommé	64
4.5.2.1 Porte-conteneurs.....	64
4.5.2.2 Vraquiers	67
4.5.2.3 Cargos	67
4.5.2.4 Tonnage moyen importé par la mer par Français (métropole).....	67
4.5.3 Navires à passagers, émissions liées au carburant consommé.....	68
4.5.3.1 Corse-Continent	68
4.5.3.2 Liaison vers les îles du Finistère	69
4.5.4 Calcul des routes maritimes	70
4.6 Transport fluvial de marchandises.....	70
ANNEXE 1 : CONSOMMATION DES VEHICULES DE TOURISME PAR PUISSANCE ADMINISTRATIVE.....	74
1.1. Catégorie 3 à 5 CV fiscaux, essence.....	74
1.2. Catégorie 6 à 10 CV fiscaux, essence.....	75
1.3. Catégorie plus de 11 CV fiscaux, essence.....	75
1.4. Catégorie 3 à 5 CV fiscaux, diesel.....	76
1.5. Catégorie 6 à 10 CV fiscaux, diesel.....	77
1.6. Catégorie 11 CV fiscaux et plus, diesel	77
ANNEXE 2 : REPARTITION DES VEHICULES ROUTIERS DE TRANSPORT DE MARCHANDISES PAR PTAC.....	78
2.1. Camionnettes de PTAC < à 1,5 t.....	79
2.2. Camionnettes de PTAC compris entre 1,5 et 2,5 t	79
2.3. Camionnettes de PTAC compris entre 2,51 et 3,5 t	80
2.4. Camionnettes de PTAC compris entre 3,51 et 5 t	80
2.5. Camions de PTAC compris entre 5,1 et 6 t.....	81
2.6. Camions de PTAC compris entre 6,1 et 10,9 t.....	81
2.7. Camions de PTAC compris entre 11 et 19 t.....	82
2.8. Camions de PTAC compris entre 19,1 et 21 t.....	82

2.9. Camions de PTAC compris entre 21,1 et 32,6 t.....	83
2.10. Ensembles articulés.....	83
ANNEXE 3 : RAYON D'ACTION ET AMENAGEMENTS INTERIEURS DES AVIONS AIRBUS	84
3.1. Rayons d'action	84
3.1.1. A300 version fret	84
3.1.2. A310.....	84
3.1.3. A318.....	85
3.1.4. A319.....	85
3.1.5. A320.....	86
3.1.6. A330-200	86
3.1.7. A330-300	87
3.1.8. A340-200	87
3.1.9. A340-300	88
3.1.10. A340-500	88
3.1.11. A340-600	89
3.2. Cabines.....	89
3.2.1. A320.....	89
3.2.2. A330-200	90
3.2.3. A340-200	90
3.2.4. A340-600	91
LISTE DES TABLEAUX.....	92
LISTE DES FIGURES	96
LISTE DES FIGURES	96

4 PRISE EN COMPTE DES TRANSPORTS

Les transports sont une source de gaz à effets de serre du fait :

- du gaz carbonique provenant de la combustion des carburants (pétrole, gaz, GPL, etc.),
- des fuites liées à la climatisation le cas échéant, qui engendrent des émissions d'halocarbures (voir Chapitre 3 ; ce point n'est pas traité ici),
- des polluants locaux divers, qui peuvent être directement des gaz à effet de serre (oxydes d'azote), ou être des précurseurs de l'ozone, qui est lui-même un gaz à effet de serre (l'ozone des basses couches, encore appelé ozone troposphérique, est responsable d'environ 15% de la perturbation humaine du système climatique).

Mis à part les problèmes de fuites de fluide de climatisation, le reste des émissions est la conséquence directe de l'emploi de carburants. Les émissions des transports sont donc une conséquence, dans un contexte particulier, de l'utilisation d'énergies fossiles. Toutefois les émissions de gaz à effet de serre d'un engin de transport sont fortement variables selon les cas de figure. La prédiction des émissions engendrées dépend à la fois de caractéristiques pouvant donner lieu à mesure (puissance du moteur et combustible utilisé, ou encore taux de remplissage d'un véhicule lourd comme un camion ou un bus), et d'autres qui sont beaucoup plus difficiles à appréhender quantitativement (par exemple le type de conduite pour un véhicule routier).

Tout ce qui suit a donc vocation à proposer des ordres de grandeur, dont l'écart avec la situation réelle sera d'autant plus faible que la loi des grands nombres jouera, c'est-à-dire que la "fiabilité" des facteurs d'émission proposés sera d'autant meilleure qu'il s'appliquera à un grand nombre de sources et/ou un grand nombre de trajets.

Dans tout ce qui suit, nous avons tenu compte des émissions de production des carburants (voir Chapitre 2). Nous avons aussi tenu compte, dès que cela est possible, de l'amortissement des véhicules.

4.1 TRANSPORT ROUTIER DE PERSONNES

4.1.1 Voitures particulières

4.1.1.1 Amortissement des voitures particulières

C'est une évidence : pour circuler en véhicule, il faut commencer par fabriquer ce dernier, ce qui engendre des émissions de gaz à effet de serre, soit pour la production des matériaux utilisés, soit pour leur travail et leur assemblage. Le présent chapitre détaille le raisonnement suivi pour parvenir à un facteur d'émission par voiture pour la construction.

4.1.1.1.1 Emissions ajoutées de la filière automobile

Ce qui suit concerne les émissions qui vont de la fabrication des matériaux de base utilisés à la voiture complète. Les activités concernées regroupent les constructeurs d'automobiles et les équipementiers qui les fournissent.

L'Observatoire de l'Energie fournit les consommations d'énergie de l'activité "construction de véhicules terrestres" pour les sites implantés en France pour l'année 1999. Ces données se présentent comme suit :

Energie primaire consommée par le secteur	charbon	gaz	Produits pétroliers ¹	Electricité en France ²
Tep	38 000	462 000	119 000	1 390 000

Tableau 1 : Consommations énergétiques en France pour l'activité de construction des véhicules terrestres (1999)

En ramenant ces émissions aux voitures produites en France, nous pourrions obtenir les émissions ajoutées de construction (transports exceptés) par voiture. Toutefois, les véhicules circulant en France ont été construits, pour une large part, ailleurs en Europe. La supposition que tous les véhicules circulant en France ont été fabriqués avec de l'électricité à faible contenu en carbone serait donc infondée. En revanche, comme ils utilisent des technologies mondialisées, l'efficacité énergétique des différents constructeurs européens (voire japonais) doit être très voisine, et la part respective de chaque énergie primaire pour ce qui concerne pas l'électricité est probablement aussi relativement similaire d'un pays européen à l'autre.

Pour obtenir des émissions de gaz à effet de serre ajoutées par véhicule, nous allons donc retenir les données françaises pour la part de chaque énergie primaire par automobile, mais utiliser un facteur d'émission européen pour l'électricité, de telle sorte que le "contenu en gaz à effet de serre par voiture" qui en résultera sera applicable sur toute l'Europe. A nouveau, même en restant dans la filière ces émissions ne représenteront que l'énergie consommée en bout de chaîne par les constructeurs, et non celle consommée par les sous-traitants qui ne possèdent pas le code NAF "construction de véhicules terrestres". Cela donne ce qui suit :

Energie primaire	Charbon	Gaz	Produits pétroliers	Electricité en Europe ³	Total
Tep	38 000	462 000	119 000	1 390 000	-
Tonnes équ. C/tep	1,319	0,736	0,947	0,479	-
Tonnes équ. C	50 126	340 011	112 640	665 977	1 168 753

Tableau 2 : Facteurs d'émissions pour l'activité de construction des véhicules terrestres

Par ailleurs le nombre de voitures particulières produites sur le sol français (c'est-à-dire dans des sites situés en France, qui sont les seuls qui figurent dans les statistiques de consommation de l'Observatoire de l'Energie) était de 3,4 millions en 2001. L'écart de la consommation d'énergie du

¹ Il s'agit pour l'essentiel de fioul lourd

² L'équivalence ici est de 0,222 tep par MWh

³ L'équivalence ici est de 0,222 tep par MWh et 106 g équ. C par kWh électrique (source IEA).

secteur d'une année sur l'autre étant inférieur à 5% entre 1995 et 1999, nous supposons que nous pouvons rapprocher les données de 2001 pour la production de voitures des données 1999 pour les consommations d'énergie.

Enfin le code NAF du secteur d'activité couvre bien entendu d'autres productions que l'automobile (les camions, les trains...), mais les voitures particulières étant prépondérantes dans le total de l'activité, nous supposons qu'un ordre de grandeur acceptable sera fourni en assimilant toute l'activité du secteur à la seule construction automobile.

Avec ces hypothèses, les émissions ajoutées par la construction automobile *stricto sensu* sont de l'ordre de 350 kg équivalent carbone par véhicule. Toutefois pour approcher un contenu en carbone du véhicule produit, il reste à prendre en compte :

- les émissions liées à l'emploi de l'énergie dans les secteurs industriels amont (les équipementiers),
- les émissions liées à la fabrication des matériaux utilisés pour construire une voiture.

Pour tenir compte de la contribution des équipementiers, qui sont à l'origine de plus de la moitié de la valeur ajoutée de la filière, nous allons forfaitairement multiplier par 2 les émissions estimées ci-dessus pour la partie finale de la construction de véhicules (ce qui fait donc passer de 350 à 700 kg équivalent carbone par voiture). Il resterait toutefois à savoir si certains gros équipementiers possèdent un code INSEE "construction mécanique" (ce qui est probable mais non certain) ou un code lié à la construction de véhicules, ce qui est déterminant pour savoir dans quelle "case" leur consommation d'énergie a été classée.

Avec les hypothèses ci-dessus, les émissions "hors matériaux" se monteraient environ à 0,7 tonne équivalent carbone par véhicule.

4.1.1.1.2 Emissions liées aux matériaux utilisés et résultat

En ce qui concerne les matériaux utilisés, nous avons pu obtenir les informations suivantes :

- selon l'IFP⁴, une voiture européenne contient en moyenne (en poids) 60% à 66% d'acier, 10 à 15% de plastique, 7% d'aluminium, 2% d'autres métaux, 4% de verre, 4% de caoutchouc, 7% de liquides et 1% de mousse.
- selon l'APME⁵, une voiture européenne contient en moyenne 100 kg de plastique, et ce dernier représente 10% du poids du véhicule (d'où nous déduisons qu'une voiture pèse en moyenne une tonne),
- selon l'IRSID⁶, une voiture contient en moyenne 50% d'acier, que nous supposons issu à 66% d'acier recyclé (cette estimation demanderait à être confirmée).

Une mise en commun de ces diverses informations permet d'aboutir à la synthèse suivante, pour un véhicule dont la masse à vide est de 1,19 tonnes, soit la masse à vide des véhicules neufs vendus en 2001 :

⁴ Echanges avec Stéphane HIS, IFP, octobre 2003

⁵ APME : Association of Plastic Manufacturers (l'information a été trouvée sur le site web www.apme.org)

⁶ IRSID : Institut de Recherche de la Sidérurgie

	Plastique	Aluminium	Verre plat	Acier ⁷	Gaoutchouc	Liquides	Autres ⁸	Total
Kg par véhicule	119	83	48	595	59	83	202	1 190
Kg équ. C par kg de poids	0,650	2,680	0,414	0,585	0,650	0,500	1,000	
Kg équ. C par véhicule	77	223	20	348	39	42	202	951

Tableau 3 : Facteurs d'émission de la production des différents matériaux nécessaires à la construction d'un véhicule d'une tonne

Il ressort de ces diverses estimations qu'une voiture, pesant en moyenne 1,19 tonne, engendre des émissions de production qui sont de l'ordre de 1,64 tonne équivalent carbone, soit 1,4 fois son poids.

Il reste à tenir compte des termes oubliés ci-dessus (déplacements des salariés, fret, immobilisations, déchets, R&D, etc), ce pour quoi nous ajouterons un supplément évalué, au vu des bilans carbone déjà réalisés dans l'industrie, à 10%, ce qui nous amène à 1,51 tonne équivalent carbone par tonne de voiture.

Ce coefficient de 1,5 tonne équivalent carbone par tonne de véhicule nous servira donc de référent, jusqu'à plus ample information.

Compte tenu d'une "durée de vie" des voitures qui est de l'ordre de 150.000 à 200.000 km, les émissions de fabrication ramenées au km parcouru sont alors de 11±4 g équivalent carbone, selon le poids du véhicule et le kilométrage total avant mise au rebut.

Enfin l'incertitude sur ce chiffre est probablement inférieure à 40% : en effet, 40% de moins nous amène à environ une tonne équivalent carbone par tonne de véhicule (très improbable compte tenu de la composition approximative et des facteurs d'émission pour les matériaux de base), et 40% en plus nous amènerait à 2,2 tonne équivalent carbone par tonne de véhicule, ce qui supposerait que les matériaux autres que l'acier (soit 500 à 600 kg par véhicule) aient un contenu moyen supérieur à 3 tonnes équivalent carbone par tonne, ce qui semble peu probable.

Le ratio massique déterminé ci-dessus (1,5 tonne équivalent carbone par tonne) s'applique probablement aussi aux voitures construites au Japon et en Corée, où les émissions par \$ de PIB et le facteur d'émission de l'électricité sont voisins de ce qu'ils sont en France. Par contre ce ratio est probablement un peu faible pour les voitures américaines, où le facteur d'émission de l'électricité et les émissions par \$ de PIB plus élevées qu'en Europe. Le cas échéant, l'auteur d'un Bilan Carbone devra adapter ce ratio pour aboutir à des émissions de fabrication des véhicules américains.

Notons enfin que ces émissions n'intègrent pas les contributions annexes (émissions liées au réseau de concessionnaires ; entretien & réparations ; assurance...) qui devraient aussi être réintégrées. Des travaux réalisés sur les engins agricoles par l'Institut du Végétal semblent indiquer que, rapporté à l'heure d'utilisation (et donc au kilométrage, plus ou moins) la contribution de la fabrication initiale et celle de l'entretien sont du même ordre de grandeur. Un autre élément qui plaide dans le même

⁷ L'acier utilisé par le secteur automobile est à 60% de l'acier recyclé, ce qui amène à une valeur de 500 kg équ. C par tonne d'acier pour son contenu en GES (voir § 5.1)

⁸ Dont électronique, dont la fabrication est très intensive en gaz à effet de serre ; le facteur d'émission est une estimation personnelle de l'auteur

sens (que l'entretien est très significatif en comparaison de la construction initiale) est que les garages représentent près d'un quart des « commerces de proximité » en France.

4.1.1.2 Calcul de la consommation de référence des voitures particulières

Lorsqu'il n'est pas possible d'accéder directement aux achats de carburant des véhicules utilisés par l'entité qui fait son Bilan Carbone⁹, la manière habituelle de procéder sera d'utiliser une valeur moyenne, pour une catégorie de véhicules ou d'usages aussi proches que possibles de la situation rencontrée.

Une première solution pourrait être d'utiliser une des bases de données qui indiquent les consommations des véhicules en suivant des cycles de roulages conventionnels :

- www.ademe.fr/auto-diag/transports/car_lab/carlabelling/ListeMarque.asp
- www.vcacarfueldata.org.uk/

Toutefois, cette approche se heurte à deux limites :

- elle demanderait un temps excessif pour un site ayant 2000 salariés qui viennent tous en voiture ;
- les valeurs fournies ne correspondent pas à une utilisation réelle, qui inclut des embouteillages, des accélérations généralement plus fortes que dans les parcours de référence, de la déclivité, un entretien pas toujours irréprochable, un chargement qui peut être conséquent, des démarrages moteur froid, l'emploi de la climatisation, etc. En pratique, le rapport entre cycles de roulages conventionnels et consommations réelles varie de 30% à 80% selon la puissance administrative du véhicule (voir § 4.1.1.2.2), sans qu'il soit possible de proposer une règle valable quel que soit le véhicule considéré ;
- ces valeurs ne prennent pas en compte les émissions de construction du véhicule, dont la contribution n'est pas totalement marginale une fois rapportée au kilomètre parcouru (de l'ordre de 15%) ;
- enfin les consommations des véhicules qui ne sont plus disponibles à la vente (mais qui roulent toujours !) ne sont pas toujours disponibles dans ces bases.

Nous allons donc utiliser des données publiées par de l'Observatoire de l'Energie pour fournir des valeurs de référence qui permettent de traiter rapidement, sans marge d'erreur excessive, la quasi-totalité des cas de figure existants.

4.1.1.2.1 Emissions approchées par type de carburant et zone de résidence du conducteur, France métropolitaine

L'observatoire de l'Energie - et à sa suite le Service de l'Observation et des Statistiques - fournit des consommations moyennes discriminées suivant le lieu de résidence du propriétaire¹⁰. Pour obtenir des valeurs au km, nous allons :

⁹ Notons que lorsque les consommations de carburant sont disponibles, il ne faut pas oublier de tenir compte de la fabrication et de l'entretien par ailleurs !

¹⁰ Observatoire de l'Energie / édition 2001 / Tableaux des consommations d'énergie en France.

- convertir ces consommations en émissions, en utilisant les facteurs d'émission "complets" pour les carburants, calculés au § 2.2.3,
- y ajouter les émissions moyennes de construction d'un véhicule, réparties sur le kilométrage total parcouru par le véhicule sur sa durée de vie.

Pour ce deuxième poste, nous avons supposé que le poids moyen d'un véhicule essence était de 1.093 kg (ce qui correspond au poids des véhicules essence vendus en 2001 - après avoir beaucoup augmenté entre 1990 et 2000, le poids moyen des véhicules neufs vendus s'est à peu près stabilisé), et de 1.322 kg pour un véhicule diesel.

Ces valeurs ont été obtenues en utilisant le poids moyen par puissance administrative pour les véhicules neufs vendus en 2001¹¹ et le parc de véhicules en circulation au 31 décembre 2001¹². Même en sachant que les véhicules se sont un peu alourdis au fil des ans, un écart de 10% sur le poids moyen par véhicule modifie les émissions globales (fabrication + carburant) de 1 gramme équivalent carbone par km, soit moins de 2% de la valeur totale obtenue.

Nous avons aussi supposé - ici - que la durée de vie moyenne d'un véhicule était de 150.000 km pour un véhicule essence, et de 200.000 km pour un véhicule diesel, ce qui correspond à une valeur moyenne estimée, compte tenu de durées de vie très variables, en fonction de la puissance administrative du véhicule.

Avec ces hypothèses, nous aboutissons aux valeurs suivantes :

Zone de résidence	Consommation moyenne des véhicules essence (litres aux 100)	Emissions de construction (g C/km)	Soit g équ. C/km au total	Ecart à la moyenne
Communes < 2.000 hab.	7,8	11,0	71,3	-3%
De 2.000 à 49.999 hab.	8	11,0	72,8	-1%
> 50.000 hab. hors RP	8,3	11,0	75,2	2%
Région Parisienne (RP)	9,1	11,0	81,3	10%
Ensemble	8,1	11,0	73,6	0%

Tableau 4 : Grammes équivalent carbone par km parcouru des véhicules essence en fonction du domicile du conducteur.

Zone de résidence	Consommation moyenne des véhicules diesel (litres aux 100)	Emissions de construction (g C/km)	soit g équ. C/km au total	Ecart à la moyenne
Communes < 2.000 hab.	6,6	11,2	64,2	-2%
De 2.000 à 49.999 hab.	6,8	11,2	65,8	0%
> 50.000 hab. hors RP	6,9	11,2	66,6	1%
Région Parisienne (RP)	6,8	11,2	65,8	0%
Ensemble	6,8	11,2	65,8	0%

Tableau 5 : Grammes équivalent carbone par km parcouru des véhicules diesel en fonction de la zone de résidence du conducteur

¹¹ Source ADEME

¹² Source Ministère de l'Équipement, des Logements et du Transport, Service Économique et Statistique

La zone de résidence ne semble donc pas être un discriminant significatif pour les véhicules diesel, mais l'est, pour les véhicules essence, entre la région parisienne et le reste de la France. Mais cela n'est peut-être que le simple reflet d'un parc francilien plus fourni en grosses cylindrées, qui sont pour l'essentiel des véhicules essence (en 2001, il y avait en France près de 750.000 VP de plus de 11 CV fiscaux en motorisation essence, contre "seulement" 200.000 en motorisation diesel).

Nous pouvons donc raisonnablement considérer que pour les véhicules courants (moins de 10 CV de puissance fiscale) le lieu d'utilisation est de peu d'importance pour les émissions moyennes par km parcouru. Il s'agit bien de moyennes annuelles, qui ne sont peut-être pas représentatives des déplacements domicile-travail, lesquels ne concernent que 20% du kilométrage total effectué en France, mais s'effectuent préférentiellement aux heures de pointe et en ville, donc en se rapprochant des conditions du cycle urbain.

Les chiffres ci-dessus tendent juste à suggérer que la proportion du kilométrage annuel qui est effectué en cycle urbain est à peu près identique quelle que soit la taille de l'agglomération de résidence du propriétaire.

Par défaut, les valeurs ci-dessus peuvent être extrapolées aux autres pays européens, mais pas à l'Amérique du Nord.

4.1.1.2.2 Emissions approchées par type de carburant et ancienneté du véhicule, France métropolitaine

L'Observatoire de l'Énergie propose également des consommations discriminées en fonction de l'ancienneté de mise en circulation du véhicule (ci-dessous).

Ancienneté de mise en circulation	Consommation moyenne des véhicules essence (litres aux 100 km)	Ecart à la moyenne	Consommation moyenne des véhicules diesel (litres aux 100 km)	Ecart à la moyenne
1 à 5 ans	7,8	-4%	6,8	0%
6 à 10 ans	8,2	1%	6,8	0%
11 à 15 ans	8,4	4%	6,4	-6%
Plus de 15 ans	9,4	16%	6,9	1%
Ensemble	8,1	0%	6,8	0%

Tableau 6 : Consommations moyennes des véhicules en fonction de leur ancienneté de mise en circulation

Là encore, les valeurs moyennes discriminées par ancienneté du véhicule ne mettent pas en évidence d'écart à la moyenne significatif, sauf pour les véhicules essence datant de plus de 15 ans, qui sont toutefois marginaux dans le parc.

En revanche, la masse à vide a augmenté au fil des ans (donc les émissions de fabrication aussi) mais cela ne joue probablement pas pour plus de quelques % dans les émissions globales (pour les seules émissions de fabrication, bien sûr). Le reste de la montée en gamme s'est en fait manifesté par une augmentation proportionnelle des véhicules situés dans les puissances administratives élevées, ce qui nous amène donc à nous pencher sur la segmentation des consommations avec ce déterminant précis (et facile à obtenir) qu'est la puissance administrative d'un véhicule.

4.1.1.2.3 Emissions approchées par type de carburant et puissance administrative, France métropolitaine

Les consommations selon la puissance administrative nous sont données par deux sources distinctes.

Pour le parc en circulation, la même publication de l'Observatoire de l'Énergie fournit des données agrégées pour 3 catégories (5 CV fiscaux et moins, 6 à 10 CV fiscaux, et 11 et plus). Cela permet une première discrimination en fonction de la puissance réelle, qui est, par définition même, un déterminant de la consommation d'énergie¹³.

Ces données de l'Observatoire de l'Énergie peuvent se présenter comme suit :

Classe de puissance administrative	Consommation moyenne des véhicules essence (litres aux 100 km)	Ecart à la moyenne	Consommation moyenne des véhicules diesel (litres aux 100 km)	Ecart à la moyenne
5 CV et moins	7,2	-11%	6,3	-7%
6 à 10 CV	8,5	5%	7	3%
11 CV et plus	10,9	35%	11,1	63%
Ensemble	8,1	0%	6,8	0%

Tableau 7 : Consommation moyenne des véhicules essence et diesel en fonction de leur puissance administrative

Le tableau ci-dessus permet donc de constater que, si la puissance administrative est un vrai discriminant des consommations moyennes (et donc des émissions), l'écart entre la moyenne globale et la moyenne par classe ne dépasse pas 15% pour les catégories de véhicules courants (soit 5 à 10 CV).

De la sorte, en prenant la moyenne toutes classes et tous types de parcours confondus, soit 74 grammes équivalent carbone par km pour les véhicules essence, et 66 grammes équivalent carbone par km pour les véhicules diesel (tableaux 4 et 5), nous pouvons considérer que nous disposons d'une approximation valable à 10 ou 15% près (soit à un litre près sur les consommations moyennes) pour un parc important de véhicules, connaissant des conditions de conduite variées. En cas d'ignorance de la proportion respective de diesel et d'essence, nous retiendrons la valeur moyenne de 70 grammes équivalent carbone par km, valable pour la totalité des véhicules en circulation.

Nous pouvons toutefois proposer une discrimination encore plus fine, grâce à des données fournies par l'ADEME, qui sont :

- la moyenne des poids à vide des véhicules vendus en 2001 par puissance administrative et par type de carburant,
- les consommations pour les cycles de roulages conventionnels pour l'ensemble des véhicules ayant la même puissance administrative et utilisant le même type de carburant.

¹³ La puissance administrative est définie à partir de la puissance réelle et des émissions de CO₂ qui correspondent à un facteur près à la consommation d'énergie.

Ces données sont donc d'un niveau de détail élevé, mais portent sur des consommations non réelles (elles sont associées aux cycles de roulages conventionnels), et pour un ensemble certes important (plus de 2 millions de véhicules), mais partiel, puisqu'il s'agit des seuls véhicules vendus en 2001 (un peu moins de 8% du parc cette année là).

Toutefois nous avons précédemment noté que les consommations réelles par puissance administrative et type de carburant avaient peu varié au fil des ans (§ 4.1.1.2.2). Par ailleurs, nous prendrons l'hypothèse que la masse moyenne par puissance administrative et par type de carburant n'a pas varié de plus de 10% sur les 10 ou 15 dernières années, c'est-à-dire depuis la mise en service des véhicules les plus anciens actuellement en circulation (à l'exception près d'une fraction marginale du parc constitué de véhicules ayant plus de 15 ans).

De la sorte, les poids moyens à vide par puissance administrative et type de carburant, qui sont calculés par l'ADEME à partir des véhicules vendus en 2001, seront considérés comme des valeurs acceptables pour l'ensemble du parc en circulation (cela ne porte de toute façon que sur la contribution liée à la construction, puisque les consommations sont directement connues par ailleurs).

Enfin dans les statistiques publiées par l'Observatoire de l'Energie, nous ne possédons pas les données par puissance individualisée, mais seulement par tranches de puissances (5 CV fiscaux et moins, 6 à 10, et 11 et plus).

A partir de ces données, et pour obtenir des consommations « proches du réel » par puissance administrative, nous allons donc procéder à une extrapolation de la manière suivante :

- effectuer la moyenne, par puissance administrative, des consommations associées aux cycles de roulages conventionnels pour les véhicules neufs vendus en 2001 (avec les données ADEME),
- en déduire une moyenne par tranches de puissances administratives et type de carburant, les tranches étant celles utilisées par l'Observatoire de l'Energie,
- rapprocher cette moyenne des consommations réelles du parc existant, pour voir combien il faut rajouter aux moyennes calculées avec les cycles de roulages conventionnels et sur les seuls véhicules neufs pour obtenir la consommation réelle des véhicules en circulation de la catégorie fournie par l'Observatoire de l'Energie. La consommation réelle de référence concernera un parcours mixte, qui est supposé se rapprocher le plus de la réalité¹⁴.

Par exemple les consommations associées aux cycles de roulages conventionnels pour les véhicules essence de 3 à 5 CV conduisent aux moyennes ci-dessous :

¹⁴ En moyenne annuelle, rares sont les voitures qui ne font que des parcours urbains (ou que des parcours extra-urbains), comme le § 4.1.1.2.1 tend à le suggérer

Puissance administrative (CV fiscaux)	Parc total en circulation au 01-01-2002	Véhicules neufs vendus en 2001			
		Masse à vide (kg)	Consommation moyenne en cycle extra urbain (litres aux 100 km)	Consommation moyenne en parcours mixte (litres aux 100 km)	Consommation moyenne en cycle urbain (litres aux 100 km)
3	36 672	720	4,3	4,9	6,1
4	4 563 806	881	4,9	5,8	7,4
5	3 342 309	1 011	5,4	6,6	8,7
Total ou moyenne	7 942 787	935	5,1	6,1	7,9

Tableau 8 : Consommations associées aux cycles de roulage conventionnels des véhicules essence pour des puissances administratives de 3 à 5 CV fiscaux.

Pour cette catégorie, la consommation moyenne relevée par l'Observatoire de l'Energie, pour le parc en circulation, est de 7,2 litres aux 100 km. En d'autres termes, pour passer de la consommation moyenne (en parcours mixte) des seuls véhicules neufs, calculée avec les données constructeur (UTAC¹⁵), soit 6,1 litres aux 100, à la consommation réelle mesurée, soit 7,2 litres aux 100 km, il faut rajouter 17%.

Il resterait certes à regarder si la proportion de kilométrage par type de conduite (ville, route, autoroute) est la même en situation "réelle" et pour les cycles de roulages conventionnels. Mais nous allons provisoirement supposer que tel est le cas, pour pouvoir rapprocher les chiffres de l'Observatoire de l'Energie des consommations des véhicules neufs.

L'hypothèse que nous allons maintenant prendre est que ce pourcentage de 17% est applicable à toute consommation individuelle d'un véhicule de cette catégorie (moins de 5 CV fiscaux), pour passer d'un calcul fait sur les seuls véhicules neufs, et avec les cycles de roulages conventionnels, à la consommation réelle, et concernant l'ensemble des véhicules du parc en circulation.

En d'autres termes, une fois que nous avons calculé la moyenne des consommations des véhicules neufs pour une puissance administrative donnée (et un type de carburant), il "suffit" d'augmenter cette valeur de 17% pour avoir une bonne approximation de la moyenne pour un véhicule du parc en circulation (et pour le même type de parcours, bien sûr).

La marge d'erreur de l'opération est estimée à 10% pour les émissions par véhicule.km.

Les divers tableaux ainsi obtenus se trouvent en Annexe 1 : et servent à déterminer les facteurs d'émission du tableur de calcul des émissions pour un véhicule dont on connaît le type de carburant, la puissance administrative et le type de parcours.

4.1.1.3 Déplacements entre domicile et travail

4.1.1.3.1 Facteurs d'émission par personne venant en voiture, cas de la France métropolitaine

Dès que l'on effectue le bilan carbone d'un site important, il sera rarement possible ou même seulement souhaitable de faire un calcul précis des émissions liées au déplacement domicile-travail des salariés. Cela supposerait de connaître tous les véhicules employés, les kilométrages précis par

¹⁵ UTAC : Union Technique de l'Automobile, du Motocycle et du Cycle

véhicules, les types de trajet par véhicule, etc, et l'enjeu ne justifiera généralement pas le temps à y consacrer.

Nous proposons ci-dessous des facteurs d'émission permettant de partir du seul nombre de voitures utilisées par les salariés venant de cette manière, avec une éventuelle précision concernant le type de tissu urbain où a lieu le trajet et/ou prend place le domicile du conducteur.

L'INRETS¹⁶ a publié dans la fin des années 1990 une étude fournissant la distance moyenne au travail¹⁷ des actifs en France métropolitaine, qui est de :

- 8,5 km si l'actif réside en ville centre,
- 12 km s'il réside en proche banlieue parisienne ou en périphérie de ville en province,
- 15 km environ s'il réside en 2^{ème} couronne parisienne.

La modification du tissu urbain et des bassins d'emplois étant relativement lente, nous conserverons ces données pour ce qui suit.

Par ailleurs une étude de l'INSEE publiée en 2001 fournissait la distance au travail des actifs selon qu'ils changent ou pas de commune, de département, etc pour aller travailler. Les distances moyennes des personnes qui ne changent pas de commune et de celles qui changent de pays sont des estimations de l'auteur.

Distance au travail - source INSEE Première N°767 - av ril 2001		
catégorie	1999	
	nombre d'actifs	nombre de km entre domicile et travail
ne changent pas de commune pour aller travailler (donnée non fournie par l'étude, estimation supplémentaire) ¹⁸	9 012 614	7,00
changent de commune	14 042 588	15,10
changent de département	2 550 650	26,70
changent de région	719 847	56,90
changent de pays (donnée non fournie par l'étude, estimation supplémentaire) ¹⁹	280 896	40,00
totaux	26 606 595	14,9

Tableau 9 : Distance moyenne domicile-travail en fonction du parcours.

Sur cette base, nous supposerons qu'un actif qui réside en zone rurale et qui ne travaille pas sur place (ce qui exclut les agriculteurs, éleveurs, certains artisans...) parcourt 25 km en moyenne pour se rendre à son travail.

Nous allons par ailleurs supposer que les cycles de conduite sont une fonction du tissu urbain traversé (ce qui reflète à la fois les types de parcours et le fait que ces déplacements se font préférentiellement aux heures de pointe), de la manière suivante :

¹⁶ INRETS : Institut National de recherche sur les Transports et leur Sécurité

¹⁷ J.-P. Orfeuill, La Jaune et La Rouge, avril 1998

¹⁸ Nous avons supposé qu'il s'agissait essentiellement d'actifs résidant en grande ville et qui travaillent dans leur ville de résidence ; la distance est alors calée sur les actifs « résidant en centre ville » de l'étude de l'INRETS, avec une petite décote pour « enlever » la fraction de ces actifs qui vont travailler en banlieue.

¹⁹ Nous avons supposé qu'il s'agit essentiellement de frontaliers, avec une distance au travail considérée comme intermédiaire entre « changent de département » et « changent de région ».

- les déplacements domicile-travail en périphérie rurale se font avec des émissions moyennes au km qui sont représentatives d'un parcours extra-urbain,
- ceux en périphérie lointaine d'Ile de France se font avec des émissions représentatives d'un parcours mixte,
- ceux en périphérie urbaine se font avec des émissions représentatives d'un parcours urbain,
- enfin ceux en milieu urbain se font avec des émissions représentatives d'un cycle urbain+10% (à cause de l'heure de pointe).

Bien entendu, nous tiendrons aussi compte, dans la valeur par défaut, des émissions liées à la fabrication du véhicule et à la production du carburant. Pour les émissions liées à la fabrication du véhicule, sur la base des valeurs exposées au § 4.1.1.1 la valeur retenue sera de 11 g équivalent carbone par km.

Il nous reste à formuler une dernière hypothèse : que la moyenne "France entière" des émissions au km, pour les déplacements domicile-travail, est la même que celle pour la 2^{ème} couronne parisienne. Compte tenu du fait que 80% de la population métropolitaine réside en ville, et que au sein des agglomérations l'essentiel de la population se trouve ailleurs que dans le centre, cette hypothèse ne doit pas être grossièrement fausse.

Sur cette base, nous obtenons le tableau suivant :

Lieu de résidence du conducteur	Jours travaillés dans l'année	Distance d'un aller simple (km)	Distance annuelle (km)	Fabrication, g équ. C par km	Amont, g équ. C par km	Combustion, g équ. C par km	Total, g équ. C/km	Fabrication kg équ. C par véhicule.an	Amont, kg équ. C par véhicule.an	combustion, kg équ. C par véhicule.an	Total, kg équ. C par véhicule.an	Incertitude totale
périphérie rurale Ile de France	210	20	8 400	11,1	6,0	42,0	59,1	93	50	353	497	16%
banlieue lointaine	210	15	6 300	11,1	7,4	51,5	69,9	70	46	324	440	15%
banlieue urbaine	210	12	5 040	11,1	9,7	68,0	88,9	56	49	343	448	14%
centre ville	210	8,5	3 570	11,1	10,7	74,8	96,6	40	38	267	345	13%
France entière	210	15	6 300	11,1	7,4	51,5	69,9	70	46	324	440	15%

Tableau 10 : Facteurs d'émission par voiture des déplacements domicile travail en fonction du parcours (Métropole)

Le tableau ci-dessus doit être complété par les remarques suivantes :

- le nombre de jours travaillés a été mis à 210 par défaut, et non 220, cette dernière valeur correspondant à la durée légale. Cela correspond à l'observation de ce qui se passe réellement, car le nombre de jours effectivement travaillés est un peu inférieur, en moyenne, à la durée légale, à cause des absences pour maladie ou pour décès, des congés maternité, etc.
- le nombre de jours travaillés et la distance d'un aller simple sont configurés par défaut avec les valeurs ci-dessus dans les tableurs du Bilan Carbone mais restent facilement modifiables par l'utilisateur pour tenir compte de toutes les situations rencontrées (travail à temps partiel ou à domicile, 2 allers retours par jour au lieu d'un seul pour les salariés qui rentrent déjeuner chez eux, etc),
- l'essentiel, les pays européens possèdent un aménagement du territoire et des voitures de caractéristiques similaires à ce que l'on trouve en France. De ce fait les valeurs calculées plus haut pourront, en première approximation, être conservées pour d'autres pays d'Europe. Par contre le nombre de jours travaillés est directement fonction du droit du travail applicable, et devra être adapté au pays considéré.

4.1.1.3.2 Facteurs d'émission par personne venant en voiture, kilométrage connu

Si nous connaissons le kilométrage parcouru par salarié et par an pour venir au travail, et le lieu de résidence de chaque salarié venant en voiture, nous pouvons faire le total des kilomètres parcourus par les salariés de l'entreprise, répartis par type de parcours. En effet, nous pouvons raisonnablement supposer que :

- un salarié habitant en zone rurale fera un parcours de type extra - urbain pour se rendre au travail,
- un salarié habitant en banlieue de ville de province ou en 2^{ème} couronne parisienne fera un parcours de type mixte pour se rendre au travail,
- un salarié habitant en banlieue parisienne proche fera un parcours de type urbain pour se rendre au travail,
- un salarié habitant dans Paris fera un parcours de type urbain+bouchons (nous rajoutons alors 10% aux émissions "urbaines") pour se rendre au travail.

Par ailleurs, à partir des tableaux figurant en Annexe 1 :, nous pouvons disposer de moyennes, tous types de véhicules confondus, par type de parcours :

Type de parcours	Extra-urbain	Mixte	Urbain	Urbain, heures de pointe ²⁰
Emissions par km parcouru, en grammes équivalent carbone	59,1	69,9	88,9	97,8

Tableau 11 : Facteurs d'émission domicile travail en fonction du type de parcours effectué par km (Métropole)

De la sorte, en prenant les kilométrages par type de parcours et les facteurs d'émission par type de parcours, nous pouvons reconstituer des émissions approximatives pour les déplacements domicile - travail. C'est probablement pour l'estimation parisienne que l'incertitude est la plus grande, vu l'importance de l'existence ou non de bouchons et de la cylindrée sur les consommations, donc les émissions.

La marge d'erreur est estimée à 20%, à conditions de travailler sur un parc de quelques dizaines de véhicules au minimum. Si le parc est beaucoup plus faible, il faudra procéder au calcul des émissions véhicule par véhicule, avec les facteurs exposés en Annexe 1 :

Nous retrouvons ici le fait que les marges d'erreur estimées ne sont pas indépendantes du contexte dans lequel les chiffres sont utilisés ; plus l'ensemble étudié est vaste et plus la précision des valeurs par défaut est bonne.

²⁰ Nous avons rajouté forfaitairement 10% pour tenir compte du départ à froid, des embouteillages, etc. Cela peut bien sur être beaucoup plus que cela : une voiture qui consomme 25 litres aux 100 (par exemple un gros monospace, un gros 4x4, une voiture de luxe, etc., circulant dans les embouteillages) émet près du double : 180 grammes équivalent carbone au km !

4.1.1.4 Déplacements en voiture pour motifs professionnels

Ces déplacements sont convertis en émissions de gaz à effet de serre avec les mêmes facteurs d'émission que ceux détaillés au § 4.1.1.3 ci-dessus. Si le kilométrage effectué est important, avec des véhicules très variés, il sera possible de prendre comme facteurs d'émission des moyennes tous véhicules confondus, comme pour les déplacements domicile travail.

4.1.1.5 Déplacements en voiture au titre de la mobilité quotidienne des résidents d'un territoire

Lors de la réalisation d'un Bilan Carbone « territoire », il ne sera bien évidemment jamais possible d'obtenir les distances réellement parcourues par chaque occupant du territoire. Cette approche nécessite donc de disposer de valeurs statistiques pour le nombre de km que chaque personne du territoire effectue en voiture dans l'année, en discriminant idéalement par motif (travail, loisirs, etc) ou par type de déplacement (mobilité quotidienne, qui regroupe travail, courses, école, sport et loisirs de proximité, et quelques motifs connexes, et mobilité longue distance, qui concerne plutôt les loisirs et les déplacements professionnels le cas échéant).

NB : ces données « par défaut » seront aussi proposées pour les autres modes de transport (bus, avion, train), pour les mêmes raisons.

Les données les plus fines disponibles sont malheureusement vieilles de près de 15 ans, et sont issues d'une enquête transports réalisée par l'INSEE²¹, dont les résultats figurent ci-dessous :

²¹ INSEE Enquêtes Transports 1993-1994

	Zones rurales ou ZPIU ²² de moins de 50 000 hab	ZPIU de 50 000 à 300 000 hab		ZPIU de plus de 300 000 hab			ZPIU de Paris		Moyenne nationale
		Ville centre ²³	Banlieue et périphérie	Ville centre	Banlieue	Périphérie	Paris	Banlieue et périphérie	
Nbre de déplacements quotidiens par personne	2,73	3,06	2,87	2,93	2,84	2,57	2,74	2,71	2,83
Distance moyenne par déplacement (en km)	9,70	6,96	9,23	7,06	7,73	10,14	6,16	9,19	8,61
Total	26,47	21,27	26,50	20,67	21,97	26,08	16,89	24,93	24,37
Répartition modale en %									
Marche à pied	12,37	20,59	12,73	23,41	14,29	12,71	30,64	19,41	16,57
Transports collectifs	2,80	4,86	4,29	11,83	7,26	4,13	35,11	13,90	7,74
Voiture particulière	79,94	70,90	77,31	61,21	73,14	77,33	32,09	62,94	71,03
Deux roues	4,64	3,56	5,34	3,54	5,24	5,67	2,01	3,57	4,47
Autres	0,24	0,10	0,33	0,00	0,07	0,16	0,14	0,17	0,19

Tableau 12 : Distances parcourues et répartition modale pour la mobilité quotidienne en Métropole

Faute de données plus récentes, nous avons utilisé celles figurant ci-dessus, sachant que la variation survenue depuis la date de l'enquête porte probablement plus sur le nombre de véhicules en circulation, leur masse et leur puissance moyennes, que sur le kilométrage annuel moyen par personne pour les déplacements quotidiens. En tout état de cause une variation supérieure à 10% semble peu probable au vu de l'évolution des statistiques routières en général.

En effet, les données des Comptes des Transports font ressortir une hausse de 18% des voyageurs.km entre 1994 et 2004, mais l'effet parc en explique l'essentiel : ce dernier a augmenté de plus de 20% sur la même période²⁴.

A partir de ce tableau, il est possible de calculer le kilométrage moyen par personne effectué en voiture au titre de la mobilité quotidienne en 1994 : un Français se déplace de 26,27 (km par jour) x 79,94% (en voiture) x 365 (jours par an) = 7.723 km en voiture par personne et par an en moyenne. Tous les autres kilométrages s'obtiendront de la même manière.

Pour en déduire les kilométrages effectués par les véhicules, il restera à diviser cette distance par le taux moyen d'occupation d'une voiture, qui est de 1,25 personne en moyenne dans le cadre des déplacements en ville²⁵.

Les valeurs obtenues seront affectées d'une incertitude de 10%.

²² ZPIU signifie **zones de peuplement industriel ou urbain** et permet de qualifier le tissu urbain et la taille de l'agglomération en tenant notamment compte du niveau des migrations quotidiennes. Dans le présent document, on confondra cette notion avec celle de taille d'agglomération

²³ Une ville-centre d'unité urbaine multicomcommunale (ou d'agglomération multicomcommunale) est définie comme suit. Si une commune abrite plus de 50% de la population de l'unité urbaine, elle est seule ville-centre. Sinon, toutes les communes qui ont une population supérieure à 50% de la commune la plus peuplée, ainsi que cette dernière, sont villes-centres. Les communes urbaines qui ne sont pas villes-centres constituent la banlieue de l'agglomération multicomcommunale.

²⁴ Tableaux des consommations d'énergie, Observatoire de l'Énergie, 2004 CCFA, 2005

²⁵ Source : SES - Service Economie et Statistique du Ministère Equipement, Transports

4.1.1.6 Déplacements en voiture au titre de la mobilité longue distance des résidents d'un territoire

Dans le cadre des Bilan Carbone « territoire » (pour la France métropolitaine), il sera également nécessaire d'évaluer les déplacements longue distance en voiture des résidents (loisirs, famille, éventuellement courses ou motifs professionnels) autrement qu'en cherchant à obtenir cette information pour chaque résident du territoire.

La matière première nous sera également fournie par une enquête transports de l'INSEE, hélas guère plus récente que celle concernant la mobilité quotidienne, d'où sont tirés les résultats suivants :

Millions de voyageurs*km par semaine selon le mode principal, France entière	Déplacements locaux ²⁶ 1993	Autres déplacements courts ²⁷ 1993	Déplacements longue distance ²⁸ 1993
bicyclette	78	2	0
cyclomoteur	45	0	0
moto	48	1	14
VP ménage conducteur	4 645	499	1 483
VP ménage passager	1 422	77	964
VP hors ménage	1 110	105	463
bus, car	451	35	230
transport ferrés locaux (métro, tram, val)	231	9	0
trains (y compris ter)	240	9	366
tgv	0	0	281
avion	0	0	1 472
autres	28	8	144
total	8 299	446	5 415

Tableau 13 : Millions de véhicule.km par semaine et par mode en 1993, France entière

Sur la base d'une population de 57 millions d'habitants en 1993 (56,6 lors du recensement de 1990), nous pouvons en déduire les kilométrages suivants effectués par personne et par an pour la mobilité longue distance :

²⁶ Origine et destination en France à moins de 80 km vol d'oiseau du domicile

²⁷ Moins de 100 km (80 vol d'oiseau) sortant de ce périmètre; lieu inhabituel - probablement sous-estimés

²⁸ Déplacements longs sortant du cercle des 80 km, relevés à partir de 3 mois d'interview, pas limités au sol national

Mode de déplacement	Km par habitant et par an, longue distance
bicyclette	0
cyclomoteur	0
moto	13
VP ménage conducteur	1 362
VP ménage passager	885
VP hors ménage	425
bus, car	211
transport ferrés locaux (métro, tram, val)	0
trains (y compris ter)	336
tgv	258
avion	1 352
autres	132
Total	4 974

Tableau 14 : Kilomètres parcourus par personne et par an en France en 1993, selon le mode

Le kilométrage effectué en VP conducteur par personne et par an s'assimilera, pour le Bilan Carbone, au nombre de km.véhicule de voiture engendré par personne et par an au titre de cette mobilité. NB : tenir compte également des km effectués comme passager conduirait à un double compte, puisque ces km comme passager supposent les mêmes km comme conducteur pour quelqu'un d'autre ! C'est donc la totalité des véhicule.km effectués comme conducteur qui sert d'assiette, les autres km n'étant que le reflet des taux de remplissages supérieurs à 1. Incidemment notons que ces statistiques donnent un taux de remplissage moyen des véhicules particuliers de 2 pour la longue distance et 1,5 pour les déplacements courts.

Il nous reste à évaluer le % d'augmentation de ce kilométrage depuis 1993. Il s'avère que le nombre de voyageurs.km a augmenté de 18 % entre 1994 et 2004²⁹, mais le parc en circulation a augmenté de 20%. Cela plaide pour que l'augmentation globale du trafic automobile soit essentiellement le reflet de l'augmentation du parc (elle-même liée pour partie à la croissance démographique), et marginalement seulement à l'augmentation de la distance parcourue par personne, ce qui est du reste cohérent avec le fait que le budget temps de transport, exprimé en heures par jour, est remarquablement stable depuis 50 ans, les distances parcourues augmentant à cause de l'augmentation de la vitesse moyenne de déplacement.

En première approximation, nous conserverons donc, pour 2009, la distance parcourue par véhicule et par an en moyenne nationale pour 1993.

Les déplacements totaux de véhicules pour un territoire pourront alors s'obtenir en multipliant ce kilométrage de voiture par la population du territoire.

4.1.2 Bus et cars

Les facteurs d'émissions pour les bus et cars seront calculés en suivant le même cheminement que pour les voitures particulières : il faut d'abord calculer ce qui est relatif à la fabrication, puis fournir

²⁹ Commission des Comptes des transports de la Nation (à partir de DAEI/SESp – UTP – RATP – SNCF – DAC)

des facteurs d'émission liées aux différentes conditions d'utilisation, enfin fournir des valeurs moyennes applicables à des grands ensembles (un territoire).

4.1.2.1 Amortissement des bus et autocars

Cet "amortissement" vise les émissions liées à la fabrication, pour lesquelles nous allons suivre un raisonnement analogue à celui tenu pour les voitures particulières, en repartant des poids à vide. Les véhicules de transport de personnes que nous allons prendre en compte sont les suivants :

- les minibus,
- les autobus urbains,
- les autocars interurbains.

De même que pour les voitures particulières, nous allons convertir les poids à vide en émissions de fabrication. Comme la valeur ajoutée par unité de poids d'un bus est de l'ordre de ce qu'elle est pour l'automobile (un bus d'un peu plus de 10 tonnes de poids à vide coûte environ 150.000 euros, soit de l'ordre de 15.000 euros par tonne, comme pour une voiture de particulier), nous conserverons le facteur d'émission de 1,5 tonne équivalent carbone par tonne de bus.

Les données disponibles sur les sites Internet des constructeurs de bus ou relatifs aux services de transports en commun³⁰ nous amènent à retenir comme valeurs moyennes de poids à vide, de poids total roulant autorisé en charge, et de durée de vie du matériel :

Type de véhicule	PTAC moyen de la catégorie	Poids moyen à vide (t)	Durée de vie en km	Fabrication g équ. C/km
Minibus 20 places	5,6	3,5	300 000	17,7
Autobus urbain	19,0	11,00	1 000 000	16,7
Autocar interurbain (3 essieux)	23,0	15,00	1 500 000	15,1

Tableau 15 : Caractéristiques principales des minibus, autobus urbains et autocars interurbains, et facteur d'émission pour la fabrication ramené au km parcouru. Sources diverses.

La dernière colonne du tableau ci-dessus est bien entendu calculée.

4.1.2.2 Emissions par véhicule.km

Concernant les bus et cars, la publication "Evaluations des efficacités énergétiques et environnementales des transports, ADEME 2002" fournit une valeur pour les émissions par passager.km liées à la seule combustion du carburant (sans tenir compte des émissions amont), ainsi que des taux de remplissage moyens des véhicules, à savoir :

³⁰ Sites de constructeurs : www.heuliezbus.com, www.volvo.com, www.scania.com, www.renault.fr; site relatifs aux transports en commun : www.vmcv.ch, busparisiens.free.fr

Type de véhicule	g équ. carbone par voy.km	Nombre moyen de passagers par véhicule
Autocar interurbain	9,4	29,5
Bus urbain Ile de France	18,2	21,4
Bus urbain province	23,3	10

Tableau 16 : Facteurs d'émission par voyageur.km pour différents types d'autobus (ADEME, 2002)

A partir de ces informations, il est possible d'en déduire des émissions par véhicule.km en réintégrant les émissions amont :

- pour les bus et cars, les émissions par véhicule.km correspondent mécaniquement aux émissions par passager.km multipliées par le nombre moyen de passagers par véhicule (tableau ci-dessous ; les valeurs calculées sont sur fond coloré) ;

Véhicule	Gr CO ₂ /voy.km (Ademe)	passagers par véhicule (Ademe)	grammes de CO ₂ /véhicule.km	g C/véhicule.km	Litres aux 100
Autocar	34,4	29,5	1 015	277	38
Bus Ile de France	66,7	21,4	1 427	389	54
Bus province	85,3	10	853	233	32

- pour les minibus, nous avons supposé une consommation de 15 litres aux 100 (diesel), que nous avons convertie en émissions en utilisant le facteur d'émission du diesel calculé au § 2.2.3 ;
- il suffit de rajouter les émissions de construction (indépendantes du taux de remplissage) et celles liées au cycle amont du carburant (proportionnelles aux émissions de fonctionnement du bus) pour obtenir des émissions complètes par véhicule.km :

Type de bus	Fabrication g équ. C/km	Incertitude fabrication	g équ. C par v.km, amont	g équ. C par v.km, combustion	Incertitude carburant	Incertitude totale
Minibus	17,7	50%	11	109	5%	11%
Autobus urbain Idf	16,7	50%	41	389	5%	7%
Autobus urbain province	16,7	50%	25	233	5%	8%
Autocar interurbain	15,1	50%	29	277	5%	7%

Tableau 17 : Facteurs d'émission par véhicule.km pour différents types d'autobus

A partir de ces valeurs moyennes, et de la variation (théorique) de la consommation en fonction du taux de remplissage, il est possible de reconstituer les consommations - et donc les émissions - véhicule vide et véhicule plein, ce qui permet ensuite, par interpolation linéaire (incluse dans le tableur) de reconstituer une consommation effective en fonction du taux de remplissage correspondant à l'entité qui fait son bilan carbone.

L'hypothèse nécessaire en complément de ce qui précède concerne le supplément de consommation d'un véhicule plein vs. un véhicule vide, qui sera pris égal à 20% (si un bus à vide consomme 1, alors un bus plein consomme 1,2 pour la même distance). Le taux de distance à vide moyen est supposé nul (dit autrement il y a toujours un passager transporté au moins dans un bus qui se déplace). Même si cette hypothèse est fautive en toute rigueur, elle est probablement assez proche de la réalité, dans la mesure où les véhicules de transport en commun effectuent en général des allers-retours le long de lignes régulières où il est rarissime qu'il n'y ait personne au terminus.


Comme historiquement c'est pour les véhicules de transport de marchandises que cette approche (de modulation de la consommation en fonction du taux de remplissage) a été développée, le lecteur se reportera au § 4.2.3 ci-dessous pour connaître les détails du raisonnement et des formules employées (qui sont les mêmes pour les bus que pour les camions).

Les résultats pour les bus sont les suivants :

Type de bus	Nombre max de passagers	Nb moyen de passagers	taux de remplissage moyen	taux de distance à vide (Tdv)	Suppl. plein/vide	g equ C/km à vide, amont	g equ C/km à vide, combustion	g equ C/km à plein, amont	g equ C/km à plein, combustion	Incertitude
Minibus	20	4	20%	0%	1,10	11	107	12	117	11%
Autobus urbain Idf	100	21	21%	0%	1,20	39	373	47	448	7%
Autobus urbain province	100	10	10%	0%	1,20	24	228	29	274	8%
Autocar interurbain	80	30	37%	0%	1,20	27	258	33	309	7%

4.1.2.3 Emissions par passager.km

4.1.2.3.1 Cas général


A partir des émissions par véhicule.km et des taux de remplissage, nous pouvons facilement obtenir des émissions complètes par passager.km. Il suffit de diviser les émissions par véhicule.km par le nombre de passagers présents dans le bus. 

Pour les minibus, nous avons supposé que ce taux de remplissage moyen était, en proportion de la capacité (20 places), le même que pour les autobus Ile de France (20%), soit 4 passagers. Les résultats sont alors les suivants (les incertitudes sont bien entendu les mêmes que pour les émissions par véhicule.km) :

Type de bus	Fabrication, g équ. C par passager.km	amont, g equ C par passager.km	Combustion, g equ C par passager.km	Total, g equ C par passager.km
Minibus	4,4	2,9	27,2	34,5
Autobus urbain Idf	0,8	1,9	18,2	20,9
Autobus urbain province	1,7	2,5	23,3	27,4
Autocar interurbain	0,5	1,0	9,4	10,9

Tableau 18 : Facteurs d'émission par passager.km pour différents types d'autobus

4.1.2.3.2 Kilométrage par défaut pour les déplacements domicile-travail

Pour les déplacements domicile-travail en bus, il suffit de multiplier la distance moyenne au travail par la consommation moyenne par passager.km en bus pour obtenir une émission moyenne par trajet. Les émissions par km étant déjà calculées ci-dessus, il faut juste préciser, pour les personnes concernées, le nombre de jours travaillés dans l'année et le kilométrage séparant domicile du travail. 

C'est pour ce dernier paramètre que nous proposons ci-dessous des valeurs par défaut qui s'accordent au type de bus utilisés de la manière suivante :

- les autobus urbains concernent des actifs résidant dans le centre ville et travaillant dans le centre ville, donc nous avons mis la distance moyenne à 8,5 km

- les minibus sont effectués pour des tournées de ramassage dans des endroits supposés pauvres en transports en commun, donc a priori dans des zones peu densément peuplées, et nous avons fixé la distance moyenne au travail à 12 km,
- enfin les autocars concernent des actifs résidant en grande banlieue ou en zone rurale, avec une distance estimée au travail de 20 km.

Type de bus	distance caract dom-W
Minibus	12
Autobus urbain ldf	8,5
Autobus urbain province	8,5
Autocar interurbain	20

Tableau 19 : Distances moyennes au travail en fonction du type de bus emprunté pour le déplacement domicile-travail

Ces valeurs ne s'appliquent pas aux trams (voir § 4.4.2.1).

4.1.2.4 Déplacements en bus au titre de la mobilité quotidienne des résidents d'un territoire

Pour obtenir des valeurs de référence pour les kilométrages effectués en bus par personne et par an en moyenne, valeurs qui seront nécessaires pour les Bilan Carbone « territoire », nous allons repartir du tableau exposé au § 4.1.1.5 ci-dessus, et en extraire la ligne qui nous intéresse, qui est la suivante :

	Zones rurales ou ZPIU ³¹ de moins de 50 000 hab	ZPIU de 50 000 à 300 000 hab		ZPIU de plus de 300 000 hab			ZPIU de Paris		Ensemble
		Ville ³² centre	Banlieue et périphérie	Ville centre	Banlieue	Périphérie	Paris	Banlieue et périphérie	
Nbre de déplacements quotidiens par personne	2,73	3,06	2,87	2,93	2,84	2,57	2,74	2,71	2,83
Distance moyenne par déplacement (en km)	9,70	6,96	9,23	7,06	7,73	10,14	6,16	9,19	8,61
Total	26,47	21,27	26,50	20,67	21,97	26,08	16,89	24,93	24,37
% effectué en transports collectifs	2,80	4,86	4,29	11,83	7,26	4,13	35,11	13,90	7,74

Tableau 20 : Distance annuelle moyenne parcourue par Français en 1993 et part des transports collectifs

Il est possible de déduire du tableau ci-dessus les valeurs suivantes :

³¹ ZPIU signifie **zones de peuplement industriel ou urbain**, et permet de qualifier le tissu urbain et la taille de l'agglomération en tenant notamment compte du niveau des migrations quotidiennes. Dans le présent document, on confondra cette notion avec celle de taille d'agglomération

³² Une ville-centre d'unité urbaine multicomcommunale (ou d'agglomération multicomcommunale) est définie comme suit. Si une commune abrite plus de 50% de la population de l'unité urbaine, elle est seule ville-centre. Sinon, toutes les communes qui ont une population supérieure à 50% de la commune la plus peuplée, ainsi que cette dernière, sont villes-centres. Les communes urbaines qui ne sont pas villes-centres constituent la banlieue de l'agglomération multicomcommunale.

km par personne et par an, en moyenne	rural	centre ZPIU 50 - 300.000 hab	banlieue ZPIU 50 - 300.000 hab	centre ZPIU > 300.000 hab	banlieue ZPIU > 300.000 hab	périphérie ZPIU > 300.000 hab	Paris intramuros	banlieue parisienne	moyenne nationale
TC	270	377	415	892	582	393	2 165	1 265	689

Tableau 21 : Distance annuelle moyenne parcourue en transport collectif par Français en 1993

Cette information ne permet pas, en elle-même, de disposer d'un kilométrage en bus. Il reste en effet à décider d'une règle d'éclatement entre modes ferrés et modes routiers pour passer de cette donnée globale à celle concernant uniquement les transports collectifs routiers.

Pour cela, nous allons nous appuyer sur un autre résultat de la même enquête transport, qui donne les kilométrages hebdomadaires totaux par mode, et que nous reproduisons ci-dessous :

déplacements en millions de voyageurs*km par semaine selon le mode principal	déplts locaux	autres déplts courts	total court
	1993	1993	1993
bicyclette	78	2	80
cyclomoteur	45	0	45
moto	48	1	49
VP ménage conducteur	4645	499	5144
VP ménage passager	1422	77	1499
VP hors ménage	1110	105	1215
bus, car	451	35	486
transport ferrés locaux (métro, tram, val)	231	9	240
trains (y compris ter)	240	9	249
autres	28	8	36
total	8299	446	8745

Tableau 22 : Kilomètres hebdomadaires totaux par mode, 1993 - source INSEE

Sur la base d'une population à 56,6 millions de personnes, cela donne les résultats suivants pour les kilomètres effectués par personne et par an selon le mode :

Mode de déplacement	Km par habitant et par an en 1993, au titre des déplacements quotidiens
bicyclette	73
cyclomoteur	41
moto	45
VP ménage conducteur	4 725
VP ménage passager	1 377
VP hors ménage	1 116
bus, car	446
transport ferrés locaux (métro, tram, val)	220
trains (y compris ter)	229
tgw	0
avion	0
autres	33
Total	8 032

Tableau 23 : Kilomètres effectués par personne et par an selon le mode, 1993 - source INSEE

Faute de disposer de chiffres plus récents, nous retiendrons ceux-ci, qui permettent de constater que, en moyenne nationale, le fer (métro, tram, TER) et le bus sont à peu près à égalité de parts modales dans les TC pour les déplacements courts. Par ailleurs, ces valeurs indiquent aussi que le TER et les transports ferrés locaux sont aussi à égalité, ce qui fait que, en première approximation, nous considérerons, sauf pour Paris, que par défaut le fer et le bus sont à égalité dans les transports en commun quelle que soit la zone. Par contre, pour Paris, les parts modales du fer (métro/RER) et du

bus sont de 66% et 33% respectivement (source RATP), pourcentages qui seront retenus pour cette agglomération.

De ce fait, les valeurs par défaut qui seront utilisées dans le tableur « territoire » sont les suivantes :

km par personne et par an, en moyenne	rural	centre ZPIU 50 - 300.000 hab	banlieue ZPIU 50 - 300.000 hab	centre ZPIU > 300.000 hab	banlieue ZPIU > 300.000 hab	périphérie ZPIU > 300.000 hab	Paris intramuros	banlieue parisienne	moyenne nationale
TC	270	377	415	892	582	393	2 165	1 265	689
Part modale du bus	50%	50%	50%	50%	50%	50%	33%	33%	50%

Tableau 24 : Kilomètres effectués par personne et par an selon le mode, pour les transports collectifs

4.1.2.5 Déplacements en bus au titre de la mobilité longue distance des résidents d'un territoire

Il est également nécessaire, pour les Bilan Carbone « territoire », de proposer des valeurs de référence pour les kilométrages effectués en bus par personne et par an en moyenne au titre de la mobilité longue distance. Pour cela, nous allons exploiter une autre valeur de l'enquête transports précitée qui est celle de la mobilité longue distance.

Mode	Millions de voyageurs*km par semaine pour la longue distance	Km par personne et par an
moto	14	13
VP ménage conducteur	1483	1 362
VP ménage passager	964	885
VP hors ménage	463	425
bus, car	230	211
trains (y compris ter)	366	336
tgv	281	258
avion	1472	1 352
autres	144	132
total	5415	4 974

Tableau 25 : Kilomètres effectués par personne et par an en longue distance selon le mode - source INSEE

Il faudrait idéalement intégrer un % d'augmentation du kilométrage que chaque personne parcourt en bus et car depuis 1993, sachant que le nombre total de voyageurs.km a augmenté de 3% entre 1994 et 2004³³. Faute de données sur l'évolution du nombre de voyages, nous conservons cette valeur pour cette version du guide des facteurs, soit 211 km en bus et car par personne et par an en moyenne nationale.

Enfin, pour la longue distance, nous supposons, pour le choix du facteur d'émission, que le seul type de véhicule utilisé est l'autocar.

³³ Commission des Comptes des transports de la Nation (à partir de DAEI/SESp – UTP – RATP – SNCF – DAC)

4.1.3 Deux-roues

4.1.3.1 Amortissement des deux-roues

Comme pour les voitures particulières, l'amortissement" permet de prendre en compte les émissions liées à la fabrication des cyclomoteurs et motocycles. Faute d'éléments propres aux deux roues, nous avons utilisé la valeur de 1,5 tonne équivalent carbone par tonne de véhicule calculée pour les voitures particulières (voir § 4.1.1.1).

Par ailleurs, nous pouvons noter que, pour les petites voitures, le supplément lié à la fabrication du véhicule (par rapport aux émissions d'utilisation en cycle mixte) est un peu inférieur à 30%, ainsi qu'il ressort des deux tableaux 72 et 75 (voir Annexe 1 :), dont nous reproduisons une portion ci-dessous

Puissance administrative (CV fiscaux)	Part de la fabrication, g équ. C/km	Emissions liées à la consommation (grammes équ. C/km), selon le type de parcours			Supplément pour la fabrication du véhicule par rapport aux émissions d'utilisation		
		Extra-urbain	Mixte	Urbain	Extra-urbain	Mixte	Urbain
3	10,9	38,9	44,7	54,9	28%	24%	20%
4	11,1	44,7	52,8	67,3	25%	21%	17%
5	10,9	48,8	59,6	78,4	22%	18%	14%

Extrait du tableau situé en Annexe 1 : concernant les facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux essence

Puissance administrative (CV fiscaux)	Part de la fabrication, g équ. C/km	Emissions liées à la consommation (grammes équ. C/km), selon le type de parcours			Supplément pour la fabrication du véhicule par rapport aux émissions d'utilisation		
		Extra-urbain	Mixte	Urbain	Extra-urbain	Mixte	Urbain
3	7,4	29,1	31,9	36,6	26%	23%	20%
4	10,8	37,3	44,7	57,6	29%	24%	19%
5	11,3	43,1	52,2	68,3	26%	22%	17%

Extrait du tableau situé en Annexe 1 : concernant les facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux diesel

On peut ainsi remarquer que plus les voitures sont petites, plus la part des émissions liées à la fabrication a tendance à augmenter. En extrapolant cette observation, nous pouvons raisonnablement supposer que la part des émissions liées à la fabrication des 2 roues est du même ordre que ce qui s'observe pour les petites voitures, soit de l'ordre de 30% des émissions liées à la combustion.

Les valeurs proposées au § 4.1.3.2 ci-dessous pour la partie « carburant » donnent alors les facteurs suivants pour la construction :

Type de cycle	Kg équ carbone par véhicule.km pour la fabrication
Cyclomoteur	0,005
Motocycles < 125 cm ³	0,009
Motocycles > ou = 125 cm ³	0,010

Notons que, le taux de remplissage de ces véhicules étant très proche de 1 (1,02 pour les trajets urbains et 1,07 pour l'interurbain) les émissions par passager.km sont à peu près les mêmes. L'incertitude associée à ce calcul est estimée à 20%.

4.1.3.2 Emissions par véhicule.km liées à la combustion

L'étude ADEME de 2002 concernant "les efficacités énergétiques et environnementales du secteur des transports en 2000" fournit des facteurs d'émission concernant l'utilisation des deux roues (cyclomoteurs et motocycles) en distinguant les trajets en zone urbaine et en zone interurbaine et en précisant les taux d'occupation. Les facteurs d'émission présentés dans cette étude (tableau ci-dessous) sont liés uniquement à la combustion du carburant.

	Kg eqC / voy.km		Kg eqC / veh.km	
	Urbain	Interurbain	Urbain	Interurbain
Cyclomoteurs	0,018		0,018	
Motocycles < 125 cm ³	0,028	0,029	0,029	0,031
Motocycles > ou = 125 cm ³	0,033	0,031	0,033	0,033
Taux d'occupation moyen			1,02	1,07

Tableau 26 : Facteurs d'émission des deux-roues liés à la combustion (ADEME, 2002)

Dans le tableur Bilan Carbone®, nous avons choisi de ne pas discriminer urbain et interurbain, car les facteurs d'émissions des déplacements urbain et interurbains ne sont pas significativement différents. Les valeurs urbaines sont donc appliquées partout.

L'incertitude associée aux facteurs d'émission des deux roues est de 20%.

4.2 TRANSPORT ROUTIER DE MARCHANDISES

Tout comme pour les transports de personnes, la meilleure méthode consiste à partir des consommations réelles des véhicules s'il est possible de connaître ces dernières, en rajoutant par ailleurs les émissions liées à la fabrication du camion ou de la camionnette. Faute de pouvoir procéder de la sorte, divers facteurs d'émission, proposés ci-dessous, permettent néanmoins de parvenir à des ordres de grandeur acceptables à 10% ou 15% près pour reconstituer les émissions en fonction du type de camion utilisé et des kilomètres parcourus, ou des tonnes.km effectuées.

4.2.1 Amortissement des camions et camionnettes

Cet "amortissement" vise les émissions liées à la fabrication, pour lesquelles nous allons également suivre un raisonnement analogue à celui tenu pour les voitures particulières, en repartant des poids à vide. Les véhicules de transport de marchandises se décomposent en deux familles :

- les véhicules en un seul corps, regroupant camionnettes et camions,
- les ensembles articulés, se composant d'un tracteur et d'une remorque.

Les consommations de ces véhicules sont disponibles par classe de PTAC³⁴ auprès de l'Observatoire de l'Energie, qui reprend des statistiques publiées par le Ministère chargé des transports (voir § 4.2.2).

Pour disposer d'une prise en compte exhaustive des émissions liées au transport, il convient d'inclure les émissions liées à la fabrication, ainsi que, en théorie, celles liées à l'entretien des véhicules (voire à la construction et l'entretien des routes ; pour information l'usure de la chaussée est une fonction de la puissance cinquième des véhicules qui y circulent, ce qui revient à dire que la réfection d'une chaussée est en première approximation totalement imputable aux poids lourds). Pour disposer des chiffres concernant la fabrication, il nous faut alors disposer des poids moyens à vide des véhicules en question, et, pour que les données soient sommables, il faut bien entendu que les poids moyens à vide soient disponibles pour les mêmes classes de PTAC que les consommations.

Il nous faudra enfin disposer des kilométrages totaux parcourus, sur la durée de vie, par chaque moyen de transport examiné, afin de pouvoir affecter à chaque km parcouru la quote-part des émissions de fabrication.

Les classes de PTAC pour lesquelles les statistiques de consommation sont publiées sont les suivantes :

Classe de PTAC	
Camionnettes	< 1,5 tonnes
	1,5 à 2,5 tonnes
	2,51 à 3,5 tonnes
	3,5 tonnes
Camions	3,51t à 5 tonnes
	5,1 à 6 tonnes
	6,1 à 10,9 tonnes
	11 à 19 tonnes
	19,1 à 21 tonnes
	21,1 à 32,6 tonnes
tracteurs routiers (PTAC tracteur + remorque : 40 t en général).	

Tableau 27 : Classes de PTAC pour les camionnettes et les camions.

La détermination de ces limites est le fruit de raisons diverses, au sein desquelles les suivantes ont sûrement contribué :

- 3,5 t est la limite supérieure de PTAC pour un utilitaire pouvant se conduire avec le permis B (tourisme).
- 19 t est la limite supérieure pour un véhicule à moteur à deux essieux,
- 26 t est la limite supérieure pour un véhicule à moteur à trois essieux,
- 32 t est la limite supérieure pour un véhicule à moteur à quatre essieux ou plus.

Enfin les ensembles articulés (appelés communément "semi-remorques") sont en quasi-totalité constitués de tracteurs de 7 t de poids environ, tractant des remorques dont le poids à vide est de 8t

³⁴ PTAC : Poids Total Autorisé en Charge

environ. La capacité maximale de fret de ces ensembles est de 25 t, pour parvenir à un poids total en charge de 40 tonnes environ.

Dans un premier temps, nous allons vérifier que le fait de raisonner par catégorie de PTAC n'induit pas une trop grande imprécision des résultats. Pour cela nous allons travailler sur le nombre de véhicules en circulation au 1^{er} janvier 2002 par PTAC, fourni par le Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (voir Annexe 2 :). Par exemple nous savons que la France comptait à cette date 1.554 véhicules de moins de 10 ans d'âge et ayant un PTAC de 6 tonnes exactement.

Nous pouvons alors calculer le PTAC moyen pour les diverses catégories du Tableau 28 :, et constater par ailleurs que chaque catégorie présente des pics de concentration autour de quelques PTAC particuliers. Les graphiques représentant cette répartition, et l'écart entre les PTAC des points d'accumulation et le PTAC moyen de la catégorie est donné en Annexe 2 :.

La conclusion importante que nous pouvons en tirer est que, pour chaque catégorie de PTAC, l'écart maximal entre le PTAC moyen et le PTAC des véhicules les plus usuels de la catégorie (là où il y a le point d'accumulation, c'est-à-dire le pic sur le graphique) est de 20% au maximum. Cette indication est importante à double titre :

- d'une part les émissions de fabrication sont fonction du poids à vide, assez bien corrélé au PTAC,
- d'autre part nous verrons plus loin que la consommation moyenne du véhicule est aussi très bien corrélée à son PTAC.

En d'autres termes, en basant les calculs sur les PTAC moyens, l'écart entre cette moyenne et les valeurs applicables aux véhicules les plus répandus de la catégorie ne sera jamais supérieur à 20%.

Pour obtenir le poids à vide d'un véhicule donné lorsque nous avons le PTAC, il faut bien sûr connaître la charge utile maximale transportée, afin de la déduire du PTAC.

Ces charges utiles ont été déterminées comme suit :

- pour certains camions, elles sont notoires dans le milieu des transporteurs. Ce cas de figure concerne les ensembles articulés (40 tonnes de PTAC, 25 tonnes de charge utile au maximum), mais aussi les camions de 19 t de PTAC (13 tonnes de charge utile maximum) ou encore les camionnettes de 7,5 t de PTAC (4 t de charge utile maximum).
- pour les PTAC inférieurs ou égaux à 3,5 tonnes, les PTAC moyens et charges utiles maximales moyennes sont donnés par le Ministère des Transports³⁵
- pour les autres classes, nous avons interpolé le rapport entre PTAC et charge utile maximale à partir des valeurs ci-dessus.

³⁵ L'Utilisation des véhicules utilitaires légers en 2000 - Ministère des Transports/SES

Classe de PTAC	Moyenne du PTAC de la catégorie (tonnes)	Poids moyen à vide (tonnes)	Moyenne de la charge utile maximale (tonnes)
< 1,5 tonnes	1,30	0,90	0,40
1,5 à 2,5 tonnes	1,80	1,10	0,70
2,51 à 3,5 tonnes	2,90	1,70	1,20
3,5 tonnes	3,50	2,10	1,40
3,51 à 5 tonnes	4,74	2,37	2,37
5,1 à 6 tonnes	5,67	2,84	2,84
6,1 à 10,9 tonnes	8,80	4,11	4,69
11 à 19 tonnes	16,32	6,53	9,79
19,1 à 21 tonnes	19,37	7,75	11,62
21,1 à 32,6 tonnes	26,87	10,21	16,66
tracteurs routiers	40,00	15,00	25,00

Tableau 28 : Caractéristiques PTAC

Enfin pour pouvoir disposer d'une contribution de la construction aux émissions par km il reste à connaître les "durées de vie", exprimées en km parcourus, des véhicules en question. Ces renseignements ont été pour partie obtenus sur le site du Comité National Routier, et pour le reste ils ont été aussi extrapolés :

Classe de PTAC	Durée de vie en km ³⁶
< 1,5 t essence	150 000
< 1,5 t diesel	200 000
1,5 à 2,5 tonnes essence	150 000
1,5 à 2,5 tonnes diesel	200 000
2,51 à 3,5 tonnes essence	200 000
2,51 à 3,5 tonnes diesel	250 000
3,5 tonnes	300 000
3,51 à 5 tonnes	300 000
5,1 à 6 tonnes	300 000
6,1 à 10,9 tonnes	380 000
11 à 19 tonnes	480 000
19,1 à 21 tonnes	550 000
21,1 à 32,6 tonnes	650 000
tracteurs routiers	750 000

Tableau 29 : Durée de vie moyenne des véhicules en km en fonction de la classe de PTAC

Notons que la corrélation, ici du deuxième ordre, entre durée de vie et PTAC, est excellente avec les valeurs retenues lorsque les statistiques ne sont pas disponibles (graphique ci-dessous).

³⁶ Source : Comité National Routier pour les catégories 6,1 à 10,9 t ; 11 à 19 t ; tracteurs routiers ; extrapolation pour les catégories intermédiaires ; estimation de l'auteur pour les véhicules de PTAC inférieur à 6 tonnes.

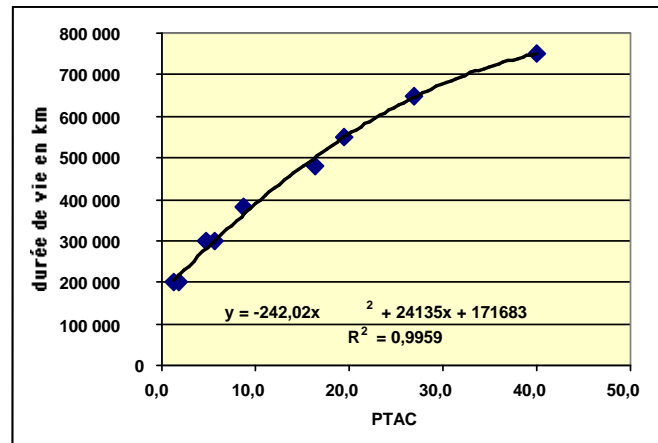


Figure 1 : Corrélation entre la durée de vie et le PTAC des camions et camionnettes.

De même que pour les voitures particulières, nous allons convertir les poids à vide en émissions de fabrication. Comme la valeur ajoutée par unité de poids d'un camion est inférieure d'un facteur 2 à ce qu'elle est pour l'automobile (un semi-remorque de 15 tonnes de poids à vide coûte environ 100.000 euros, soit 6.000 euros par tonne, quand un véhicule particulier coûte de 12 à 15.000 euros par tonne), le facteur permettant de convertir les poids en émissions pourrait théoriquement être inférieur à 1,5 tonne équivalent carbone par tonne de camion. Cela étant, l'aluminium (2,6 tonnes équ. C/tonne) est un métal plus fréquemment employé pour les poids lourds (pour fabriquer les remorques) que pour les véhicules particuliers, et pour la partie "tracteur" (moteur, cabine, etc.) les émissions de fabrication par unité de poids n'ont pas de raison particulière d'être considérablement inférieures à ce qu'elles sont pour l'automobile. Jusqu'à plus ample informé, nous garderons donc ce facteur de 1,5 tonne d'équivalent carbone par tonne de poids de camion, qui n'a de toutes façons pas d'influence considérable sur les émissions par véhicule.km.

De la sorte, la division des émissions de fabrication par le kilométrage parcouru donne, aux émissions liées à l'entretien près, la contribution des postes autres que le carburant aux km parcourus.

Classe de PTAC	PTAC moyen	Poids moyen à vide (t)	Durée de vie en km	Fabrication g équ. C/km
< 1,5 t essence	1,30	0,90	150 000	9,1
< 1,5 t diesel	1,30	0,90	200 000	6,8
1,5 à 2,5 tonnes essence	1,80	1,10	150 000	11,1
1,5 à 2,5 tonnes diesel	1,80	1,10	200 000	8,3
2,51 à 3,5 tonnes essence	2,90	1,70	200 000	12,9
2,51 à 3,5 tonnes diesel	2,90	1,70	250 000	10,3
3,5 tonnes	3,50	2,10	300 000	10,6
3,51 à 5 tonnes	4,74	2,37	300 000	12,0
5,1 à 6 tonnes	5,67	2,84	300 000	14,3
6,1 à 10,9 tonnes	8,80	4,11	380 000	16,4
11 à 19 tonnes	16,32	6,53	480 000	20,6
19,1 à 21 tonnes	19,37	7,75	550 000	21,3
21,1 à 32,6 tonnes	26,87	10,21	650 000	23,8
tracteurs routiers	40,00	15,00	750 000	30,3

Tableau 30 : Facteurs d'émission de la fabrication des véhicules en fonction de leur classe de PTAC

Les marges d'incertitude sur ces données sont les suivantes :

- 10% sur les poids moyens à vide (erreur provenant d'un biais statistique sur l'échantillon étudié),
- 50% sur les émissions de fabrication du camion par unité de poids (soit une fourchette de 0,7 tonne de C à 2,25 tonnes de C/tonne de camion),
- 10% sur les kilométrages moyens parcourus par les véhicules avant d'être mis au rebut (cette donnée découle de l'observation).

La part liée à la construction sera donc affectée d'une incertitude de 70%, sauf pour les utilitaires les plus légers (PTAC < 2,5 tonnes) pour lesquels nous conserverons les barres d'erreur de l'automobile, soit 40%. Dans tous les cas de figure il s'agit clairement d'un ordre de grandeur, qu'il serait utile de préciser en procédant aux investigations appropriées (en clair il conviendrait de faire le Bilan Carbone d'un constructeur de véhicules utilitaires).

4.2.2 Consommations moyennes par véhicule.km par classe de PTAC

Les données publiées sur les consommations en carburant du transport de marchandises distinguent généralement, pour les camions, les exploitations en compte propre (c'est-à-dire lorsque le transport est effectué pour le compte de la société qui possède le camion) et celles en compte d'autrui (ce qui concerne tous les transporteurs qui travaillent pour d'autres sociétés). Toutefois les données disponibles pour les utilitaires (moins de 3,5 tonnes de PTAC) ne permettent pas d'avoir cette distinction.

Nous avons choisi, pour cette méthode, de ne retenir que les consommations en compte d'autrui. En effet, si une société possède sa propre flotte il est évident qu'elle a les moyens de connaître les consommations qui s'y rapportent, même si elle ne comptabilise que des factures de carburant. La présente méthode étant destinée à proposer des facteurs d'émission à des entités qui n'ont pas les moyens de connaître les consommations de carburant, il paraît raisonnable de considérer que c'est le transport pour le compte d'autrui qui sera concerné de manière quasi-exclusive. En outre le compte propre concerne beaucoup le BTP, qui utilise des camions dans des conditions de circulation qui lui sont particulières, et inclure ces données dans des calculs qui serviront surtout aux entreprises qui font expédier des produits manufacturés par un transporteur engendre plus fréquemment un biais qu'une valeur ajoutée supplémentaire.

Le tableau ci-dessous fournit donc la consommation moyenne tous types de propriétaires confondus jusqu'à 5 tonnes de PTAC, et la seule consommation en compte d'autrui (c'est-à-dire des seuls transporteurs routiers) pour les véhicules à partir de 5 tonnes de PTAC. Il s'agit d'une moyenne tous types de trajets confondus, sachant que 20% des trajets environ sont faits à vide.

Avec les facteurs d'émission pour les carburants calculés au § 2.2.3, nous pouvons également fournir les émissions par véhicule.km, qui serviront de référence pour la suite.

Classe de PTAC	Litres aux 100 km	g équ. C par km, amont	g équ. C par km, combustion
< 1,5 t essence	8,4	9,4	55,6
< 1,5 t diesel	7,2	5,5	52,3
1,5 à 2,5 tonnes essence	9,5	10,6	62,8
1,5 à 2,5 tonnes diesel	8,4	6,4	61,0
2,51 à 3,5 tonnes essence	16,7	18,6	110,5
2,51 à 3,5 tonnes diesel	10,8	8,3	78,4
3,5 tonnes	12,4	9,5	90,0
3,51 à 5 tonnes	18,5	14,2	134,3
5,1 à 6 tonnes	14,5	11,1	105,3
6,1 à 10,9 tonnes	21,9	16,8	159,0
11 à 19 tonnes	29,6	22,7	214,9
19,1 à 21 tonnes	34,2	26,2	248,3
21,1 à 32,6 tonnes	42,8	32,8	310,7
tracteurs routiers	37,1	28,4	269,3

Tableau 31 : Consommation des véhicules par km et par classe de PTAC, et émissions associées - Source : Tableaux des consommations d'énergie en France, Direction Générale de l'Énergie et des matières premières, Observatoire de l'Énergie, édition 2001

Ces consommations découlant d'observations sur un échantillon (c'est comme cela que les chiffres sont établis par le Ministère), la source d'incertitude est la représentativité de l'échantillon pris par rapport au parc réellement en service. Ce biais est probablement faible, et nous l'avons estimé à 5% de manière forfaitaire.

En intégrant les émissions de fabrication, avec leur incertitude propre, nous pouvons alors parvenir à des émissions moyennes par véhicule.km qui tiennent compte à la fois des consommations de carburant et de la fabrication.

Classe de PTAC	g équ. C par km, amont	g équ. C par km, combustion	Incertitude sur conso	Fabrication g équ. C/km	Incertitude sur fabrication	Soit g par véhicule.km	Incertitude totale
< 1,5 t essence	9,4	55,6	5%	9,1	40%	74,0	9%
< 1,5 t diesel	5,5	52,3	5%	6,8	40%	64,6	9%
1,5 à 2,5 t essence	10,6	62,8	5%	11,1	50%	84,5	11%
1,5 à 2,5 t diesel	6,4	61,0	5%	8,3	50%	75,7	10%
2,51 à 3,5 t essence	18,6	110,5	5%	12,9	70%	141,9	11%
2,51 à 3,5 t diesel	8,3	78,4	5%	10,3	70%	97,0	12%
3,5 t	9,5	90,0	5%	10,6	70%	110,1	11%
3,51 à 5 t	14,2	134,3	5%	12,0	70%	160,4	10%
5,1 à 6 t	11,1	105,3	5%	14,3	70%	130,7	12%
6,1 à 10,9 t	16,8	159,0	5%	16,4	70%	192,1	11%
11 à 19 t	22,7	214,9	5%	20,6	70%	258,1	10%
19,1 à 21 t	26,2	248,3	5%	21,3	70%	295,8	10%
21,1 à 32,6 tonnes	32,8	310,7	5%	23,8	70%	367,3	9%
tracteurs routiers	28,4	269,3	5%	30,3	70%	328,0	11%

Tableau 32 : Facteurs d'émission moyens par véhicule.km par classe de PTAC

Notons tout de suite que l'incertitude globale provient pour l'essentiel de celle liée aux émissions de fabrication.

Enfin si nous effectuons une régression linéaire avec les facteurs ci-dessus, nous obtenons la courbe ci-dessous, qui montre l'existence d'une corrélation relativement fiable entre PTAC et émissions par véhicule.km tous facteurs agrégés.

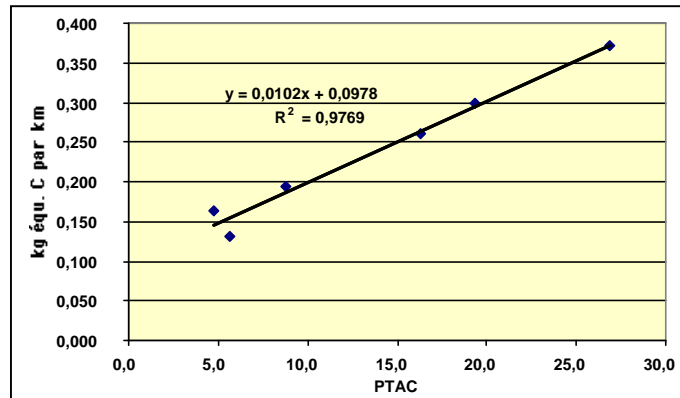


Figure 2 : Corrélation entre le PTAC et les émissions par véhicule.km

Il existe une exception : la consommation des véhicules de 3,51 à 6 tonnes semble aberrante³⁷, en ce sens qu'elle est à l'écart de la régression. De fait, si nous faisons une régression en ôtant ces valeurs, nous obtenons alors la nouvelle courbe ci-dessous, qui offre une excellente corrélation, et que nous utiliserons pour estimer les **émissions moyennes** par véhicule.km lorsque nous connaissons le PTAC d'un véhicule particulier.

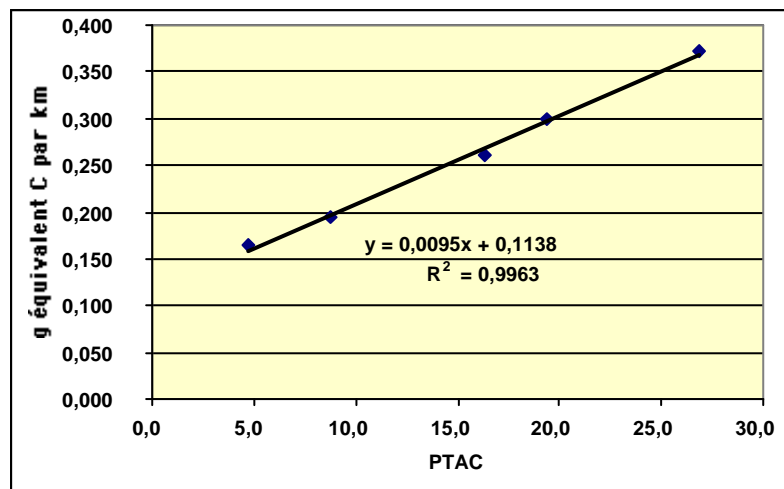


Figure 3 : Corrélation entre le PTAC et les émissions moyennes par véhicule.km pour les véhicules particuliers

Une telle relation linéaire entre poids et consommation se retrouve du reste dans d'autres études sur les camions³⁸, et lorsque l'on se rappelle que l'énergie de déplacement (l'énergie cinétique) est proportionnelle à la masse, ce ne sera finalement pas si étonnant que cela.

³⁷ En fait ces classes représentent très peu de véhicules, et sont à cheval sur les deux enquêtes complémentaires du Ministère des Transports : celle sur les véhicules de charge utile < 3 tonnes (VUL) et celle sur les véhicules de charge utile > 3 tonnes (TRM), dans lesquelles ils apparaissent respectivement dans les catégories "3,6 t et plus" ou "6,0 t et moins", ce qui n'est pas rigoureusement la même chose que "3,6 à 5 t" et "5 t à 6 t"

³⁸ Christophe RIZET et Basile KEÏTA / INRETS / novembre 2000 / Choix logistiques des entreprises et consommation d'énergie / page 33.

Dès lors que le PTAC exact du véhicule qui sert à acheminer des produits ou des matières premières particuliers est connu sans que la consommation du véhicule ne le soit, il sera possible d'utiliser la formule figurant sur le graphique pour déterminer ses émissions par véhicule.km, sans pouvoir discriminer, il est vrai, la fabrication de l'amont de la combustion du carburant.

La marge d'erreur estimée est de 10%, sachant que les consommations par type de camion sont très voisines d'un transporteur à un autre, le carburant étant un poste de charge important et les marges très faibles (en clair si un transporteur consomme 10% de plus que son voisin, le carburant représentant 25% des coûts, il "mange" sa marge, qui est de 2%).

4.2.3 Facteurs d'émission par véhicule.km tenant compte du taux de remplissage et de parcours à vide

4.2.3.1 Raisonement

Nous avons proposé ci-dessus des facteurs d'émission correspondant à la moyenne, pour une classe de PTAC, mais intégrant tous types de parcours, de taux de charge, et de taux de distance à vide. En effet, en pratique, un véhicule routier réalise une partie de ses trajets en charge, avec une certaine charge variable, et autre partie de ses trajets à vide.

En outre, si nous voulons qu'un utilisateur du Bilan Carbone évalue ce qu'il pourrait gagner avec des camions mieux remplis, ou des trajets à vide plus réduits, il faut pouvoir faire varier la consommation des véhicules en fonction de ces paramètres. C'est l'objet de ce qui suit.

Pour définir la règle de variation, nous prendrons l'hypothèse, communément admise, que la consommation d'un véhicule donné (et donc les émissions de gaz à effet de serre qui sont proportionnelles à la consommation) varie linéairement en fonction de la charge transportée³⁹.

Les émissions de gaz à effet de serre liées à la combustion du carburant d'un véhicule (E_v) peuvent alors s'exprimer en fonction des 5 éléments suivants :

- l'émission par km à vide : E_{vv} ,
- l'émission par km à pleine charge : E_{vpc} ,
- le tonnage correspondant à cette pleine charge (c'est-à-dire la charge utile maximale CU),
- le taux de distance à vide T_{dv} (c'est-à-dire la fraction du parcours considéré qui est effectué à vide),
- le taux de remplissage moyen T_{rm} sur la partie du trajet qui est faite en charge.

Les 3 premiers éléments sont caractéristiques du véhicule, les 2 derniers sont caractéristiques de l'utilisation qui est faite du véhicule. On peut donc dire qu'il n'y a que deux variables pour un véhicule donné.

³⁹ C'est ainsi qu'elle est modélisée dans la méthodologie du programme Copert III

Les émissions par véhicule.km E_v sont alors données par la formule suivante :

$$\text{Emissions totales} = \text{émissions pour la partie à vide} + \text{émissions pour la partie en charge}$$

Soit encore

$$E_v = (\text{émissions pour la partie à vide} + \text{émissions pour la partie en charge}) / (\text{distance totale})$$

Soit encore

$$E_v = (\text{émissions pour la partie à vide}) / (\text{distance totale}) + (\text{émissions pour la partie en charge}) / (\text{distance totale})$$

Soit encore

$$E_v = (\text{émissions par km à vide}) * (\text{distance à vide}) / (\text{distance totale}) + (\text{émissions par km en charge}) * (\text{distance en charge}) / (\text{distance totale})$$

Soit encore

$$E_v = E_{vv} * (\text{distance à vide} / \text{distance totale}) + (\text{émissions par km en charge}) * (\text{distance en charge}) / (\text{distance totale})$$

Soit encore

$$E_v = E_{vv} * T_{dv} + (\text{émissions par km en charge}) * (1 - T_{dv})$$

Avec l'hypothèse d'augmentation linéaire de la consommation selon la charge T_m , nous avons :

$$\text{Emissions par km en charge} = \text{émissions par km à vide} + \text{différentiel lié à la charge}$$

Soit encore

$$\text{Emissions par km en charge} = E_{vv} + (E_{vpc} - E_{vv}) * T_m$$

De la sorte nous parvenons à la formule

$$E_v = E_{vv} * T_{dv} + [E_{vv} + (E_{vpc} - E_{vv}) * T_m] * (1 - T_{dv})$$

Qui peut encore s'écrire :

$$E_v = E_{vv} + (E_{vpc} - E_{vv}) * (1 - T_{dv}) * T_m$$

Les variables du transport considéré, T_{dv} et T_m , sont ainsi individualisées dans la formule, à condition de connaître E_{vv} , E_{vpc} . Il reste donc à trouver ou déterminer les consommations à vide et à pleine charge.

En fait, c'est l'inverse que nous allons faire : les chiffres mentionnés au § 4.2.2 sont basés sur des véhicules en utilisation réelle, c'est-à-dire qu'ils réalisent une partie de leurs trajets à vide, et le reste avec une charge moyenne. L'information des consommations à vide et à pleine charge n'est donc pas immédiatement fournie par cette source.

Il faut donc parvenir à inclure les émissions à vide et celles en pleine charge dans un système linéaire comportant autant d'équations que d'inconnues, que nous pourrons ensuite résoudre.

4.2.3.2 Détermination des consommations à vide et à pleine charge

Pour savoir comment se comparent les consommations à vide et à pleine charge, nous nous sommes appuyés sur la méthodologie COPERT III ⁴⁰, qui stipule :

- qu'il ne faut prendre aucune variation de la consommation quelque soit la charge pour les utilitaires légers,
- que pour les camions (PTAC > 3,5 t) il y a une surconsommation de 44% à pleine charge par rapport à la consommation à vide.

Nous pouvons donc écrire que :

$$E_{vpc} = a * E_{vv} \text{ (ou } a \text{ est le coefficient} = 1 \text{ pour les utilitaires légers et } 1,44 \text{ pour les PTAC} > 3,5 \text{ t).}$$

La formule énoncée plus haut pour calculer E_v :

$$E_v = E_{vv} + (E_{vpc} - E_{vv}) * (1 - T_{dv}) * T_{rm}$$

peut alors faire apparaître comment calculer E_{vv} si l'on connaît les autres valeurs :

$$E_{vv} = E_v \div [1 + (a - 1) * (1 - T_{dv}) * T_{rm}]$$

Or dans les divers termes de la partie droite de l'équation :

- a est connu
- restent T_{dv} et T_{rm} , qui font l'objet d'une publication annuelle avec les valeurs suivantes:

⁴⁰ Nov 2000 - voir toutes les informations sur Internet : <http://lat.eng.auth.gr/copert/>

PTAC	Taux de distance à vide (T_{dv}) ⁴¹	Charge utile maximale	Tonnage moyen par véhicule (T_m) ⁴²	Taux de remplissage moyen (T_{rm}) ⁴³
< 1,5 t essence	20,0%	0,40	0,12	30%
< 1,5 t diesel	20,0%	0,40	0,12	30%
1,5 à 2,5 t essence	20,0%	0,70	0,21	30%
1,5 à 2,5 t diesel	20,0%	0,70	0,21	30%
2,51 à 3,5 t essence	20,0%	1,20	0,36	30%
2,51 à 3,5 t diesel	20,0%	1,20	0,36	30%
3,5 t	20,0%	1,40	0,42	30%
3,51t à 5 t	20,0%	2,37	0,71	30%
5,1 à 6 t	20,0%	2,84	0,85	30%
6,1 à 10,9 t	19,0%	4,69	1,65	35%
11 à 19 t	17,8%	9,79	4,24	43%
19,1 à 21 t	15,0%	11,62	4,93	42%
21,1 à 32,6 tonnes	29,9%	16,66	8,27	50%
tracteurs routiers	21,1%	25,00	14,31	57%

Tableau 33 : Caractéristique du transport de marchandises en fonction de la classe de PTAC en métropole

Le taux de remplissage moyen, T_{rm} , figurant en dernière colonne ci-dessus, est calculé comme la division de la charge moyenne transportée (T_m) par la charge utile maximale (CU) :

$$Trm = Tm \div CU$$

Pour les PTAC < 3,5 t, faute de données publiées sur les charges moyennes transportées, les taux de remplissage moyens ont été fixés à 30% de la charge utile, mais dans la mesure où nous ne disposons pas d'une formule ajustant les consommations à la charge transportée, cela est de toute façon sans importance pour les émissions par véhicule.km (par contre, cela influera sur les émissions moyennes par tonne.km).

Enfin tout le raisonnement effectué plus haut peut très bien s'individualiser pour les émissions de production du carburant ainsi que pour les émissions de combustion seules. Cela permet d'obtenir les informations caractéristiques des véhicules ci-dessous :

⁴¹ Ministère chargé du transport, DAEI-SES, Utilisation des véhicules de TRM, année 2001 (transport pour compte d'autrui)

⁴² Exploitation du fichier SITRAM-TRM année 2000 (global comptes propre et d'autrui)

⁴³ Celui-ci correspond au tonnage moyen par véhicule (T_m) divisé par la charge utile maximale (CU).

PTAC	Emissions amont (g équ. C/vehicule.km)		Emissions de combustion (g équ. C/vehicule.km)		Charge utile maximale CU (tonnes)
	à vide	A pleine charge	A vide	A pleine charge	
< 1,5 t essence	9	9	56	56	0,40
< 1,5 t diesel	6	6	52	52	0,40
1,5 à 2,5 t essence	11	11	63	63	0,70
1,5 à 2,5 t diesel	6	6	61	61	0,70
2,51 à 3,5 t essence	19	19	110	110	1,20
2,51 à 3,5 t diesel	8	8	78	78	1,20
3,5 t	9	9	90	90	1,40
3,51 à 5 t	13	18	121	175	2,37
de 5,1 t à 6 t	10	14	95	137	2,84
de 6,1 t à 10,9 t	15	21	141	203	4,69
de 11 t à 19 t	20	28	186	267	9,79
de 19,1 t à 21 t	23	33	214	308	11,62
21,1 à 32,6 tonnes	28	41	270	388	16,66
tracteurs routiers	24	34	225	323	25,00

Tableau 34 : Facteurs d'émission à vide et à pleine charge du transport de marchandises en métropole

Ces informations permettent donc de connaître le facteur d'émission applicable au trajet considéré lorsque sont connus :

- le taux de distance à vide,
- le taux de remplissage moyen.

Si l'entreprise connaît ces deux paramètres, elle pourra alors les utiliser grâce à la formule énoncée plus haut :

$$E_v = E_{vv} + (E_{vpc} - E_{vv}) * (1 - T_{dv}) * T_{rm}$$

Si elle ne les connaît pas, alors on pourra employer par défaut les moyennes nationales (pour les paramètres), présentées dans le Tableau 36 : ci-dessus.

Remarque importante : le mode de fonctionnement des transporteurs routiers et les caractéristiques des camions employés étant très similaires d'un pays d'Europe à un autre, les émissions ci-dessus pour les trajets à vide et à pleine charge sont utilisables tels quels pour le reste de l'Europe, et même pour le reste du monde à l'exception des pays d'Amérique du Nord et éventuellement de Russie.

Par contre les taux de distance à vide et la charge moyenne transportée pour les trajets en charge devront probablement être obtenus pour les autres pays que la France, faute de quoi les émissions par véhicule.km risquent d'être erronées de 10% à 20%.

4.2.3.3 Réintégration des émissions de fabrication

Le raisonnement ci-dessus ne concernant que les émissions liées à l'emploi de carburant, les émissions "complètes" par véhicule.km seront obtenues par la formule :

$$E_v = E_{fab} + E_{vv} + (E_{vpc} - E_{vv}) * (1 - T_{dv}) * T_{rm}$$

E_{fab} désigne ici les émissions de fabrication rapportées au km, suivant les calculs du § 4.2.2. La formule complète est celle qui sert aux calculs dans le tableur, de telle sorte que le facteur

d'émission applicable varie automatiquement en fonction des informations disponibles, à savoir les taux de distance à vide et de remplissage en charge.

4.2.4 Facteurs d'émission par tonne.km tenant compte du taux de remplissage et de parcours à vide

Les facteurs d'émission que nous allons présenter au sein de ce paragraphe concernent plus particulièrement les transports de marchandises effectués par des prestataires externes : expéditions confiés à des transporteurs, ou livraisons par les fournisseurs. Dans le jargon des métiers du transport, cela s'appelle les transports pour compte d'autrui : le camion effectue un trajet pour transporter les marchandises de "quelqu'un d'autre", et non celles de la société qui le possède.

Dans ce cas de figure, les informations commodément accessibles dans l'entité qui fait son Bilan Carbone seront les poids des marchandises expédiées, et les distances, reconstituées d'après le point de départ et celui d'arrivée. Avec ces deux informations on peut facilement en obtenir une troisième, qui s'appelle les tonnes.km. Le calcul est une simple multiplication : pour un trajet donné, où G tonnes sont expédiées à Z kilomètres, nous aurons $G \times Z$ tonnes.kilomètres.

Ces tonnes.km sont sommables : si l'entreprise expédie G tonnes à Z kilomètres une fois par jour, à la fin de l'année elle aura expédié $365 \times G \times Z$ tonnes.kilomètres. Si une entreprise expédie H tonnes dans l'année, à Z kilomètres à chaque fois, nous aurons $H \times Z$ tonnes.kilomètres expédiées à la fin de l'année.

En face de cette unité, facile à calculer, il est possible de mettre un facteur d'émission spécifique, ce qui rend alors l'approche sur les émissions du fret particulièrement rapide.

Cette unité a un autre avantage : les tonnes.km peuvent se répartir par moyen de transport. Ainsi, si une entreprise expédie 1000 tonnes.km, on peut en avoir 800 faits dans un tracteur routier et 200 dans un porteur réseau de 12 tonnes de PTAC. Ce cas de figure correspond tout simplement à la situation où 80% du kilométrage sera fait en tracteur et le reste en porteur.

La donnée dont une entreprise dispose le plus facilement est donc le total de ses tonnes.km par destination, obtenues tout simplement en multipliant le poids des expéditions par la distance parcourue. En pratique, le tonnage expédié par destination est généralement connu ou facile à déterminer, de même que la distance à parcourir pour chaque destination (sinon celle-ci peut se reconstituer assez facilement avec les utilitaires mentionnés pour chaque mode de transport, notamment le site Infotrafic mentionné au § 4.2.6 ci-dessous).

Bien évidemment, quand une entreprise ou une autre entité fait appel à un transporteur, ce dernier ne lui fournit pas de décompte des tonnes.km par type de camion. Pour aider les utilisateurs du Bilan Carbone à surmonter cette difficulté, l'ADEME a élaboré un utilitaire dit « fret-route-tkm »⁴⁴ (fourni en complément du tableur du Bilan Carbone) qui réalise l'éclatement des tonnes.kilomètre par type de véhicules pour l'ensemble des marchandises transportées, en se basant sur les modes de

⁴⁴ Toutes les informations concernant cet utilitaire sont précisées dans le "Manuel d'utilisation du tableur Bilan Carbone.xls".

fonctionnement standard des transporteurs routiers. Les principes de base et le mode d'emploi sont fournis en annexe au manuel d'utilisation du Bilan Carbone.

Ce qui suit décrit maintenant comment on passe d'un facteur d'émission par véhicule.km à un facteur d'émission par tonne.km. Pour ce faire, nous allons utiliser la relation suivante, valable si le camion ne transporte que des marchandises de l'entreprise :

$$\text{Véhicules.km} = (\text{tonnes.km}) \div (\text{poids moyen d'une cargaison})$$

Par exemple, si nous avons 1.000 tonnes.km transportées par un camion dont la charge moyenne lors d'un voyage est de 4 tonnes, alors cela signifie que ce camion aura parcouru 250 km.

Plus généralement, si le camion est rempli avec des marchandises d'expéditeurs divers, c'est la relation suivante qui sera employée

$$\text{Véhicules.km} = [(\text{tonnes.km}) \div (\text{poids moyen d'une cargaison})] * (\text{pourcentage de la charge transportée constituée par les marchandises de l'entreprise})$$

Le poids moyen d'une cargaison peut ensuite s'exprimer par la relation :

$$\text{Poids moyen} = \text{charge maximale du camion rempli en totalité} * \text{coefficient de remplissage moyen}$$

Le tableur intègrera alors une formule permettant de convertir les tonnes.km en véhicules.km bâtie comme suit :

$$(i) \text{ Kg équ. C par tonne.km} = \text{kg équ. C par véhicule.km} \div (\text{poids de la charge utile maximale} * \text{taux de remplissage moyen sur l'ensemble du parcours})$$

Or

$$\text{Taux de remplissage moyen sur l'ensemble du parcours} = (\text{charge transportée} * \text{distance en charge}) \div (\text{charge maximale} * \text{distance totale})$$

Soit

$$\text{Taux de remplissage moyen sur l'ensemble du parcours} = \text{charge transportée} * (\text{distance en charge} \div \text{distance totale}) \div \text{charge maximale}$$

Ou encore, avec les symboles du § 4.2.3 ci-dessus :

$$(ii) \text{ Taux de remplissage moyen sur l'ensemble du parcours} = \text{Trm} * (1 - \text{Tdv})$$

De la sorte, en regroupant les équations (i) et (ii) ci-dessus, nous obtenons :

$$\text{Kg équ. C par tonne.km} = \text{Ev} \div (\text{CU} * \text{Trm} * (1 - \text{Tdv}))$$

Nous aboutissons alors à :

$$E_t = [E_v \div (1 - T_{dv})] \div (C_U * T_{rm})$$

$$E_t = [E_v \div (1 - T_{dv})] \div T_m$$

où E_t représente les émissions à la tonne.km, qui peuvent donc s'exprimer en fonction des émissions par véhicule.km, du taux de parcours à vide, et de la charge moyenne transportée sur la partie en charge.

Toute l'approche ci-dessus nécessite, pour être implémentée, de connaître les taux de remplissage moyens des camions utilisés. Soit l'entreprise dispose de cette information, soit elle utilisera par défaut les taux moyens nationaux indiqués plus haut (§ 4.2.3.2).

Dans ce dernier cas, les facteurs d'émission par tonnes.km sont les suivants (NB : ces facteurs d'émissions sont calculés de manière dynamique par le tableur et ne figurent nulle par en dur ; ils s'ajustent automatiquement si les taux de distance à vide ou les taux de remplissage changent) :

Classe de PTAC	kg équ. C par tonne.km, fabrication	kg équ. C par tonne.km, production carburant	kg équ. C par tonne.km, combustion	kg équ. C par tonne.km, total
< 1,5 t essence	0,095	0,098	0,579	0,771
< 1,5 t diesel	0,071	0,057	0,544	0,673
1,5 à 2,5 t essence	0,066	0,063	0,374	0,503
1,5 à 2,5 t diesel	0,050	0,038	0,363	0,451
2,51 à 3,5 t essence	0,045	0,065	0,384	0,493
2,51 à 3,5 t diesel	0,036	0,029	0,272	0,337
3,5 t	0,032	0,028	0,268	0,328
3,51 à 5 t	0,021	0,025	0,236	0,282
5 à 6 t	0,021	0,016	0,155	0,192
6,1 à 10,9 t	0,012	0,013	0,119	0,143
11 à 19 t	0,006	0,006	0,062	0,074
19,1 à 21 t	0,005	0,006	0,059	0,071
plus de 21 t	0,004	0,006	0,054	0,063
tracteurs routiers	0,003	0,003	0,024	0,029

Tableau 35 : Facteurs d'émission moyens nationaux du transport de marchandise selon la classe de PTAC

Dès lors que les émissions « véhicule plein » et « véhicule vide » et les caractéristiques par défaut des trajets insulaires ont été définies, aucun paramètre supplémentaire n'est à ajuster pour que le tableur du Bilan Carbone puisse calculer les émissions par tonne-km pour les DOM et la Nouvelle-Calédonie.

4.2.5 Incertitudes des méthodes exposées au 4.2.3 et 4.2.4

Un certain nombre de moyennes nationales sont pris en compte pour établir les résultats :

- consommations et émissions par type de véhicule,
- répartition du parc ou des tonnes.km par type de véhicule,
- etc.

Il importe également de se rappeler que :

- certains chiffres nationaux (pour les utilitaires légers) ne distinguent pas compte propre et compte d'autrui, or le transport pour compte propre est en moyenne moins performant.
- hormis le lot complet, il n'est pas possible de savoir exactement à chaque envoi de quoi est composé le chargement du véhicule, qui transporte également des marchandises d'autres clients, et donc la densité et le % de la charge utile exploitée est difficile à définir.
- les données que l'entité doit fournir sont plus facilement accessibles pour les flux aval (expéditions de marchandises), ou plus généralement lorsqu'elle est le donneur d'ordre, mais souvent moins accessibles lorsqu'elle n'est pas donneur d'ordre (transport assuré par le fournisseur par exemple).

En raison de tous ces facteurs, l'imprécision liée à l'emploi de ces formules a été estimée à 20%.

4.2.6 Calculs exacts des distances routières

Pour connaître avec le plus de précision possible les tonnes.km expédiées ou les véhicules.km effectués, il est utile de connaître le plus précisément possible les distances routières parcourues entre un point origine et un point destination. Différents sites internet proposent un calcul exact de ces distances entre une commune d'origine et de destination, n'importe où en Europe dont notamment les sites www.infotrafic.com, www.mappy.fr et www.viamichelin.fr.

4.2.7 Tonnes.km par habitant et par région

Pour la version « territoire » du Bilan Carbone, il existe des statistiques qui faciliteront grandement la mise en œuvre : les tonnes.km expédiées ou reçues par habitant, selon la région.

4.2.7.1 Tonnes.km expédiées par habitant et par région

Les statistiques du Ministère de l'Équipement (Source : MTETM/SESP, enquête TRM 2004) fournissent des millions de tonnes.km chargées et déchargées par région et par classe de PTAC (pour les PTAC à partir de 5 tonnes, les utilitaires légers ne sont pas concernés par cette enquête, mais sont à l'origine de tonnages marginaux dans l'ensemble).

A partir de ces données, il suffit de diviser par la population de la région pour aboutir aux valeurs suivantes (les données sont séparées dans deux tableaux pour de simples raisons de place) :

t.km expédiées par hab.an	Alsace	Aquitaine	Auvergne	Basse-Normandie	Bourgogne	Bretagne	Centre	Champagne-Ardenne	Corse	Franche-Comté	Haute-Normandie	Ile-de-France
de 5 t à 6 t	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
de 6,1 t à 10,9 t	12	21	35	14	17	16	10	13	7	18	11	16
de 11 t à 19 t	330	360	291	251	375	289	355	264	75	291	325	172
de 19,1 t à 21 t	0	11	62	11	32	21	4	17	0	9	10	4
21,1 à 32,6 t	200	161	242	164	161	255	201	209	199	203	119	61
tracteur routier	3 450	3 255	2 302	2 847	3 227	3 347	3 202	4 301	499	2 760	4 630	1 231

t.km expédiées par hab.an	Languedoc-Roussillon	Limousin	Lorraine	Midi-Pyrénées	Nord-Pas-de-Calais	Pays de la Loire	Picardie	Poitou-Charentes	Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Rhône-Alpes	Moyenne nationale
De 5 t à 6 t	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
De 6,1 t à 10,9 t	23	43	25	16	8	19	19	29	9	22	17
De 11 t à 19 t	193	324	289	285	228	324	255	454	243	308	272
De 19,1 t à 21 t	7	13	5	30	2	17	9	29	14	17	13
21,1 à 32,6 t	118	205	181	187	137	274	186	225	94	193	158
tracteur routier	2 400	2 355	3 289	2 223	2 968	3 549	3 643	3 857	2 219	2 808	2 711

Tableau 36 : t.km expédiées par la route par habitant et par an selon la région

4.2.7.2 Tonnes.km réceptionnées par habitant et par région

Les mêmes statistiques du Ministère de l'Équipement, avec la même division par la population de la région, permettent d'aboutir aux valeurs suivantes (les données sont séparées dans deux tableaux pour de simples raisons de place) :

t.km reçues par hab.an	Alsace	Aquitaine	Auvergne	Basse-Normandie	Bourgogne	Bretagne	Centre	Champagne-Ardenne	Corse	Franche-Comté	Haute-Normandie	Ile-de-France
De 5 t à 6 t	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
de 6,1 t à 10,9 t	17	15	40	9	22	14	8	14	7	18	12	16
de 11 t à 19 t	343	388	305	269	370	305	317	253	85	302	306	181
de 19,1 t à 21 t	2	16	39	8	32	24	7	6	0	9	9	7
21,1 à 32,6 t	195	184	247	162	169	237	206	194	202	233	150	70
tracteur routier	3 048	3 247	2 490	2 917	3 425	3 568	3 202	3 875	395	2 822	3 811	1 421

t.km reçues par hab.an	Languedoc-Roussillon	Limousin	Lorraine	Midi-Pyrénées	Nord-Pas-de-Calais	Pays de la Loire	Picardie	Poitou-Charentes	Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Rhône-Alpes	total
de 5 t à 6 t	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
de 6,1 t à 10,9 t	23	45	21	21	9	24	19	22	9	18	17
de 11 t à 19 t	255	318	271	314	184	354	262	326	248	296	272
de 19,1 t à 21 t	7	12	3	24	5	22	3	25	12	18	13
21,1 à 32,6 t	125	178	149	184	135	286	139	242	96	176	158
tracteur routier	2 066	3 093	2 989	2 461	5 751	3 553	3 274	3 428	2 269	2 747	2 711

Tableau 37 : t.km réceptionnées par la route par habitant et par an selon la région

4.3 TRANSPORT AERIEN

Tout comme le transport routier, le transport aérien contribue aux émissions de gaz à effet de serre. Il le fait à travers la consommation de carburant⁴⁵, et plus marginalement à travers la construction des avions, des infrastructures, etc. Nous proposons ci-dessous des facteurs d'émission discriminés par type de trajet, et par classe pour les transports de personnes, qui ne prennent cependant en

⁴⁵ Les émissions des avions décollant d'un aéroport français, prises sur l'intégralité des trajets effectués, représentaient en 2001 50% des émissions des voitures particulières des Français.

compte que la consommation de carburant (mais ni la construction, ni la maintenance, ni les infrastructures au sol, etc).

4.3.1 Emissions par passager.km (avions de ligne)

Les données utilisées ont été prises sur le site Internet d'Airbus et de Boeing en octobre 2002 (voir Annexe 3 :). Les calculs ci-dessous ne concernent pas les petits avions de transport de passagers, évoqués plus loin.

4.3.1.1 Principe général

Le principe général pour le calcul du facteur d'émission est simple : nous allons calculer les émissions dues à la consommation de carburant pour le plus long vol accessible à l'appareil, grâce aux caractéristiques constructeur (qui comprennent la capacité d'emport de carburant, et ce carburant sera consommé en totalité pour le rayon d'action maximal), puis diviser par le nombre d'occupants et la distance parcourue pour avoir des émissions par passager.km.

Le tableau ci-dessous donne pour un certain nombre d'avions commerciaux en service :

- les rayons d'action maximaux avec seulement des passagers,
- le nombre de sièges par classe en configuration standard.



Avion	Carburant max. (litres)	Rayon d'action max ⁴⁶ (km)	Sièges 2nde	Sièges Affaire	Sièges 1ère	Total sièges	Equivalent 2nde ⁴⁷
A300	62 000	7 408	240	26		266	298
A310	75 470	9 630	212	28		240	247
A318	23 860	5 278	99	8		107	117
A319	29 660	6 852	116	8		124	134
A320	29 660	5 649	138	12		150	164
A321	29 660	5 371	169	16		185	199
A330-200 (2 classes)	139 090	12 316	263	30		293	333
A330-200 (3 classes)	139 090	12 316	205	36	12	253	331
A330-300 (2 classes)	97 530	10 371	305	30		335	375
A330-300 (3 classes)	97 530	10 371	241	42	12	295	381
A340-200 (2 classes)	155 040		270	30		300	340
A340-200 (3 classes)	155 040	14 816	213	36	12	261	339
A340-300 (2 classes)	141 500	13 520	305	30		335	375
A340-300 (3 classes)	141 500	13 520	241	42	12	295	381
A340-500 (2 classes)	214 810	13 520	329	30		359	399
A340-500 (3 classes)	214 810	13 520	259	42	12	313	399
A340-600 (2 classes)	194 880	13 890	383	36		419	467
A340-600 (3 classes)	194 880	13 890	314	54	12	380	482
A380	310 000	14 816	439	96	20	555	733
747-400	216 840	13 446				416	416
B777 1 seule classe	171 160	11 019	550			550	550

Tableau 38 : Caractéristiques techniques des principaux avions

Cependant, en exploitation commerciale, un avion est rarement complètement plein. Or la consommation de l'avion n'est que marginalement dépendante du nombre de passagers qu'il emporte, ce qui signifie que les émissions par passager.km vont être directement fonction du plan

⁴⁶ Il s'agit du rayon d'action maximal avec la capacité d'emport maximale de passagers, sans fret.

⁴⁷ Il s'agit du total de sièges uniquement seconde que l'appareil pourrait emporter, le nombre réel étant inférieur du fait que les classes « affaire » et « première » occupent plus d'espace au sol par siège.

de cabine (qui prévoir plus ou moins de sièges de chaque classe, donc de sièges au total) et du taux de remplissage.

Nous prendrons comme hypothèses pour le calcul à suivre que :

- le taux moyen de remplissage d'un avion est de 75%, homogène par classe,
- à un siège de seconde nous attribuons comme émission spécifique l'émission de l'ensemble de l'avion divisée par le nombre de sièges "uniquement seconde" qu'il peut contenir,
- à un siège "Affaires", nous attribuons un supplément par rapport à la seconde de 88% à 133% selon les avions (résulte d'un comptage des sièges par classe sur les plans disponibles sur les sites Internet, voir Annexe 3 :),
- à un siège "Première" nous attribuons un supplément de 250% par rapport à la seconde (même méthode).

4.3.1.2 Emissions de CO₂

Pour un avion donné, nous allons calculer les émissions de CO₂ pour un passager de seconde en appliquant la formule :

$$\text{Emissions par passager en seconde} = \text{quantité totale de carburant} * \text{facteur d'émission du kérosène} \div (\text{nombre total de sièges "équivalent seconde"} * \text{distance totale parcourue} * \text{taux de remplissage moyen}) .$$

Pour les passagers "Affaires" et "Première" nous appliquons au résultat pour le siège de seconde les coefficients précisés ci-dessus. Ce calcul fournit les émissions de CO₂ suivantes par passager.km, pour la combustion seule :

	Avion	Autonomie avec tous sièges occupés (km)	G équ. C par pass.km en 2nde	Géqu. C par pass.km en Affaires	G équ. C par pass.km en Première	Moyenne par siège	
Court courriers	A300	7 408	26	57	-	29	
	A310	9 630	29	36	-	30	
	A318	5 278	35	79	-	38	
	A319	6 852	29	66	-	32	
	A320	5 649	29	63	-	32	
	A321	5 371	25	47	-	27	
Long courriers	A330-200	12 316	31	72	108	41	
	A330-300	10 371	22	52	78	29	
	A340-200	14 816	28	65	98	36	
	A340-300	13 520	25	58	87	32	
	A340-500	13 520	36	84	127	46	
	A340-600	13 890	26	62	92	34	
	A380	14 816	26	61	91	34	
	747-400	13 446	Disposition des sièges par classe non disponible				35
	B777 ⁴⁸	11 019	26	-	-	26	

Tableau 39 : Emissions de CO₂ (combustion seule) en geqC/passager.km en avion de ligne

A partir de ce tableau nous constatons que la dispersion autour de la valeur moyenne est de 15% à 25% pour les court et long courrier, respectivement. Si nous prenons les deux avions les plus couramment employés en long courrier (B 747 et A 340-600), on remarque que les deux valeurs sont très proches, de l'ordre de 34 g équ. C par passager.km toutes classes confondues.

⁴⁸ Une seule classe.

Notons également que la différence en fonction de la classe est très significative dans tous les cas de figure.

Pour les courts courriers, il importe de se rappeler que :

- les avions sont en règle générale utilisés sur une fraction seulement du rayon d'action maximal (un Paris-Nice par exemple), or cela induit des dépenses en carburant plus importantes par passager.km, car le décollage et l'atterrissage sont proportionnellement plus gourmands en carburant,
- un avion emporte généralement un peu de fret dès lors qu'il ne dessert pas une ville qui se situe à la limite de son rayon d'action maximal avec juste des passagers,
- dans ce calcul nous ne tenons pas compte des émissions liées à la construction des avions, à l'activité aéroportuaire, à l'entretien, etc., ce qui autoriserait probablement à majorer les résultats de quelques grammes équivalent carbone par passager.km, notamment pour les court-courriers qui sont proportionnellement plus consommateurs de services aéroportuaires par km parcouru.

Nous avons ensuite calculé (ci-dessous) la moyenne, par catégorie de vol (court et long courrier) et par classe, des valeurs calculées ci-dessus.

Grammes équivalent carbone par passager.km	Seconde	Affaires	Première	Moyenne toutes classes
combustion, tous trajets et tous avions confondus	28	62	97	33
combustion, court courrier seul	32	64		34
combustion, long courrier seul	28	65	97	35
Ecart max à moyenne, court courrier	16%	34%		16%
Ecart max à moyenne, long courrier	25%	25%	25%	29%
amont, tous trajets confondus	2,6	5,6	8,9	3,0
amont, court courrier seul	2,9	5,8	0,0	3,1
amont, long courrier seul	2,5	5,9	8,9	3,2

Tableau 40 : Moyenne des émissions de CO₂ (combustion seule) en g_{eq}C/passager.km en avion de ligne

Ce sont ces moyennes qui vont nous servir de valeurs de référence. Ainsi, les émissions de CO₂ par passager.km en court courrier seront de 32 grammes équivalent carbone pour la combustion, et de 2,9 grammes équivalent carbone pour la production du carburant (« amont »). La moyenne toutes classes (colonne de droite) va servir à alimenter une nouvelle catégorie, dénommée « classe inconnue », et qui contiendra les valeurs à utiliser quand la classe du vol n'est pas connue.

Avec ce qui précède, la marge d'erreur est estimée à 20%. Elle est probablement maximale sur des destinations "intermédiaires" (vols de 1.500 à 3.000 km). La seule manière de la réduire encore serait de disposer d'une déclaration du transporteur qui sait, lui, combien de carburant a été consommé et quelle distance a été parcourue pour chaque vol pris individuellement.

4.3.1.3 Emissions hors CO₂

Du au fait qu'ils volent à la limite de la troposphère, les avions ne vont pas seulement contribuer au forçage radiatif (lui-même à l'origine du changement climatique futur) à travers leurs émissions de CO₂. La combustion à haute altitude va perturber les cycles d'autres gaz à effet de serre : vapeur

d'eau⁴⁹, eau condensée sous diverses formes, NO_x et méthane qui, ensemble, produisent de l'ozone, etc. (cf. graphique ci-dessous, tiré d'un document du GIEC⁵⁰).

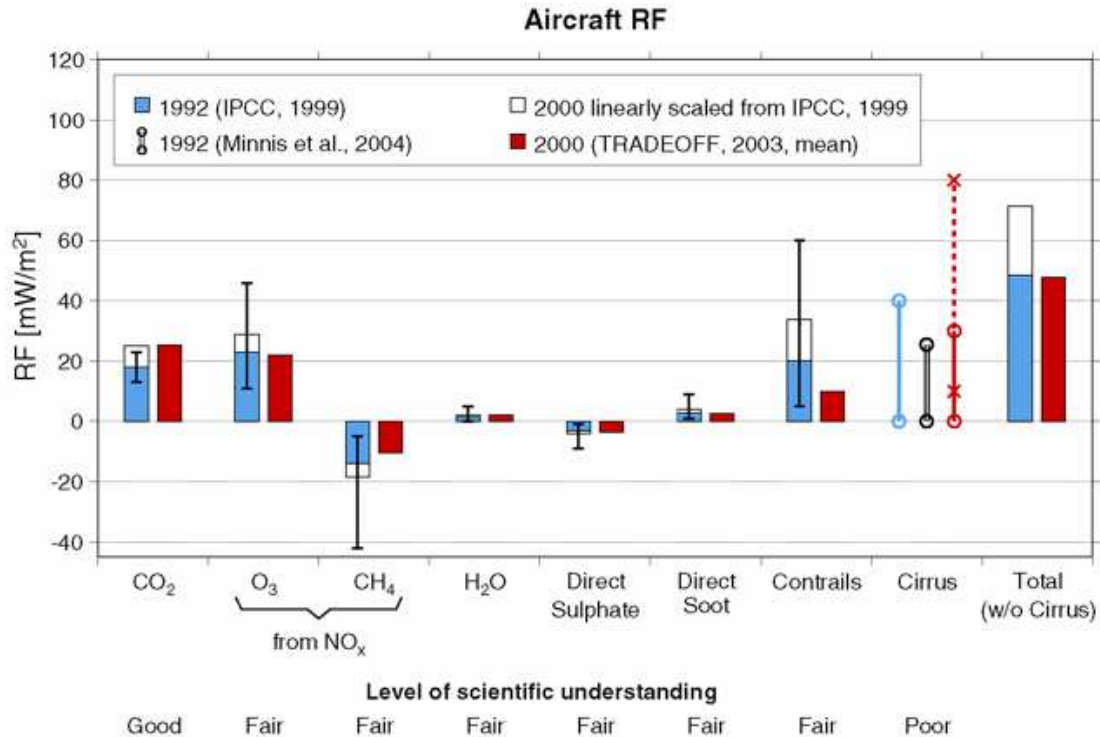


Figure 4 : Compilation des publications effectuées sur le forçage radiatif du aux avions, en milliwatts par m². Source Sausen et al. (2005).

La dernière ligne du graphique ci-dessus précise le degré de compréhension des processus physiques et chimiques en cause (ce qui influe directement sur l'amplitude de la marge d'erreur, représentée par le segment qui se superpose à la barre de l'histogramme).

Il est facile de voir que les gaz "mineurs" et la vapeur d'eau émis par les avions conduisent à un forçage radiatif total de l'ordre de 0,04 W/m², alors que le seul CO₂ d'origine aérienne ne produit que 0,02 W/m², c'est-à-dire 2 fois moins. Il serait donc tentant de dire que, dès lors que nous comptabilisons 1 gramme équivalent carbone pour le CO₂ émis directement par l'avion (pour la partie combustion donc, les émissions de production n'étant pas concernées puisqu'elles n'ont pas lieu dans la haute atmosphère) il faut en comptabiliser 2 pour ce qui n'est pas du CO₂. Mais ce raisonnement serait inexact. En effet, le forçage radiatif se base sur les concentrations supplémentaires, non les émissions, alors que l'équivalent carbone mesure ces dernières, c'est-à-dire le potentiel pour des perturbations futures, et non le constat des perturbations passées (ce pour quoi il y a le forçage radiatif).

En fait, il y a plusieurs facteurs multiplicatifs possibles pour passer du CO₂ aux émissions totales, selon pourquoi on compte :

⁴⁹ Qui est partiellement émise dans la stratosphère dans le cas d'un avion, ce qui n'est pas le cas de la vapeur d'eau résultant de l'emploi de combustibles fossiles près du sol

⁵⁰ GIEC / 1999 / L'aviation et l'atmosphère planétaire, résumé à l'intention des décideurs

- si le bon critère est la poids du « hors CO₂ » dans le réchauffement déjà constaté (pour la partie imputable aux avions) alors le bon multiplicateur est de 2 (ce qui revient à dire que le « hors CO₂ » possède un équivalent carbone identique au CO₂),
- si le bon critère est le forçage radiatif cumulé sur 100 ans des émissions actuelles (c'est-à-dire le PRG à 100 ans), le bon multiplicateur est de 1 virgule quelque chose,
- si le bon critère est une température maximale à ne pas dépasser à 10 ou 20 ans, le bon multiplicateur est de... 8 !⁵¹

A titre conservatoire, et faute de mieux, nous proposons donc de mettre ce facteur multiplicateur à 2. Dit autrement, pour un kg équivalent carbone du au CO₂ de la combustion, nous rajouterons un kg équivalent carbone pour tenir compte du reste. Ce reste est désigné sous le terme « hors Kyoto ».

La totalité des facteurs d'émission pour le transport de passagers est alors résumée dans le tableau ci-dessous.

	kg équ. C par passager.km			
	amont	combustion	hors Kyoto	total
Court courrier en 2nde	0,003	0,032	0,032	0,066
Court courrier en Affaires	0,006	0,064	0,064	0,134
Court courrier classe inconnue	0,003	0,034	0,034	0,072
Long courrier en 2nde	0,003	0,028	0,028	0,058
Long courrier en Affaires	0,006	0,065	0,065	0,136
Long courrier en Première	0,009	0,097	0,097	0,204
Long courrier classe inconnue	0,003	0,035	0,035	0,073

Tableau 41 : Facteurs d'émission par passager.km en avion de ligne

4.3.2 Consommations par tonne.km pour les marchandises (jets de ligne)

Pour le fret, la méthode employée sera la même que pour les passagers. Nous allons calculer, pour les versions 100% fret des jets de ligne pour lesquels nous avons les données constructeur (carburant consommé, rayon d'action et charge emportée), la consommation de carburant par tonne.km pour les performances maximales, puis le facteur d'émission correspondant à la seule consommation de carburant.

Ces valeurs serviront ensuite à déterminer une moyenne par catégorie, sachant que, dans le cas présent, il y aura 3 catégories de fret aérien (et non 2 comme pour les passagers) :

- fret court courrier pour les rayons d'action jusqu'à 5000 km (et effectuant en pratique des distances commerciales plus proches de 1000 à 2000 km),
- fret moyen courrier pour les rayons d'action jusqu'à 7000 km (et effectuant en pratique des distances commerciales plus proches de 3000 à 5000 km),
- fret long courrier au-delà.

Enfin un dernier paramètre intervient dans le calcul : le taux de remplissage moyen. En fait, à la différence des passagers dont le plus ou moins grand nombre n'influe que peu sur la consommation d'un avion (ce qui signifie qu'un faible taux de remplissage augmente à due concurrence la consommation par passager), le % de remplissage d'un avion cargo influe plus significativement sur

⁵¹ Olivier Boucher, présentation à Eurocontrol, janvier 2009

sa consommation (or si un avion rempli à moitié ne consomme que la moitié de ce qu'il consomme plein, cela ne change pas les émissions par tonne.km et il n'y a donc pas lieu d'appliquer une correction pour tenir compte du taux de remplissage).

Il n'empêche que ce raisonnement a une limite : si un avion-cargo transporte du fret très peu dense (fleurs, objets divers avec des emballages volumineux et très légers, objets complexes occupant beaucoup d'espace, etc) ou est mal rempli, le facteur d'émission par tonne.km augmentera fortement.

Faute de disposer d'informations précises permettant de moduler le facteur d'émission en fonction de la cargaison transportée, nous appliquerons forfaitairement l'équivalent d'un taux de remplissage de 75%.

Le tableau ci-dessous donne alors les émissions qui découlent de la seule combustion du carburant dans l'avion.

Catégorie	Avion	Carburant max (litres)	Fret (tonnes)	Autonomie (pour la charge emportée) en km	Kg équ. C par tonne.km combustion seule
Court-courrier	A318	23 860	16	2 778	0,488
	A318	23 860	10	5 186	0,418
	A319	29 660	18,5	4 593	0,318
	A319	29 660	11	6 852	0,358
	A320	29 660	20	2 675	0,437
Moyen-courrier	A320	29 660	15	4 116	0,504
	A300F	68 150	52	5 062	0,235
	A300F	68 150	43	6 297	0,229
Long-courrier	A310	75 470	32,9	6 482	0,322
	A330-200	139 090	104	8 149	0,149
	A330-200	139 090	68	11 112	0,167
	A340-600	194 880	147,4	10 371	0,159
	A340-600	194 880	80	13 890	0,116
	A380	310 000	150	10 408	0,180
	747-400	216 840	113	13 446	0,130

Tableau 42 : kg équivalent carbone par tonne.km pour le fret aérien, combustion seule

Nous allons alors calculer pour chaque catégorie la valeur moyenne, ce qui permet de constater que l'écart entre la moyenne et la valeur pour n'importe quel avion n'excède pas 30%.

Pour le court-courrier, définis comme les vols commerciaux inférieurs à 1500 km, cette valeur est de 0,462 kg équivalent carbone par tonne.km (combustion seule).

Valeur moyenne retenue pour les court-courriers :		0,462 Kg eqC/t.km
Avion	Kg équ. C par tonne.km, combustion seule	Ecart à la moyenne
A318 - remplissage 1	0,488	5%
A318 - remplissage 2	0,418	-10%
A320 - remplissage 1	0,437	-6%
A320 - remplissage 2	0,504	8%

Tableau 43 : Facteur d'émission pour le fret aérien court-courrier, combustion seule

Pour les moyen-courriers, définis comme les vols commerciaux compris entre 1500 et 4000 km, cette valeur est de 0,292 kg équivalent carbone par tonne.km, et c'est là que la dispersion est la plus forte.

Valeur moyenne retenue pour les moyens-courriers :		0,292 Kg eqC/t.km
Avion	Kg équ. C par tonne.km, combustion seule	Ecart à la moyenne
A300F - remplissage 1	0,235	-24%
A300F - remplissage 2	0,229	-28%
A319 - remplissage 1	0,318	8%
A319 - remplissage 2	0,358	18%
A310	0,322	9%

Tableau 44 : Facteur d'émission pour le fret aérien moyen-courrier, combustion seule

Enfin pour les long-courriers, définis comme les vols commerciaux supérieurs à 4000 km, cette valeur est de 0,15 kg équivalent carbone par tonne.km.

Valeur moyenne retenue pour les long-courriers :		0,150 Kg eqC/t.km
Avion	Kg équ. C par tonne.km, combustion seule	Ecart à la moyenne
A330-200 - remplissage 1	0,149	-1%
A330-200 - remplissage 2	0,167	10%
A340-600 - remplissage 1	0,159	6%
A340-600 - remplissage 2	0,116	-30%
A380	0,180	17%
747-400	0,130	-16%

Tableau 45 : Facteur d'émission pour le fret aérien long-courrier, combustion seule

Une fois ces moyennes établies, il reste à tenir compte des émissions de production du carburant et, comme pour les passagers, et avec le même raisonnement, des émissions « hors Kyoto » liées au fait que les jets de ligne évoluent à la limite de la troposphère.

Le tableau ci-dessous récapitule les données finales.

	Kg equ C par tonne.km			
	amont	combustion	hors kyoto	total
Court courrier	0,042	0,462	0,462	0,965
Moyen courrier	0,027	0,292	0,292	0,611
Long courrier	0,014	0,150	0,150	0,314

Tableau 46 : Facteur d'émission pour le transport de marchandises en avion

La marge d'erreur sur tous ces coefficients sera prise égale à 20%. Notons que le côté conventionnel de la multiplication par 2 pour passer du CO₂ seul à tous les gaz à effet de serre rend légitime le fait de retenir aussi des coefficients conventionnels ici.

Ces facteurs d'émission sont bien sûr utilisables pour du fret prenant place dans un avion qui transporte aussi des passagers. En pareil cas, utiliser directement les facteurs calculés ci-dessus pour les passagers et pour le fret revient à allouer la consommation de carburant aux passagers et au fret, au prorata de la fraction de l'avion qui est dévolue à chaque usage.

4.3.3 Reconstitution de distances parcourues en avion

4.3.3.1 *Lieu de départ et d'arrivée connus*

Il arrive qu'il faille calculer les émissions pour un vol avec pour seules informations le lieu de départ et d'arrivée. En pareil cas, il est possible de reconstituer les distances parcourues grâce à l'un des sites Internet indiqués ci-dessous, ou à des sites similaires. Ces sites calculent le plus court chemin séparant deux points du globe (le plus court chemin suit un arc de grand cercle, encore appelé orthodromie), ce qui est à peu de choses près la route généralement suivie par les avions, qui n'ont pas d'obstacles à contourner (les interdictions de survol sont en nombre restreint) :

- www.amadeus.net donne les aéroports correspondants à une ville donnée,
- www.chemical-ecology.net/java/lat-long.htm donne les distances entre deux villes,
- www.landings.com/_landings/pages/search/rel-calc.html donne les distances entre deux aéroports (lesquels peuvent être trouvés grâce à Amadeus pour connaître les aéroports d'origine et de destination).

4.3.3.2 *Détermination d'une moyenne pour l'ensemble des Français*

Lors de la mise en œuvre d'un Bilan Carbone territoire, il sera rarement possible d'aller interroger chaque habitant pour savoir quelle distance il a parcouru en avion l'année précédente. Même si cela ne fournit qu'une approximation grossière, il sera alors possible d'appliquer à chaque habitant du territoire la distance moyenne parcourue par Français et par an en avion, qui peut être déduite des mêmes informations que celles exposées au § 4.1.2.4, et que nous reproduisons ci-dessous pour la part aérienne :

Mode	Millions de voyageurs*km par semaine pour la longue distance	Km par personne et par an
avion	1472	1 352

Tableau 47 : km par personne et par en effectués en avion en 1993

Nous allons recouper cette information avec un calcul simple. 80 millions de passagers ont emprunté un aéroport français en 2005, soit, en première approximation, 40 millions dans chaque sens, avec :

- 50 millions de passagers pour des vols européens
- 10 millions de passagers pour l'Amérique
- 13 millions de passagers pour l'Afrique, essentiellement du Nord,
- 7 millions pour l'Asie (y compris Moyen Orient)

Sur la base de distances moyennes approximatives, il est alors possible d'en tirer le tableau ci-dessous.

Lieu origine ou destination	millions de passagers	distance moyenne	distance totale million de km
Asie	7	5 000	35 000
Europe hors France	50	500	25 000
Afrique	13	3 000	39 000
Amérique	10	6 500	65 000
Total ou moyenne	80	2 050	164 000

Tableau 48 : Données caractéristiques des vols partant d'un aéroport français ou y arrivant

La distance moyenne par passager apparaît donc aux alentours de 2000 km. Par ailleurs, si nous supposons que 50% de ces passagers - soit 40 millions - sont français, alors il en ressort une distance moyenne par Français, pour les vols longue distance, de $2000 \text{ (km par vol)} * 40 \text{ (millions de passagers Français)} / 60 \text{ (millions de Français)} = 1360 \text{ km par Français et par an}$.

Au vu de la bonne cohérence des deux approches, nous conserverons les 1.352 km de l'enquête transports comme une bonne valeur par défaut, tout en conservant à l'esprit que cette moyenne n'est probablement pas représentative de manière homogène partout en France, étant insuffisante pour les grandes villes (qui concentrent des CSP+ des gens mobiles car sans enfants, ayant des activités internationales, et enfin relativement libres de leurs dates de vacances) et excessive pour les territoires ruraux (qui présentent plutôt les caractéristiques inverses).

4.3.4 Gain ultérieur en précision

Les données constructeur figurant ci-dessus montrent qu'il y a une dispersion significative autour des consommations moyennes selon les avions et distances parcourues, et que cette dispersion est plus importante que pour les tracteurs routiers.

Les raisons en sont structurelles : la gamme d'avions est bien plus diversifiée que la gamme de camions ; l'influence de la distance est très forte sur la moyenne, parce que décollage et atterrissage consomment une quantité significative de carburant, indépendante de la distance parcourue ; etc.

La seule manière de parvenir à une estimation plus fine des émissions par vol est de disposer des informations du transporteur. Attention, toutefois, au point suivant quand on travaille avec les données du transporteur : le plus souvent ce dernier ne fournira que les émissions de combustion, mais ni les émissions amont, ni le « hors Kyoto », ni les émissions liées à l'infrastructure au sol, ni les émissions de construction et de maintenance des avions, même si ces deux derniers postes sont vraisemblablement très marginaux devant la consommation de carburant.

4.4 TRANSPORT FERROVIAIRE

4.4.1 Généralités

Comme les autres modes de transport, le transport ferroviaire sera source de gaz à effet de serre, provenant de :

- la fabrication des infrastructures (terrassment, production du béton y compris celui des ouvrages d'art, production des rails, etc),
- la fabrication du matériel roulant,
- l'énergie de traction des trains, qui peut être soit du diesel (dont la combustion engendre des émissions directes), soit de l'électricité, dont la production a engendré des émissions plus ou moins importantes de gaz à effet de serre selon l'énergie primaire⁵² utilisée (voir § 2.4).

Les facteurs d'émission exposés ci-dessous ne tiennent pas compte, sauf mention contraire, des émissions liées à la construction du matériel roulant et à celle des infrastructures.

Ce choix n'est pas trop contestable en ce qui concerne les infrastructures anciennes, mais conduit à fortement minorer les facteurs d'émissions pour les infrastructures non amorties (LGV récentes, tramway, métro récent, etc).

4.4.2 Transports de personnes

4.4.2.1 *Train de voyageurs en France*

La SNCF met à disposition sur son site Internet un éco-comparateur transport permettant de calculer l'empreinte carbone des trajets effectués en train, pour la partie « énergie de traction ». Cet outil, dont les règles méthodologiques ont été validées par l'Ademe, repose sur des données commerciales non diffusables (quantité d'électricité achetée, fournisseur et contenu carbone de l'électricité).

Cette approche reste partielle, dans la mesure où elle ne prend pas en compte :

- la fabrication des voies de chemin de fer, des gares, et du matériel roulant,
- les éventuelles fuites de fluide réfrigérant (tous les trains sont climatisés),
- la maintenance et l'entretien du matériel et du réseau,
- l'énergie hors traction (chauffage et éclairage des gares, ateliers et bureaux, ventilation des parties enterrées, groupes électrogènes éventuels, etc)

Malgré ces limites, nous proposons, en attendant mieux, d'utiliser les facteurs d'émissions calculés par la SNCF, qui sont présentés ci-dessous :

Type de train	Facteur d'émission moyen (geqC/voy.km)
TGV	6,1
TRN	9,0
TER	16,3
Moyenne	6.9

Tableau 49 : Facteur d'émissions par type de train (source : SNCF/2009)

La valeur moyenne est calculée sur la base de statistiques provenant du site voyages-sncf.com, à savoir 85% TGV (Train à Grande Vitesse), 10% TRN (Train Rapide National) et 5% TER (Train Express Regional).

⁵² L'énergie primaire est celle qui est utilisée dans la centrale

Pour la Corse, où la seule ligne de train (qui va de Bastia à Ajaccio, avec une ligne secondaire vers Calvi) n'est utilisée qu'avec des motrices diesel livrées entre 1975 et 1997, avec une consommation de référence de 1,20 litre de gazole par kilomètre parcouru⁵³. Compte tenu du relief, on peut majorer de 20% cette consommation de référence, pour arriver à 1,44 litres de gasoil par train.km. Le trafic 2005 s'élevait à 812.000 train.km⁵⁴ et 18,4 millions de passagers.km.

Type de train	Trafic passagers (milliards de p.km) ⁵⁵	Consommation électrique (GWh)	Consommation de gazole (milliers de litres)
Train en corse	0,0184	0	1 169

Tableau 50 : Données du trafic ferroviaire voyageurs en Corse.

Ainsi, en suivant la démarche présentée ci-dessous, le facteur d'émission du transport ferroviaire de voyageurs en Corse est estimé à 0,051 kg équivalent carbone par passager-km. L'incertitude est portée à 20%.

Cas du transport ferré en Ile de France

Une étude Ademe-Ratp menée dans le cadre du Predit⁵⁶ en 2007, propose des valeurs de facteurs d'émissions pour le métro, le RER et le Tramway. Le périmètre pris en compte inclut :

- L'énergie de traction
- L'amortissement du matériel roulant

Les autres contributeurs aux émissions ne sont pas inclus, c'est-à-dire :

- la fabrication des voies et des arrêts ou gares (poste très significatif pour le tramway),
- les éventuelles fuites de fluide réfrigérant (tous les trains sont climatisés),
- la maintenance et l'entretien du matériel et du réseau,
- l'énergie hors traction (chauffage, ventilation et éclairage des gares, ateliers et bureaux, éclairage des parties enterrées, groupes électrogènes éventuels, etc)

Là aussi, faute de mieux nous prendrons ces valeurs qui sont rassemblées dans le tableau ci-dessous.

Mode de transport	g eqC/(Voy.km)
Métro	1,6
RER	1,6
Tram	1,6

Tableau 51 : Facteurs d'émission RATP (Données de l'année 2005).

L'incertitude est estimée à 20%.

⁵³ Source : SNCF.

⁵⁴ Source : Collectivité Territoriale de Corse

⁵⁵ Source : INSEE, *Tableaux Economiques de la Corse*, 2005.

⁵⁶ Projet PREDIT ADEME / RATP calcul de facteurs d'émission des modes de transports en commun urbains

Pour l'approche territoire du Bilan Carbone, il sera souhaitable d'obtenir une valeur par défaut pour le nombre de km effectués par personne et par an en modes ferrés (RER, tram, TER) pour la mobilité quotidienne.

Cette distance parcourue par personne et par an en transports collectifs ferrés sera déduite des informations exposées au § 4.1.2.4 : dès lors que nous avons la distance totale parcourue par personne et par an en transports en commun et la part modale du bus, le solde est dévolu aux modes ferrés.

Si une Enquête Ménages Déplacements a été réalisé sur le territoire de la collectivité concernée, les données provenant de ces travaux seront utilisées. Elles reflèteront plus les spécificités du territoire que les données de référence fournies (à partir de travaux nationaux).

4.4.2.2 Train de voyageurs en Europe

L'étude de l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC) sur les effets externes, communément appelée "étude INFRAS-IWW", a fait l'objet d'une actualisation en octobre 2004⁵⁷ avec pour année de référence 2000. Cette étude permet d'établir des facteurs d'émission pour le transport ferroviaire de voyageurs de différents pays européens, pour la seule énergie de traction.

Pays	Grammes équivalent carbone par voyageur.km
Allemagne	18,2
Autriche	6,4
Belgique	13,2
Danemark	31,1
Espagne	14,0
Finlande	12,3
Grèce	18,1
Irlande	10,6
Italie	8,7
Luxembourg	10,8
Norvège	10,9
Pays bas	20,8
Portugal	16,8
Royaume Uni	20,4
Suède	3,5
Suisse	1,0
Moyenne Europe (EU-17)	12,0

Tableau 52 : Facteurs d'émission par voyageur.km pour les déplacements en train à l'étranger (UIC – INFRAS - IWW, 2004)

L'incertitude sur ces valeurs a été fixée à 20%.

⁵⁷ UIC, INFRAS-IWW / Octobre 2004 / External costs of transport.

4.4.2.3 Kilométrages annuels moyens effectués au titre de la mobilité longue distance

Dans le cadre de la mise en oeuvre d'un Bilan Carbone territoire, il sera utile de disposer d'une information sur le kilométrage moyen parcouru par résident et par an au titre de sa mobilité longue distance (donc hors déplacements courts).

Cette distance parcourue par personne et par an en train sera déduite des mêmes informations que celles exposées au § 4.1.2.4, et que nous reproduisons ci-dessous pour la part ferroviaire:

déplacements en millions de voyageurs*km par semaine selon le mode principal	longue distance 1993
trains (y compris ter)	366
tgv	281
total	647

Tableau 53 : Millions de voyageurs*km par semaine de déplacement longue distance en mode ferré

A partir de ce tableau il est possible de faire le calcul des distances moyennes calculées par personne, qui sont les suivantes :

Km par personne et par an, moyenne	Longue distance
trains (y compris ter)	336
tgv	258
total	594

Tableau 54 : Distance moyenne par personne et par an en longue distance en mode ferré

L'information ci-dessus datant de 1993, il sera souhaitable de tenir compte de l'évolution intervenue entre-temps. En pratique, le nombre total de voyageurs.km a augmenté de 25% entre 1994 et 2004⁵⁸, alors que dans le même temps la population française augmentait de 5%. Or, une partie de ces km sont le fait de visiteurs étrangers (qui ne contribuent pas à la distance moyenne par résident français), cela amène à retenir, en première approximation, une hausse de 15% des kilométrages parcourus, soit 683 km par personne et par an en moyenne.

4.4.3 Fret ferroviaire

4.4.3.1 Fret ferroviaire en France

L'année la plus récente pour laquelle nous disposons de données détaillées publiées est 2005, au sein d'une étude réalisée pour l'Ademe sur l'efficacité énergétique du transport ferroviaire de marchandises, sur base de données SNCF⁵⁹. Les valeurs caractéristiques du fret ferroviaire en France cette année là sont exposées dans les deux tableaux qui suivent.

⁵⁸ Commission des Comptes des transports de la Nation (à partir de DAEI/SESp – UTP – RATP – SNCF – DAC)

⁵⁹ Etude de l'efficacité énergétique et des émissions de CO₂ du transport ferroviaire de marchandises, T&L et associés pour l'Ademe, 2008

Traction électrique	Milliards de t.km	Tonnes équivalent pétrole d'électricité (1 tep = 11 627 kWh)
Train entier	17,2	136 404
Transport combiné	8,7	71 581
Wagon isolé	10,8	172 291
Moyenne	36,7	380 276

Tableau 55 : Fret ferroviaire en 2005 en France, traction électrique

Traction thermique	Milliards de t.km	Tonnes équivalent pétrole de gazole (1 tep = 11 627 kWh)
Train entier	2,81	40 641
Transport combiné	0,06	883
Wagon isolé	1,16	33 810
Moyenne	4,03	75 334

Tableau 56 : Fret ferroviaire en 2005 en France, traction thermique

Il suffit ensuite d'appliquer à ces chiffres les facteurs d'émissions respectifs de l'électricité et du gazole pour obtenir les émissions à la tonne.km de chaque mode de traction ainsi que de la moyenne par mode, en se limitant à l'énergie de traction.

Pour le gazole, nous utiliserons les facteurs d'émission définis au Chapitre 2, et pour l'électricité nous appliquerons le même facteur d'émission (avec 6,17% de l'électricité achetée à la SNET) qu'au § 4.4.2.1.

L'application de ces facteurs donne les résultats suivants pour la traction électrique

Traction électrique	Milliards de t.km	tep d'électricité	kg CO2	g CO2/t.km	geC par t.km
Train entier	17,2	136 404	161 322 711	9,38	2,6
Transport combiné	8,7	71 581	84 657 642	9,73	2,7
Wagon isolé	10,8	172 291	203 765 661	18,87	5,1
Moyenne	36,7	380 276	449 746 014	12,25	3,3

Tableau 57 : Facteurs d'émission du fret ferroviaire pour la traction électrique

Pour la traction thermique, les résultats sont les suivants

Traction thermique	Milliards de t.km	tep thermique	kg CO2	g CO2/t.km	geC par t.km
Train entier	2,81	40 641	141 052 436	50,1	13,7
Transport combiné	0,06	883	3 064 622	52,2	14,2
Wagon isolé	1,16	33 810	117 344 132	100,9	27,5
Moyenne	4,03	75 334	261 461 189	64,8	17,7

Tableau 58 : Facteurs d'émission du fret ferroviaire pour la traction thermique

Enfin quand le mode de traction est inconnu nous proposons d'appliquer une moyenne pondérée, au prorata des t.km effectuées par chaque mode, qui est exposée dans le tableau suivant.

Moyenne pondérée	Milliards de tonnes.km	g CO2/t.km	geC par t.km
Train entier	20,0	15,1	4,1
Transport combiné	8,8	10,0	2,7
Wagon isolé	12,0	26,8	7,3
Moyenne	40,7	17,5	4,8

Tableau 59 : Facteurs d'émission moyens pour le fret ferroviaire en France

Nb : pour les pays étrangers pour lesquels le facteur d'émission n'est pas disponible ou trop ancien, on pourra répartir des consommations énergétiques à la tonne.km par mode, qui ne varient probablement pas de plus de quelques dizaines de % d'un pays à l'autre, et appliquer les facteurs d'émission du gazole (celui du Chapitre 2) et de l'électricité du pays concerné (disponible au Chapitre 2) pour reconstituer un facteur d'émission approximatif. Cette approche grossière requiert uniquement de disposer de la part respective de la traction thermique et de la traction électrique dans le pays concerné.

Ici aussi, ce facteur d'émission varie fortement en fonction du facteur d'émission de l'électricité. Une électricité 100% au charbon (230 g eq C par kWh) amènerait ce facteur moyen à 30 grammes équivalent carbone par t.km, soit... exactement la même chose que le transport par route (en tracteur routier).

En Corse, le fret ferroviaire a concerné 643 tonnes de marchandises en 2004⁶⁰. En supposant (hypothèse à forte incertitude) qu'un trajet fait 100 km en moyenne, que l'efficacité énergétique de traction est de 45,4 tonnes-km par kilo équivalent pétrole (hypothèse Explicit), et en appliquant le facteur d'émission du gazole calculé au Chapitre 2, soit 947 kg eq carbone par tep, nous obtenons 0,021 kg eqC/t.km. L'incertitude est portée à 40%.

4.4.3.2 Fret ferroviaire en Europe

La même source qu'au § 4.4.2.2. (étude INFRAS-IWW) a été utilisée. A priori les facteurs d'émission ne prennent en compte que l'énergie de traction et les chiffres sont les suivants :

	kg eq C / tonnes.km
Allemagne	0,0087
Autriche	0,0034
Belgique	0,0051
Danemark	0,0103
Espagne	0,0094
Finlande	0,0055
Grèce	0,0121
Irlande	0,0159
Italie	0,0079
Luxembourg	0,0069
Norvège	0,0022
Pays-Bas	0,0083
Portugal	0,0121
Royaume-Uni	0,0112
Suède	0,0012
Suisse	0,0010
Moyenne Europe (EU-17)	0,0062

Tableau 60 : Facteurs d'émission par tonne.km pour le fret en train à l'étranger (UIC – INFRAS - IWW, 2004)

⁶⁰ Source : INSEE, Tableaux Economiques de la Corse, 2005.

L'incertitude est portée à 50% pour ces valeurs. La même réserve que ci-dessus s'applique : ce facteurs ne prennent probablement en compte que l'énergie de traction, et pour la partie thermique ils ne prennent probablement pas en compte les émissions de production du carburant, ce qui minore significativement les émissions globales.

4.4.4 Calculs exacts des distances ferroviaires

Faute d'une obligation déclarative de la SNCF (qui les connaît), les distances exactes parcourues entre une gare d'origine et une gare de destination ne sont généralement pas communiquées au client, ou tout du moins pas de manière systématique. Si nécessaire, elles peuvent être reconstituées avec le site servant au calcul des distances routières (voir § 4.2.6), dans la mesure où les voies de chemin de fer sont très souvent assez peu distantes des voies routières, toutes deux étant généralement construites en fond de vallée.

Ce site permet aussi d'éclater un parcours international (pour le fret par exemple, ou tout simplement pour un voyage en TGV Paris-Bruxelles) en distances par pays (on calcule les distances du point de départ au lieu de passage de la frontière, puis de chaque passage de frontière au suivant ou au lieu de destination). Un tel éclatement est nécessaire dans la mesure où les émissions par unité de distance sont fortement variables d'un pays à l'autre.

4.5 TRANSPORT MARITIME

Comme tous les autres modes, le transport maritime engendre des émissions de gaz à effet serre à cause :

- de la fabrication des bateaux, et leur entretien,
- de l'énergie utilisée pour la propulsion, qui est toujours un combustible fossile (en général du fioul lourd).

4.5.1 Emissions liées à la fabrication des bateaux

Nous disposons de poids à vide de certains bateaux.

Type de bateau	Poids à vide (tonnes)
Petit roulier	1.268
Gros roulier	4.478
Petit tanker	844
Gros tanker	18.371
Petit vraquier	1.720
Gros vraquier	14.201

Tableau 61 : Poids à vide des principaux bateaux

Un gros vraquier, par exemple, pèse environ 14.000 tonnes à vide. Dans la mesure où il s'agit pour l'essentiel d'acier (800 kg équ. C/tonne sans prendre en compte un éventuel recyclage), les émissions de fabrication peuvent *grosso modo* être estimées au même poids en équivalent carbone.

Si ce bateau fonctionne 300 jours par an, pendant 30 ans, les émissions liées à la fabrication, ramenées à la journée, sont de l'ordre de 1,5 tonnes équivalent carbone, à comparer à plus de 50 tonnes équivalent carbone (par jour) liées à l'emploi du carburant (voir ci-dessous).

Les émissions de fabrication sont donc "dans l'épaisseur du trait" comparées aux émissions d'utilisation, et sont en tout état de cause inférieures à la marge d'erreur liée au taux de remplissage et surtout à la vitesse du bateau, qui est prépondérante dans la consommation globale sur le trajet.

Nous négligerons donc les émissions de fabrication pour l'établissement des facteurs d'émission ci-dessous.

4.5.2 Fret maritime, émissions liées au carburant consommé

Le syndicat professionnel "Armateurs de France" nous a fourni une décomposition des navires de la marine marchande par grandes catégories de bateaux. 5 types sont prépondérants dans l'ensemble :

- les pétroliers et assimilés (chimiquiers, gaziers), qui représentent presque la moitié de la flotte mondiale des gros bateaux en tonnage (en fait les pétroliers et gaziers sont très fortement dominants dans cette catégorie). Il y a deux raisons pour lesquelles nous n'avons pas cherché à calculer de facteurs d'émission pour ces bateaux : la première - et la principale - est que l'emploi de ces navires est déjà pris en compte dans le facteur d'émission amont des produits pétroliers et gaziers ; la seconde est que leur usage ne concerne qu'une catégorie d'acteurs bien spécifiques (les compagnies pétrolières), qui ont les moyens d'accéder aux données de consommation des navires si elles le souhaitent. Cette catégorie de navires n'est donc pas répertoriée dans le tableur Bilan Carbone.
- les porte-conteneurs,
- les cargos classiques,
- les navires rouliers, c'est-à-dire des bateaux sur lesquels les marchandises sont "sur roues" : on y embarque directement des remorques de camions, des voitures, des engins militaires...
- les ferries, purement passagers ou mixtes (rouliers).

4.5.2.1 Porte-conteneurs

Les porte-conteneurs sont des bateaux qui chargent des marchandises déjà regroupées dans des conteneurs, c'est-à-dire des grosses caisses métalliques parallélépipédiques (dont le poids unitaire est de l'ordre de 4 tonnes), de telle sorte que les manipulations de chargement et déchargement sont extrêmement simples. Ces bateaux servent, pour l'essentiel, à transporter des produits manufacturés de petite ou moyenne taille (électronique grand public, électroménager, produits alimentaires transformés, etc.). Seuls les gros objets (voitures par exemple) ne sont pas transportés par ce type de bateau.

Les capacités de transport des porte-conteneurs se mesurent en "équivalent vingt pieds" ou evp. En effet, leur capacité d'emport, en nombre de conteneurs, est fonction du volume unitaire de ceux-ci, et le conteneur de référence fait 20 pieds de long, soit 6 mètres, avec une section de 2,44 par 2,50 mètres. Un evp est donc une unité de volume, valant $6 \text{ m} \times 2,44 \text{ m} \times 2,50 \text{ m} = 36,6 \text{ m}^3$.

Par ailleurs, les consommations des bateaux de la marine marchande ne sont généralement pas données en référence à la distance totale parcourue, mais en référence au nombre de jours passés en mer, ce nombre pouvant du reste varier, pour une même route, selon les conditions météo rencontrées.

Chaque bateau possède ainsi deux consommations d'énergie journalières :

- celle pour la force motrice, utilisée uniquement pendant les jours de mer,
- celle pour les besoins énergétiques autres que la traction (électricité, chauffage de l'équipage, etc.), qui entraînent des consommations aussi bien en mer qu'au port (certains bateaux modernes commencent à être équipés de prises de quai pour se relier au réseau continental, mais ce n'est pas encore un usage très répandu).

Pour les porte-conteneurs, Armateurs de France fournit les données rassemblées dans le tableau qui suit :

Capacité en "équivalent vingt pied"	Capacité en m ³	Vitesse commerciale (nœuds)	Consommation en mer en tonnes de fioul lourd par jour	Consommation tertiaire en tonnes de gasoil par jour	Emissions par jour de mer en tonnes équivalent carbone
500	18 300	16	20	1,5	21,5
1 000	36 600	17,5	30	1,5	31,5
1 500	54 900	20	50	2	52
2 500	91 500	20,5	70	2	72
3 500	128 100	22,5	110	2	112
5 000	183 000	22,5	150	3	153

Tableau 62 : Facteurs d'émission des porte-conteneurs

Notons que les émissions quotidiennes d'un porte-conteneurs en mer sont bien corrélées à sa capacité d'emport, ainsi que la régression linéaire ci-contre, effectuée avec les données qui nous ont été communiquées, le montre.

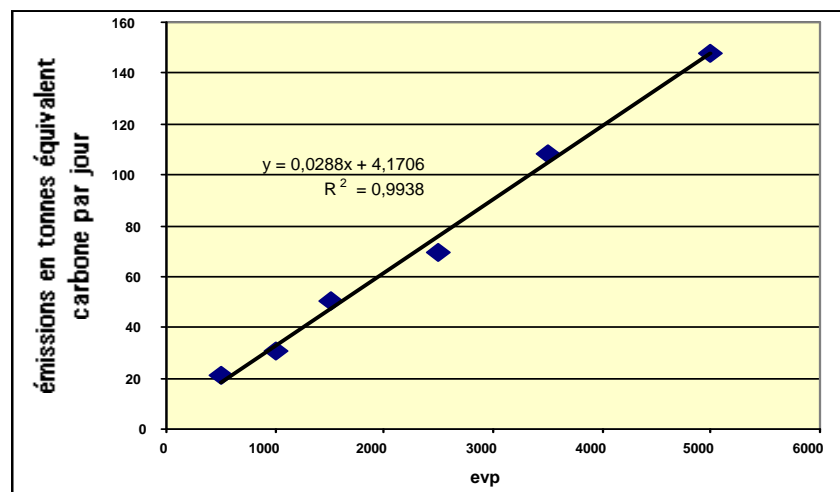


Figure 5 : Corrélation entre les émissions quotidiennes d'un porte conteneurs en mer et sa capacité d'emport.

En cas d'usage d'un porte-conteneurs d'une capacité intermédiaire ou supérieure (on commence à voir apparaître des bateaux qui chargent 10.000 conteneurs), nous proposerons donc de déterminer les émissions journalières en mer par la formule suivante :

$$\text{Emissions journalières (en tonnes équivalent carbone)} = 0,0288 * \text{evp} + 4,1706$$

Un point important est que ces émissions journalières sont relativement indépendantes du poids du fret transporté. En effet, si le bateau est vide ou faiblement chargé, il va remplir ses ballasts d'eau de mer pour augmenter sa stabilité et limiter sa prise au vent latéral, avec pour résultat que la traînée (c'est-à-dire le frottement de l'eau de mer sur la coque), qui est croissante avec la surface immergée, sera à peu près identique quel que soit le poids de fret transporté. Or c'est cette traînée qui gouverne, au premier ordre, la consommation du bateau.

En outre, selon Armateurs de France, la proportion de navires qui voyagent soit à vide, soit peu remplis, est très faible (cette affirmation sera transitoirement un peu moins vraie après la récession de 2008-2009, mais cette dernière a en fait plus pour effet de retirer des bateaux du commerce mondial que de faire circuler des bateaux à moitié remplis).

De la sorte, la consommation par jour - indépendante du poids de fret en première approximation - peut se convertir en consommation par km en connaissant la vitesse commerciale du bateau (qui est relativement standard), puis en consommation - donc en émissions - par m³.km, puisque le volume de conteneurs emportés est toujours, en première approximation, le volume maximal.

Pour obtenir des émissions par tonne.km à partir des émissions par m³.km, il reste à convertir les tonnages transportés en volumes, ce qui nécessitera de connaître la masse par unité de volume des marchandises expédiées. Cela se ramène à connaître le poids de marchandise qui peut rentrer dans un conteneur, ce qui est normalement possible avec les données disponibles au sein de l'entreprise expéditrice.

Si les marchandises, par exemple, partent sous forme de palettes dont les dimensions et le poids sont connus, il suffira d'un simple calcul pour connaître cette la quantité de marchandises - et donc le poids - qui peut rentrer dans un conteneur.

Les émissions unitaires seront alors obtenues par la formule :

$$\text{Emissions par tonne.km} = \frac{\text{Emissions journalières}}{((\text{vitesse du bateau en km/h} * 24) * \text{volume} * \text{masse volumique})}$$

De ce fait, le tableur du Bilan Carbone fera un calcul dynamique du facteur d'émission en fonction des caractéristiques de consommation et de vitesse précisées ci-dessus et des données renseignées par l'utilisateur, qui sont :

- la contenance du bateau utilisé (en evp),
- la masse volumique du fret expédié, rapportée au remplissage d'un conteneur (cette masse volumique peut être inférieure à celle d'une palette, si les dimensions respectives du conteneur et des palettes ne permettent pas un remplissage du conteneur "à ras bord").

L'imprécision liée à ces émissions par tonne.km est estimée aux alentours de 20%.

4.5.2.2 Vraquiers

Les vraquiers servent au transport des marchandises "en vrac", telles que minerais (on parle alors de minéraliers), céréales, ou des matières premières diverses qui peuvent être transportées à même un fonds de cale.

Comme pour les porte-conteneurs, les données aisément accessibles sont la consommation journalière, la vitesse commerciale du bateau et sa capacité d'emport de fret. Ces diverses données, obtenues auprès du syndicat Armateurs de France, permettent de dresser le tableau suivant :

Modèle de navire	Années de mise en service	Port en lourd (tonnes)	vitesse (nœuds)	Tonnes de fioul brûlées par jour	Tonnes de gasoil brûlées par jour	parcours quotidien (km)	consommation par tonne.km (grammes)	émissions par tonne.km (kg. équ. C)
handysize	1970	20 000	13	30	1,5	578	2,7	0,00264
	1980	20 000	13	29	1,5	578	2,6	0,00255
	1990	20 000	13	21	1,5	578	1,9	0,00188
handymax	1980	40 000	15	30	1,5	667	1,2	0,00114
	1990	40 000	15	22,5	1,5	667	0,9	0,00087
panamax	1970	70 000	15	50	2	667	1,1	0,00108
	1980	70 000	15	36	2	667	0,8	0,00079
	1990	70 000	15	32	2	667	0,7	0,00070
capesize	1970	150 000	15	65	2	667	0,7	0,00065
	1980	150 000	15	50	2	667	0,5	0,00050
	1990	150 000	15	47,5	2	667	0,5	0,00048

Tableau 63 : Facteurs d'émission des vraquiers

Plus généralement, les émissions par tonne.km pour un vraquier en charge peuvent s'obtenir à partir de la vitesse, du poids de fret, et de la consommation journalière, selon la formule :

$$\text{Emissions par tonne.km} = \frac{(\text{Tonnes de fioul par jour} \times \text{émissions par tonne de fioul})}{(\text{Vitesse en nœuds} \times 1,852 \times 24 \times \text{tonnes emportées})}$$

L'imprécision liée à ces émissions par tonne.km est estimée aux alentours de 20% (en fait elle sera inférieure si les paramètres ci-dessus sont bien renseignés).

4.5.2.3 Cargos

Les cargos servent au transport des marchandises volumineuses (voitures, machines de grande taille, etc.). Il n'existe pas de données standard, et il faut donc passer par l'armateur pour connaître les consommations journalières et tonnes de port en lourd des bateaux utilisés.

4.5.2.4 Tonnage moyen importé par la mer par Français (métropole)

Pour la version « territoire » du Bilan Carbone, il sera utile de disposer d'un nombre moyen de tonnes.km importées par voie maritime par Français et par an pour tenir compte du fret sur les produits consommés. Ce calcul exclura les produits pétroliers (dont le fret est déjà inclus dans le facteur d'émission des carburants).

Le calcul simple que nous proposons pour parvenir à un ordre de grandeur est le suivant :

- en 2005, la France métropolitaine a échangé 282 millions de tonnes de marchandises avec le reste du monde, pour 1 314 737 727 000 tonnes.km, soit une distance moyenne parcourue de 4 659 km par tonne échangée
- au sein de cet ensemble, 75 millions de tonnes concernent les exportations, et 133 millions de tonnes du vrac liquide importé (donc essentiellement des produits pétroliers et gaziers), l'ensemble étant à retirer de l'assiette,
- cela laisse donc 348 millions de tonnes.km pour l'importation des produits manufacturés.
- si la distance de parcours moyenne est de 4 659 km comme pour les échanges en totalité, alors, répartis entre 59,2 millions de métropolitains, cela fait 5 870 t.km d'importations par voie maritime par Français et par an.
- si nous considérons que la distance pour les importations est supérieure à la moyenne des échanges (par exemple pour tenir compte de l'Extrême-Orient, qui fournit une part significative de nos importations et absorbent une part moindre des exportations), en la portant à 6000 km, alors nous obtenons 7560 tonnes.km par Français et par an au titre de ces importations.

A titre conservatoire, nous proposons de garder cette dernière valeur par défaut pour l'approche territoire.

4.5.3 Navires à passagers, émissions liées au carburant consommé

Les deux paragraphes ci-dessous proposent des facteurs d'émission pour des navires à passagers (en fait mixtes puisqu'ils transportent aussi du fret) qui servent pour des liaisons entre le continent et des îles françaises (Corse et Iles du Finistère).

4.5.3.1 Corse-Continent

La Corse est desservie à la fois par des ferries et par des navires rapides. Nous donnons ci-dessous les caractéristiques techniques de trois navires utilisés sur la liaison Corse-continent. Le Daniele Casanova est un ferry classique et les deux autres navires des navires à grande vitesse.

Nom du navire	Passagers max	Fret max (tonnes)	Puissance utile (CV)	Puissance utile (MW)	Vitesse (nœuds)	Vitesse (km/h)	Consommation spécifique (grammes de fioul par cheval et par heure)	Consommation de fioul horaire (kg)
Daniele Casanova	2 200	1 050	46 259	34	23	43	149	6 901
Asco	530	222	29 388	21,6	35,5	66	155	4 546
Liamone	1 100	375	72 789	53,5	41	76	164	11 904

**Tableau 64 : Caractéristiques techniques de 3 navires pour les liaisons Corse-continent.
Source : Paul Lucas, architecte naval**

Comme ces navires sont mixtes, nous allons faire les hypothèses (attachée de fortes incertitudes) suivantes pour parvenir à un ordre de grandeur :

- sur tous les bateaux, 50% de la consommation est dévolue aux passagers et 50% au fret (en fait la bonne allocation devrait probablement se faire au prorata des recettes, mais ces dernières sont inconnues),

- les taux de remplissage moyens, tant pour les passagers que pour le fret, sont supposés être de 70% pour les NGV, mais de 50% seulement pour le ferry, qui assure - au titre de la continuité territoriale - des rotations avec un faible taux de remplissage pendant les mois d'hiver
- les facteurs d'émission amont et combustion sont ceux du fioul lourd (voir Chapitre 2).

Avec ces hypothèses, nous parvenons aux résultats suivants

Nom du navire	Passagers max	% de remplissage	Fret max (tonnes)	Taux de remplissage	km/h max	Kg de fioul par heure	% pour fret	G de fioul par passager.km	g equ C par passager.km, amont	g equ C par passager.km, combustion	G de fioul par tonne.km	g equ C par tonne.km, amont	g equ C par tonne.km, combustion
D Casanova	2 200	50%	1 050	50%	43	6 901	50%	73,6	6,7	63,3	154	14,0	133
Asco	530	70%	222	70%	66	4 546	50%	93,2	8,4	80,1	222	20,2	191
Liamone	1 100	70%	375	70%	76	11 904	50%	101,8	9,2	87,5	299	27,1	257

Tableau 65 : Facteurs d'émission par bateau pour les liaisons Corse-continent

Nous allons effectuer une moyenne pour les 2 NGV et individualiser les résultats pour le ferry, ce qui donne le tableau suivant.

	kg equ C par pers.km	
	amont	combustion
Liaison Corse continent - NGV	0,0088	0,0838
Liaison Corse continent - ferry	0,0067	0,0633

Tableau 66 : Facteurs d'émission pour les personnes - bateaux pour la Corse

	kg equ C par tonne.km	
	amont	combustion
Liaison Corse continent - NGV	0,0236	0,2238
Liaison Corse continent - ferry	0,0140	0,1326

Tableau 67 : Facteurs d'émission pour le fret - bateaux pour la Corse

L'incertitude associée à ces résultats est forte, et donc fixée à 50% (ce qui revient à dire que la « vraie » valeur peut varier d'un facteur 3, entre la moitié de la valeur publiée et 1,5 fois cette valeur).

Notons que, avec la répartition 50/50 proposée ci-dessus entre fret et passagers, le facteur d'émission par personne.km est du même ordre de grandeur que ce que l'on obtient pour l'automobile. Une affectation massique (les personnes étant alors bien plus légères que le fret !) est nécessaire pour que le facteur d'émission par passager.km descende sous les 20 grammes équivalent carbone. Le NGV est plus émissif que l'automobile par passager.km dans tous les cas de figure.

4.5.3.2 Liaison vers les îles du Finistère

Nous allons procéder de la même manière que ci-dessus, avec l'exemple d'un bateau utilisé pour ces liaisons.

Nom du navire	Passagers max	Fret max (tonnes)	Puissance (CV)	Puissance (MW)	Vitesse (nœuds)	Vitesse (km/h)	Consommation spécifique (grammes de fioul par cheval et par heure)	Consommation de fioul horaire (kg)
André Colin	200	20	4 000	2,94	21	39	170	680

Tableau 68 : Caractéristiques techniques d'un bateau caractéristique utilisé dans le Finistère. Source : Paul Lucas, architecte naval

Avec les mêmes hypothèses que ci-dessus quant aux taux de remplissage et répartition passagers/fret, nous aboutissons aux données suivantes.


Nom du navire	Pass. max	% de remplissage	Fret max (tonnes)	Taux de remplissage	km/h max	Kg de fioul par heure	% pour fret	G de fioul par passager. km	g equ C par passager. km, amont	g equ C par passager.km, combustion	G de fioul par tonne.km	g equ C par tonne.km, amont	g equ C par tonne.km, combustion
André Colin	200	70%	20	70%	39	687	50%	63,1	5,7	54,2	883	80,0	759

Tableau 69 : Caractéristiques techniques d'un bateau caractéristique utilisé dans le Finistère. Source : Paul Lucas, architecte naval

Bien évidemment, il serait possible de prendre d'autres hypothèses pour la répartition entre fret et passagers, ce qui a une influence déterminante sur les facteurs d'émission.

L'incertitude est aussi fixée à 50%.

4.5.4 Calcul des routes maritimes


Tout comme pour les distances routières ou aériennes, il existe des sites Internet permettant de connaître la longueur des routes maritimes lorsque les ports de départ et d'arrivée sont connus. 

Nous en citerons deux :

- www.netpas.net
- www.dataloy.com.

Les calculs tiennent compte, bien entendu, du contournement des continents, et de toute autre contrainte imposée au bateau.

4.6 TRANSPORT FLUVIAL DE MARCHANDISES

L'activité du transport fluvial en France est articulée autour de 5 bassins et l'utilisation de deux types d'unités motorisées. La carte ci-dessous présente les différents bassins qui caractérisent le réseau navigable en métropole. 

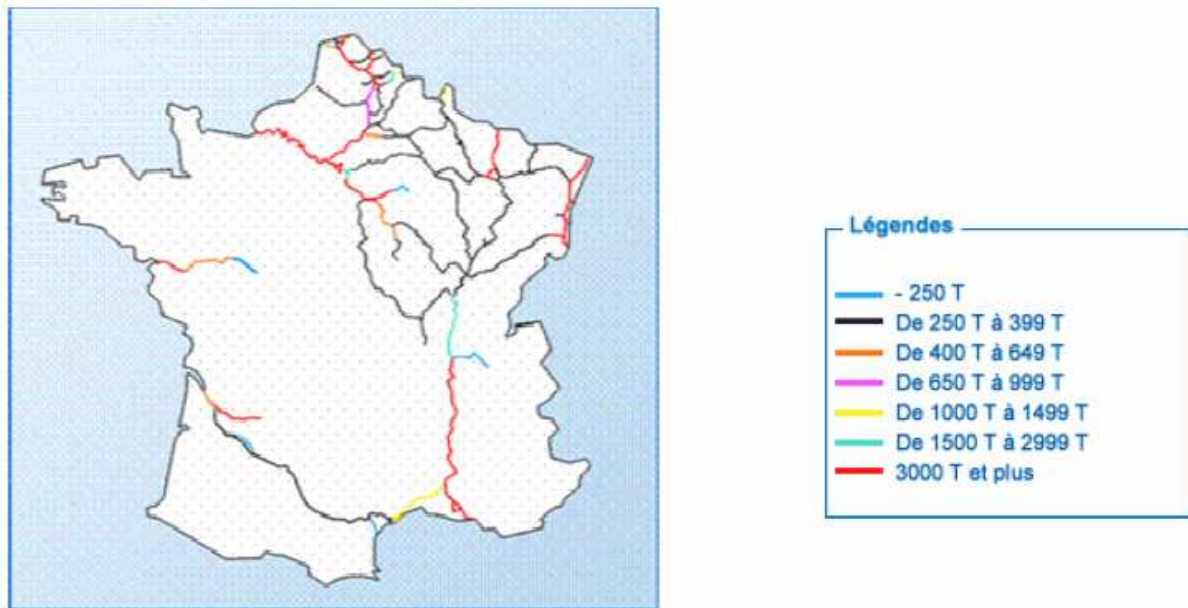


Figure 6 : Carte des gabarits des voies navigables en 2003 en France (VNF)

Ces bassins accueillent des bateaux qui dépendent du type de chargement et du gabarit des voies. Schématiquement les petits chargements sont transportés par des automoteurs, bateaux constitués d'un seul corps et qui peuvent passer partout, et les plus gros chargements sont transportés par des ensembles pousseurs + barges, qui sont au transport fluvial ce que sont les ensembles tracteurs+remorques pour le transport routier, mais qui sont limitées à des canaux d'un gabarit minimum (le gabarit se définit comme le tonnage maximal de l'unité qui peut emprunter le canal).

Différents paramètres influencent la consommation des bateaux, notamment les caractéristiques des bassins de navigation (période de crue, vent, courants, etc.) et le taux de chargement.

L'ADEME et VNF ont réalisé récemment une étude complète sur ce sujet⁶¹ pour déterminer la consommation énergétique par tonne.km, en fonction du type de bateau, ou du type de bassin (qui en pratique conditionne le genre de bateau que l'on peut utiliser ainsi que les conditions moyennes de navigation).

Ces consommations unitaires tiennent compte d'un taux de distance à vide de 31% et d'un coefficient de chargement compris entre 80% et 100%. Il suffit alors d'appliquer à ces consommations de carburant les facteurs d'émission du gazole pour obtenir les facteurs d'émission à la tonne.km, qui ne prendront cependant pas en compte la construction du navire, sa maintenance, la construction du canal si elle est récente, et enfin les infrastructures portuaires.

Le premier tableau ci-dessous donne des indicateurs agrégés, c'est-à-dire de moyennes tous bassins confondus pour les bateaux, et des moyennes tous bateaux confondus pour les bassins.

⁶¹ ADEME, VNF, T&L Associés, juillet 2005, "Etude sur le niveau de consommation de carburant des unités fluviales françaises"

		Grammes de gazole par t.km	Emissions amont - kg C par t.km	Emissions de combustion - kg C par t.km
Equipements				
Automoteurs	< 400t	14,0	0,0013	0,0120
	400 – 650 t	13,8	0,0012	0,0118
	650 – 1000 t	12,3	0,0011	0,0105
	1000 – 1500 t	11,5	0,0010	0,0098
	> 1500 t	9,5	0,0009	0,0081
Pousseurs	295 – 590 kW	8,6	0,0008	0,0074
	590 – 880 kW	7,8	0,0007	0,0067
	> 880 kW	6,8	0,0006	0,0058
Bassin				
Seine		9,5	0,0009	0,0081
Rhône		9,3	0,0008	0,0080
Nord Pas de Calais		13,6	0,0012	0,0116
Rhin		11,5	0,0010	0,0098
Moselle		12,0	0,0011	0,0103
Interbassin		12,1	0,0011	0,0104
Total		10,8	0,0010	0,0092

Tableau 70 : Indicateurs de consommation énergétique et facteurs d'émission. Données agrégées par type d'équipement et par bassin de navigation. (ADEME, VNF, T&L Associés, 2005)

L'interbassin mentionné dans le tableau ci-dessus désigne le réseau de canaux à petit gabarit qui relie entre eux les principales voies à grand gabarit (essentiellement les fleuves, voir ci-dessous). Ce réseau à petit gabarit (< 400 tonnes) est principalement situé dans le centre et le Nord-est de la France, et représente aujourd'hui plus de 60% de la longueur des voies navigables.

L'incertitude pour les facteurs ci-dessus est fixée à 10%.

Il existe également des données détaillées contenues dans le tableau ci-dessous qui tiennent compte à la fois des types de bateau et du bassin de navigation,

Bassin	Equipements		Grammes de gazole par t.km	Emissions amont - kg C par t.km	Emissions de combustion - kg C par t.km
Seine	Automoteurs	< 400t	14,9	0,0013	0,0128
		400 – 650 t	13,7	0,0012	0,0117
		650 – 1000 t	12,0	0,0011	0,0103
		1000 – 1500 t	6,6	0,0006	0,0057
		> 1500 t	5,9	0,0005	0,0051
	Pousseurs	295 – 590 kW	8,3	0,0007	0,0071
		590 – 880 kW	7,5	0,0007	0,0064
		> 880 kW	5,2	0,0005	0,0045
Rhin	Automoteur	1000 – 1500 t	13,9	0,0013	0,0119
		> 1500 t	11,9	0,0011	0,0102
	Pousseurs	> 880 kW	8,7	0,0008	0,0074
Nord Pas de Calais	Automoteurs	< 400t	15,0	0,0014	0,0128
		400 – 650 t	13,8	0,0012	0,0118
		650 – 1000 t	12,7	0,0011	0,0109
		1000 – 1500 t	11,7	0,0011	0,0100
		> 1500 t	10,8	0,0010	0,0092
	Pousseurs	295 – 590 kW	8,5	0,0008	0,0073
		590 – 880 kW	7,2	0,0007	0,0062
		> 880 kW	6,1	0,0006	0,0052
Moselle	Automoteur	1000 – 1500 t	13,4	0,0012	0,0115
		> 1500 t	11,4	0,0010	0,0098
	Pousseurs	> 880 kW	8,4	0,0008	0,0072
Rhône	Automoteurs	< 400t	16,9	0,0015	0,0145
		400 – 650 t	14,8	0,0013	0,0127
		650 – 1000 t	12,8	0,0012	0,0110
		1000 – 1500 t	7,1	0,0006	0,0061
		> 1500 t	6,7	0,0006	0,0057
	Pousseurs	295 – 590 kW	9,6	0,0009	0,0082
		590 – 880 kW	8,9	0,0008	0,0076
		> 880 kW	5,9	0,0005	0,0051

Tableau 71 : Indicateurs de consommation énergétique et facteurs d'émission. Données détaillées par bassin de navigation. (ADEME, VNF, T&L Associés, 2005)

L'étude qui nous sert de référence étant basée sur des consommations réelles, détaillées par type de bateau et bassin, l'incertitude des facteurs d'émissions ci-dessus est de 10%.

ANNEXE 1 : CONSOMMATION DES VEHICULES DE TOURISME PAR PUISSANCE ADMINISTRATIVE

Les tableaux ci-dessous donnent la consommation réelle estimée par puissance administrative (voir explications au § 4.1.1.2.3), les émissions qui en découlent, et enfin les émissions totales de gaz à effet de serre par véhicule.km en ajoutant les émissions liées à la fabrication du véhicule (rapportées au kilométrage total que ce véhicule parcourra sur sa durée de vie).

1.1. Catégorie 3 à 5 CV fiscaux, essence

Puissance administrative (CV fiscaux)	Masse à vide (kg)	Parc Total au 1er janvier 2002	Litres aux 100 calculés en situation réelle, selon type de parcours			durée de vie (km) ⁶²	Part de la fabrication, g équ. C/km	Emissions liées à la consommation (grammes équ. C/km), selon le type de parcours			Emissions globales (grammes équ. C/km), selon le type de parcours		
			Extra-urbain	Mixte	Urbain			Extra-urbain	Mixte	Urbain	Extra-urbain	Mixte	Urbain
3	720	36 672	5,0	5,8	7,1	100 000	10,9	38,9	44,7	54,9	49,8	55,6	65,8
4	881	4 563 806	5,8	6,8	8,7	120 000	11,1	44,7	52,8	67,3	55,8	63,9	78,5
5	1 011	3 342 309	6,3	7,7	10,1	140 000	10,9	48,8	59,6	78,4	59,7	70,6	89,3
Moyenne catégorie	935	7 942 787	6,0	7,2	9,3	128 324	11,0	46,4	55,6	71,9	57,5	66,7	83,0

Tableau 72 : Facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué (Métropole)

En supposant que le calcul sur les émissions de fabrication est fiable à 40% près, et que l'incertitude sur la consommation moyenne par km, par CV fiscal, et par type de parcours est de l'ordre de 5% pour les grands nombres (soit une erreur possible un peu inférieure à 0,5 litre de carburant aux 100 km sur la moyenne, ce qui est finalement beaucoup au vu des variations sur les consommations réelles données par l'Observatoire de l'Energie) l'incertitude totale sur les émissions par km parcouru ressort à 10% environ.

Il est remarquable de noter que les émissions ainsi calculées, en agrégeant fabrication du véhicule, extraction, raffinage et transport des carburants, et en redressant les consommations pour les faire "coller" au mieux aux consommations réelles (mais sans prise en compte de l'entretien), induisent une multiplication par 1,5 des émissions "constructeur", en ordre de grandeur. Le Citroën Berlingo 1.1i, par exemple (5 CV fiscaux), est donné par le

⁶² Estimation de J-M. JANCOVICI

constructeur pour 160 g de CO₂ par km en parcours mixte, tandis que la moyenne calculée pour cette catégorie, pour le même type de parcours, ressort à 250 g équ. CO₂ par km (67,8 g équ. C), soit 55% de plus.

1.2. Catégorie 6 à 10 CV fiscaux, essence

Puissance administrative (CV fiscaux)	Masse à vide (kg)	Parc Total 1er janvier 2002	Litres aux 100 calculés en situation réelle, selon type de parcours			durée de vie (km) ⁶³	Part de la fabrication, g équ. C/km	Emissions liées à la consommation (grammes équ. C/km), selon le type de parcours			Emissions globales (grammes équ. C/km), selon le type de parcours		
			Extra-urbain	Mixte	Urbain			Extra-urbain	Mixte	Urbain	Extra-urbain	Mixte	Urbain
6	1 077	2 564 652	6,4	7,9	10,5	150 000	10,9	49,2	60,7	80,8	60,1	71,6	91,7
7	1 212	4 293 265	6,7	8,4	11,4	160 000	11,5	51,4	64,7	87,9	62,9	76,2	99,4
8	1 258	455 023	7,1	9,1	12,6	180 000	10,6	55,1	70,5	97,3	65,7	81,1	107,9
9	1 379	996 779	7,6	9,7	13,3	200 000	10,4	58,6	74,7	102,7	69,1	85,2	113,1
10	1 442	416 864	8,1	10,3	14,1	200 000	10,9	62,3	79,3	109,1	73,2	90,3	120,1
Moyenne catégorie	1 205	8 726 583	6,8	8,5	11,5	164 584	11,1	52,3	65,7	89,0	63,4	76,8	100,1

Tableau 73 : Facteurs d'émission des véhicules de 6 à 10 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué (Métropole)

Les mêmes commentaires qui ci-dessus s'appliquent. Comme cette catégorie est plus large que la précédente, il est vraisemblable que la dispersion des résultats autour de la moyenne est plus importante. Nous avons retenu une erreur de 10% sur la consommation "redressée" (et laissé 40% pour la fabrication), ce qui amène à une erreur globale estimée de l'ordre de 15% sur le chiffre obtenu *in fine*.

1.3. Catégorie plus de 11 CV fiscaux, essence

Pour cette catégorie, nous avons repris les données de l'Observatoire de l'Energie et ajusté les consommations en comparant la moyenne de l'OE avec la moyenne obtenue en basant la répartition par puissance du parc (dont nous ne disposons pas) sur la répartition par puissance des ventes 2001.

⁶³ Estimation de J-M. JANCOVICI

Puissance administrative (CV fiscaux)	Masse à vide (kg)	Parc Total 1er janvier 2002	Litres aux 100 calculés en situation réelle, selon type de parcours			durée de vie (km) ⁶⁴	Part de la fabrication, g équ. C/km	Emissions liées à la consommation (grammes équ. C/km), selon le type de parcours			Emissions globales (grammes équ. C/km), selon le type de parcours		
			Extra-urbain	Mixte	Urbain			Extra-urbain	Mixte	Urbain	Extra-urbain	Mixte	Urbain
Moyenne catégorie	1 454	742 000	8,3	10,9	15,4	230 889	9,6	64,5	84,2	118,7	74,0	93,8	128,2

Tableau 74 : Facteurs d'émission des véhicules de plus de 11 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué (Métropole)

Compte tenu de l'imprécision liée à ces approximations, il ne semble pas déraisonnable d'affecter à ces chiffres une imprécision de 15 à 20%. Mais cela ne sera jamais source d'une imprécision majeure dans un Bilan Carbone dans son ensemble, car la fraction du parc d'une entreprise, ou des véhicules utilisés par les salariés pour les déplacements domicile travail, qui fera plus de 10 CV fiscaux, sera toujours assez marginale.

Ici aussi, la comparaison entre les émissions calculées et les émissions annoncées par les constructeurs présentent une différence de 40 à 50% environ, pour un parcours de type mixte.

1.4. Catégorie 3 à 5 CV fiscaux, diesel

Puissance administrative (CV fiscaux)	Masse à vide (kg)	Parc Total 1er janvier 2002	Litres aux 100 calculés en situation réelle, selon type de parcours			durée de vie (km) ⁶⁵	Part de la fabrication, g équ. C/km	Emissions liées à la consommation (grammes équ. C/km), selon le type de parcours			Emissions globales (grammes équ. C/km), selon le type de parcours		
			Extra-urbain	Mixte	Urbain			Extra-urbain	Mixte	Urbain	Extra-urbain	Mixte	Urbain
3	735	1 623	3,6	4,0	4,6	120 000	7,4	29,1	31,9	36,6	36,5	39,3	44,0
4	1 069	1 045 341	4,6	5,6	7,2	140 000	10,8	37,3	44,7	57,6	48,1	55,4	68,4
5	1 198	3 687 275	5,4	6,5	8,5	160 000	11,3	43,1	52,2	68,3	54,4	63,6	79,6
Moyenne catégorie	1 169	4 734 239	5,2	6,3	8,2	155 570	11,2	41,8	50,6	65,9	53,0	61,8	77,1

Tableau 75 : Facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué (Métropole)

⁶⁴ Estimation de J-M. JANCOVICI

⁶⁵ Estimation de J-M. JANCOVICI

1.5. Catégorie 6 à 10 CV fiscaux, diesel

Puissance administrative (CV fiscaux)	Masse à vide (kg)	Parc Total 1er janvier 2002	Litres aux 100 calculés en situation réelle, selon type de parcours			durée de vie (km) ⁶⁶	Part de la fabrication, g équ. C/km	Emissions liées à la consommation (grammes équ. C/km), selon le type de parcours			Emissions globales (grammes équ. C/km), selon le type de parcours		
			Extra-urbain	Mixte	Urbain			Extra-urbain	Mixte	Urbain	Extra-urbain	Mixte	Urbain
6	1 334	5 533 099	5,5	6,7	8,7	180 000	11,2	44,5	53,8	70,1	55,7	65,0	81,4
7	1 502	1 624 164	5,9	7,2	9,4	200 000	11,4	47,5	57,7	75,6	58,9	69,0	87,0
8	1 599	331 791	6,8	8,3	10,9	220 000	11,0	54,5	66,5	87,5	65,5	77,5	98,5
9	1 737	140 662	7,8	9,4	12,3	240 000	11,0	62,4	75,7	98,9	73,3	86,6	109,8
10	1 793	201 789	8,2	9,9	12,9	260 000	10,4	66,0	79,7	103,3	76,4	90,2	113,7
Moyenne catégorie	1 399	7 831 505	5,8	7,0	9,1	188 981	11,2	46,4	56,2	73,4	57,6	67,4	84,6

Tableau 76 : Facteurs d'émission des véhicules de 6 à 10 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué (Métropole)

1.6. Catégorie 11 CV fiscaux et plus, diesel

Comme pour les véhicules essence, nous avons directement travaillé sur les moyennes.

Puissance administrative (CV fiscaux)	Masse à vide (kg)	Parc Total 1er janvier 2002	Litres aux 100 calculés en situation réelle, selon type de parcours			durée de vie (km) ⁶⁷	Part de la fabrication, g équ. C/km	Emissions liées à la consommation (grammes équ. C/km), selon le type de parcours			Emissions globales (grammes équ. C/km), selon le type de parcours		
			Extra-urbain	Mixte	Urbain			Extra-urbain	Mixte	Urbain	Extra-urbain	Mixte	Urbain
Moyenne catégorie	1 895	211 000	9,1	11,1	14,6	313 081	9,2	72,9	89,1	117,2	82,1	98,3	126,3

Tableau 77 : Facteurs d'émission des véhicules de plus de 11 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué (Métropole)

⁶⁶ Estimation de J-M. JANCOVICI

⁶⁷ Estimation de J-M. JANCOVICI

ANNEXE 2 : REPARTITION DES VEHICULES ROUTIERS DE TRANSPORT DE MARCHANDISES PAR PTAC

La composition du parc de véhicules de transport de marchandises nous a été fournie par le Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement⁶⁸. Ce parc est en fait restreint aux véhicules de moins de 10 ans d'âge au 1^{er} janvier 2002.

A partir de ces chiffres, nous avons fait deux choses :

- d'une part nous avons calculé un PTAC moyen pour chacune des catégories de PTAC (Poids Total Autorisé en Charge, c'est à dire le poids maximal que peut peser le véhicule lorsqu'il transporte des marchandises) pour lesquelles nous avons les statistiques de consommation de carburant (voir § 4.1.1.2.1).
- d'autre part nous avons procédé à l'examen de l'écart des PTAC de la catégorie avec le PTAC moyen de la catégorie.

Cet examen a vocation à voir quel est l'écart au PTAC moyen des principaux points d'accumulation, c'est-à-dire des PTAC où nous allons trouver l'essentiel du parc de la catégorie concernée. Dire qu'il y a des points d'accumulation, cela revient à dire que nous trouverons peu de véhicules en dehors de ces points, et donc que l'écart maximal à la moyenne des PTAC concernant ces points est représentatif de la marge d'erreur que nous aurons en assimilant systématiquement un véhicule de chaque catégorie au véhicule "de référence", pesant le PTAC moyen.

Par exemple, dans la catégorie des véhicules de 2,51 à 3,5 t de PTAC (voir § 2.3 ci-dessous) 42% des véhicules ont un PTAC de 3,5 t exactement (poids qui correspond à la limite de ce qui est autorisé avec un permis B). Le PTAC moyen de cette catégorie est de 3,176 t, qui présente donc un écart de 9% avec le PTAC de 3,5 t. Cela signifie que lorsque nous prendrons, pour cette catégorie, la valeur moyenne de la consommation de carburant, qui nous est donnée par ailleurs, et sachant que cette consommation est *grosso modo* proportionnelle à la masse aux petites vitesses (qui représentent l'essentiel des parcours pour les utilitaires légers), nous ferons une erreur que nous pouvons estimer à 10% sur la consommation en carburant des utilitaires qui pèsent précisément 3,5 t en les assimilant à des véhicules "moyens" de la catégorie, qui pèsent 3,176 t.

En d'autres termes, l'examen de l'écart maximal à la moyenne des points d'accumulation pour chaque catégorie de PTAC donne une indication de l'erreur que nous ferons en assimilant consommation d'un véhicule "au hasard" de cette catégorie et le véhicule "moyen".

⁶⁸ Communication personnelle avec M. Roland Curtet en novembre 2002

2.1. Camionnettes de PTAC < à 1,5 t

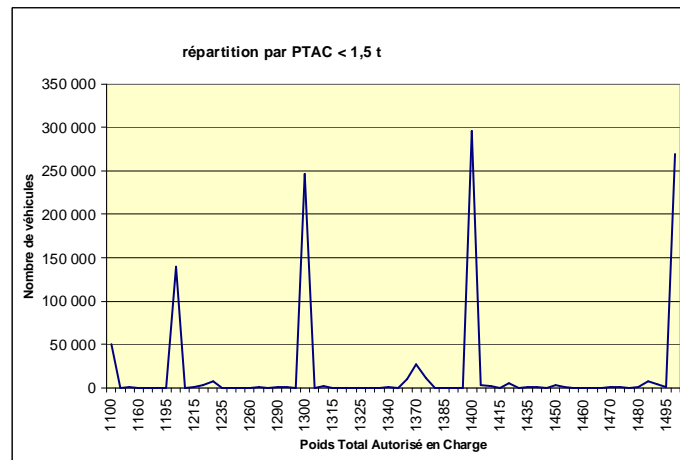


Figure 7 : Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de moins de 1.5 t de PTAC

Valeur moyenne retenue : 1360 kg. Ecart à la moyenne des principaux points d'accumulation :

- 20% pour 1100 kg,
- <10% pour les autres.

2.2. Camionnettes de PTAC compris entre 1,5 et 2,5 t

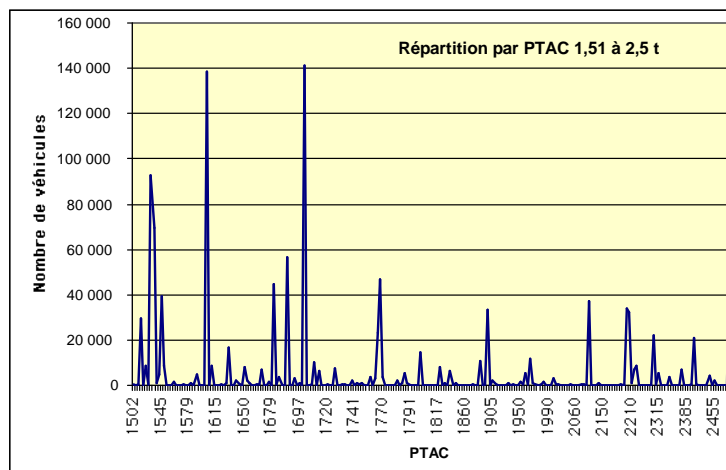


Figure 8 : Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 1.5 t à 2.5 t de PTAC

Valeur moyenne retenue : 1.796 kg. L'écart maximal à la moyenne des principaux points d'accumulation est de 15%, sauf pour le point à 2,5 t (mais qui est secondaire) : 40%.

2.3. Camionnettes de PTAC compris entre 2,51 et 3,5 t

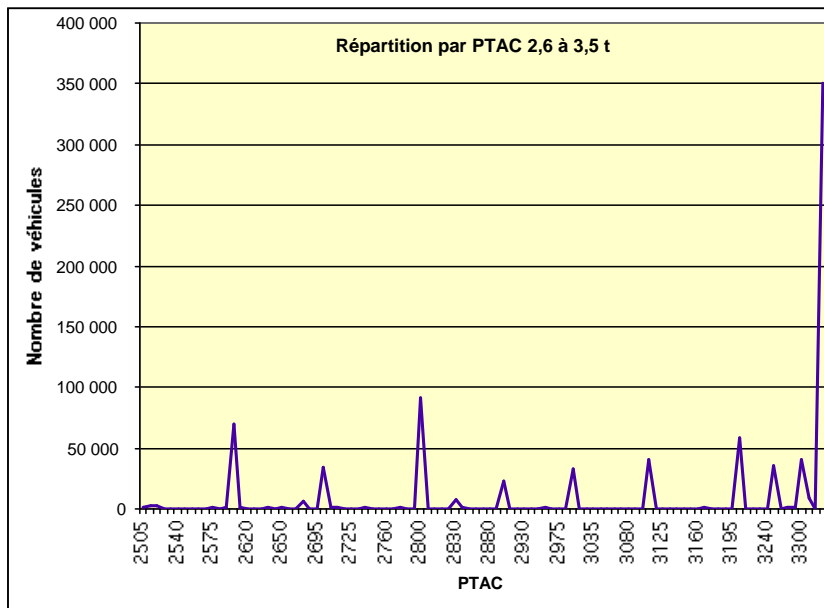


Figure 9 : Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 2.5 t à 3.5 t de PTAC

Valeur moyenne retenue : 3.176 kg. Ecart à la moyenne des point d'accumulation :

- 9% pour 3,5 t
- 18% pour 2600 kg, <15% pour les autres points.

2.4. Camionnettes de PTAC compris entre 3,51 et 5 t

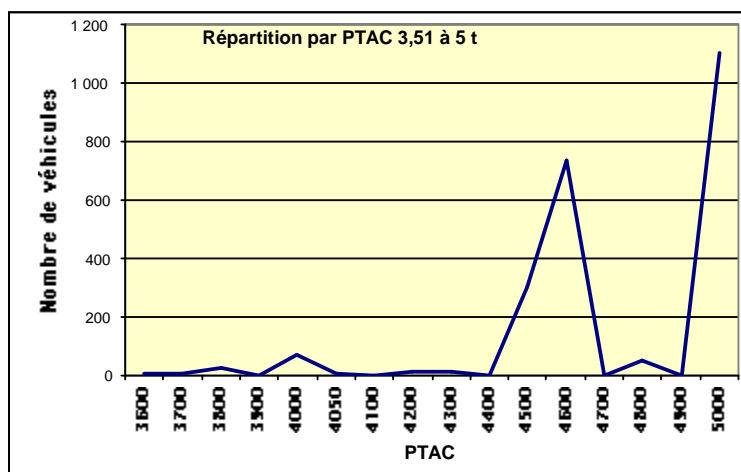


Figure 10 : Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 3.51 t à 5 t de PTAC

Valeur moyenne retenue : 4.742 kg. Ecart maximal à la moyenne des points d'accumulation inférieur à 5%.

2.5. Camions de PTAC compris entre 5,1 et 6 t

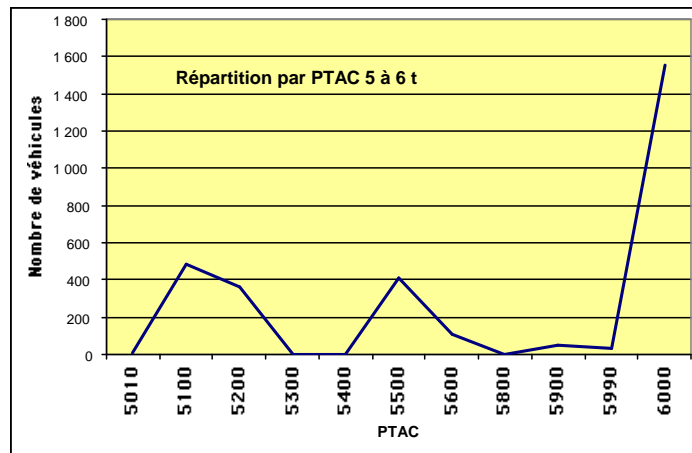


Figure 11 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 5,1 t à 6 t de PTAC

Valeur moyenne retenue : 5.672 kg. Ecart maximal à la moyenne des points d'accumulation inférieur à 10% (6% pour le principal à 6t).

2.6. Camions de PTAC compris entre 6,1 et 10,9 t

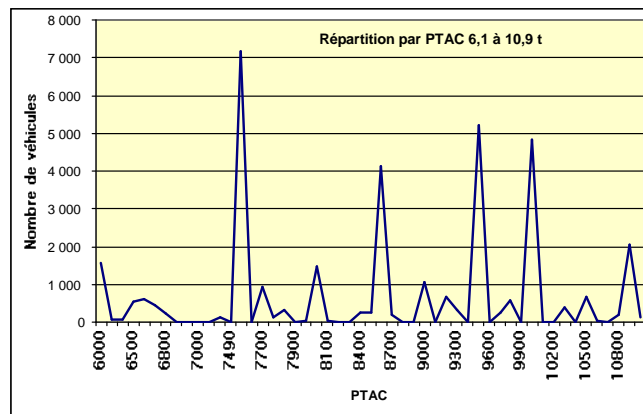


Figure 12 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 6.1 t à 10.9 t de PTAC

Valeur moyenne retenue : 8.802 kg. Ecart à la moyenne des points d'accumulation :

- 15% pour 7.500 kg de PTAC
- 2% pour 8.600 kg de PTAC
- 8% pour 9.500 kg de PTAC
- 14% pour 10.000 kg de PTAC

2.7. Camions de PTAC compris entre 11 et 19 t

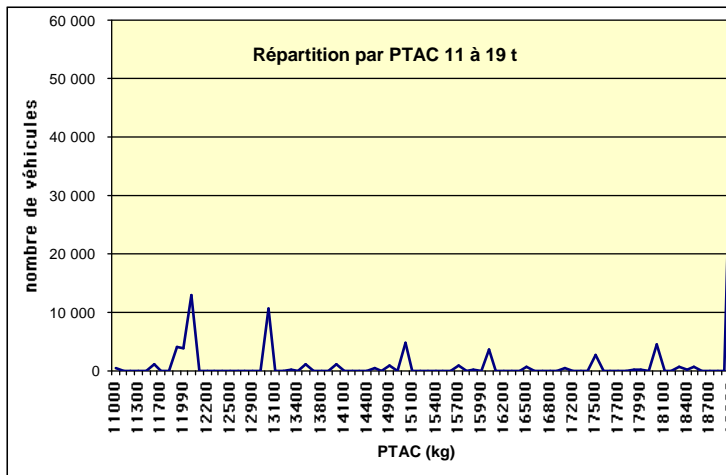


Figure 13 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 11 t à 19 t de PTAC

Valeur moyenne retenue : 16.318 kg. Ecart à la moyenne des points d'accumulation :

- 16% pour 19 t de PTAC (environ 50% des camions de cette catégorie)
- 26% pour 12 t de PTAC (12% des camions de cette catégorie)
- 20% pour 13 t de PTAC (10% des véhicules de cette catégorie)
- inférieur à 10% pour tous les pics de 15 à 18 t (17% des véhicules de cette catégorie).

2.8. Camions de PTAC compris entre 19,1 et 21 t

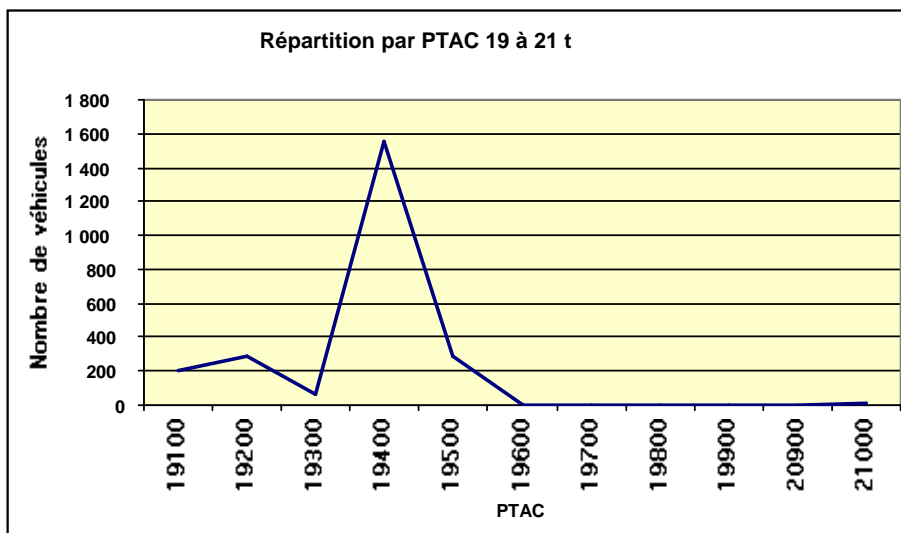


Figure 14 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 19.1 t à 21 t de PTAC

Valeur moyenne retenue : 19.368 kg. Ecart à la moyenne inférieur à 10% pour tout véhicule de cette catégorie.

2.9. Camions de PTAC compris entre 21,1 et 32,6 t

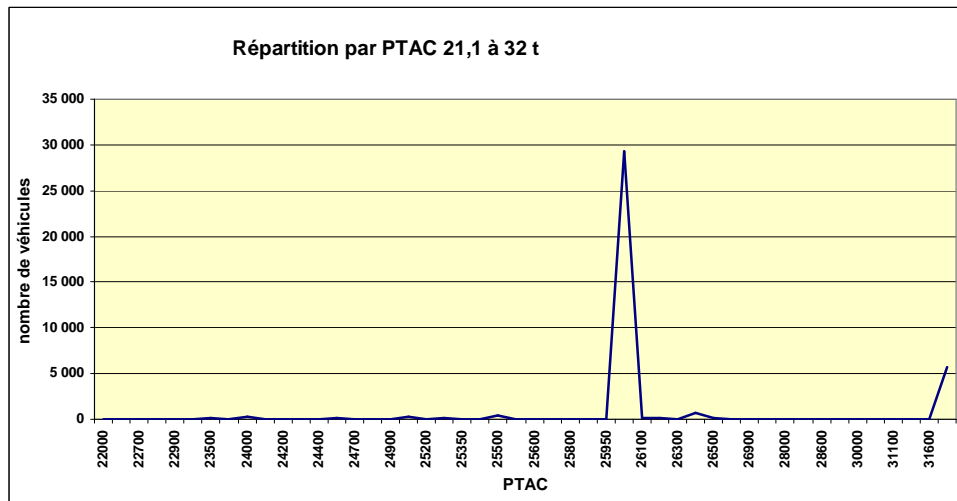


Figure 15 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 21.1 t à 32,6 t de PTAC

Valeur moyenne retenue : 26.870 kg. Ecart à la moyenne des points d'accumulation :

- 3% pour 26 t de PTAC (plus de 75% des camions de cette catégorie ; limite supérieure pour un véhicule à moteur à trois essieux)
- 19% pour 32 t de PTAC (15% des camions de cette catégorie ; limite supérieure pour un véhicule à moteur à quatre essieux ou plus)

2.10. Ensembles articulés

Ce terme recouvre ce qui est familièrement désigné par "semi-remorque", c'est à dire un ensemble composé d'un tracteur (la partie avant, où se tient le conducteur) et d'une remorque, qui transporte la charge. Le PTR (Poids Total Roulant Autorisé) de ces ensembles est de 40 tonnes au maximum, pouvant monter à 44 t pour les ensembles qui servent au transport combiné.

Et de fait, la quasi-totalité du parc est composé d'ensembles de 44 t de PTR, fonctionnant en fait à 40 tonnes, poids qu'il est interdit de dépasser

ANNEXE 3 : RAYON D'ACTION ET AMENAGEMENTS INTERIEURS DES AVIONS AIRBUS

3.1. Rayons d'action

En 2001 site www.airbus.com proposait les graphiques reproduits ci-dessous, qui permettent de visualiser les rayons d'action des avions commercialisés par Airbus en fonction de la charge emportée. Ces graphiques sont tous constitués de la même manière : ils donnent les rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage. Ils ont servi de base aux calculs exposés au § 4.3.

3.1.1. A300 version fret

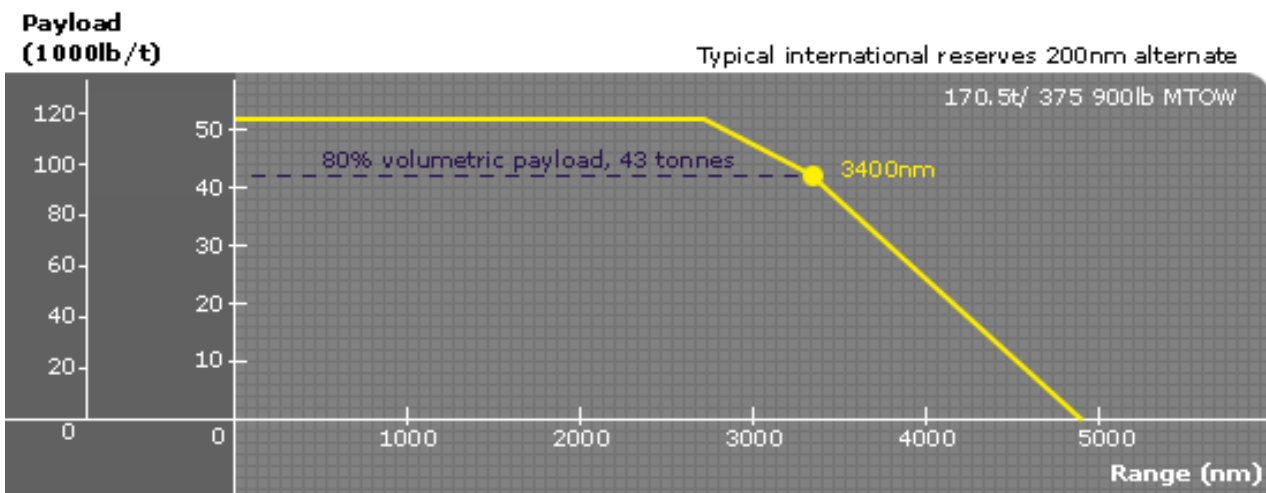


Figure 16 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A300 version fret

3.1.2. A310

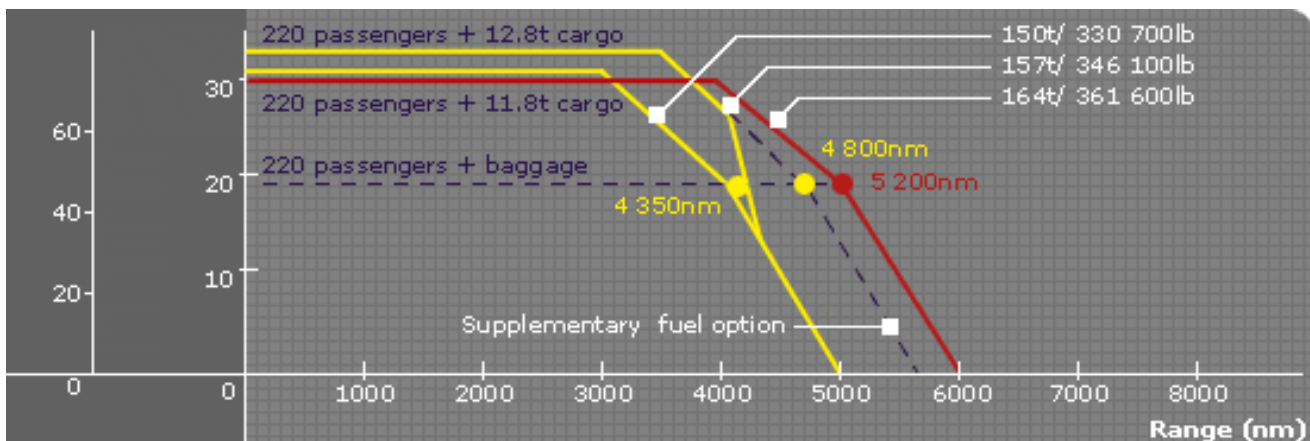


Figure 17 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A310

3.1.3. A318

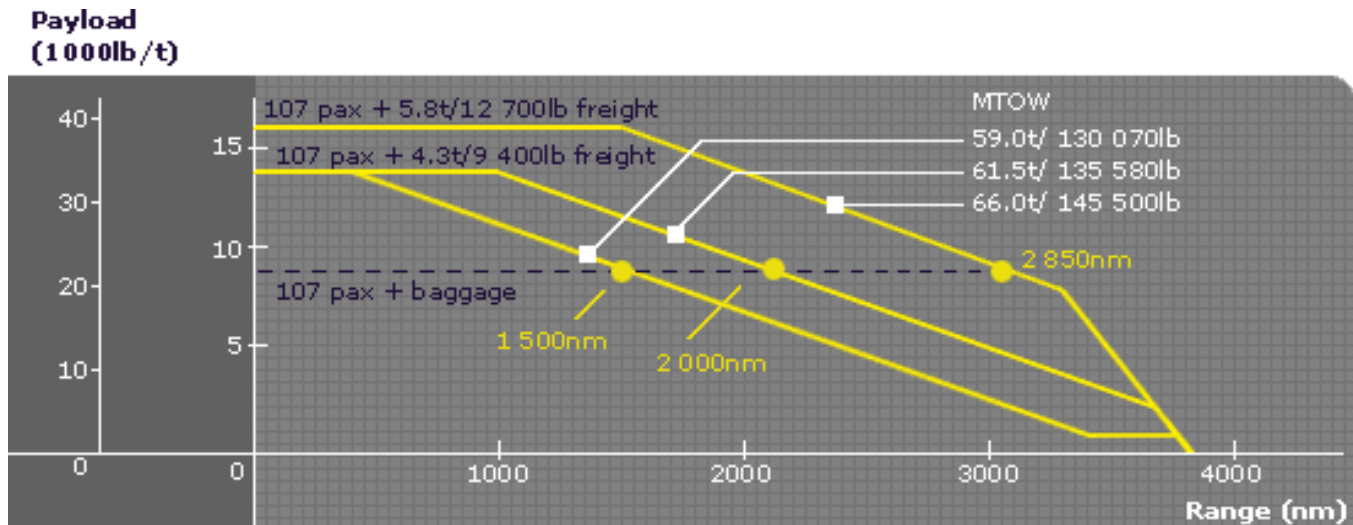


Figure 18 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A318

3.1.4. A319

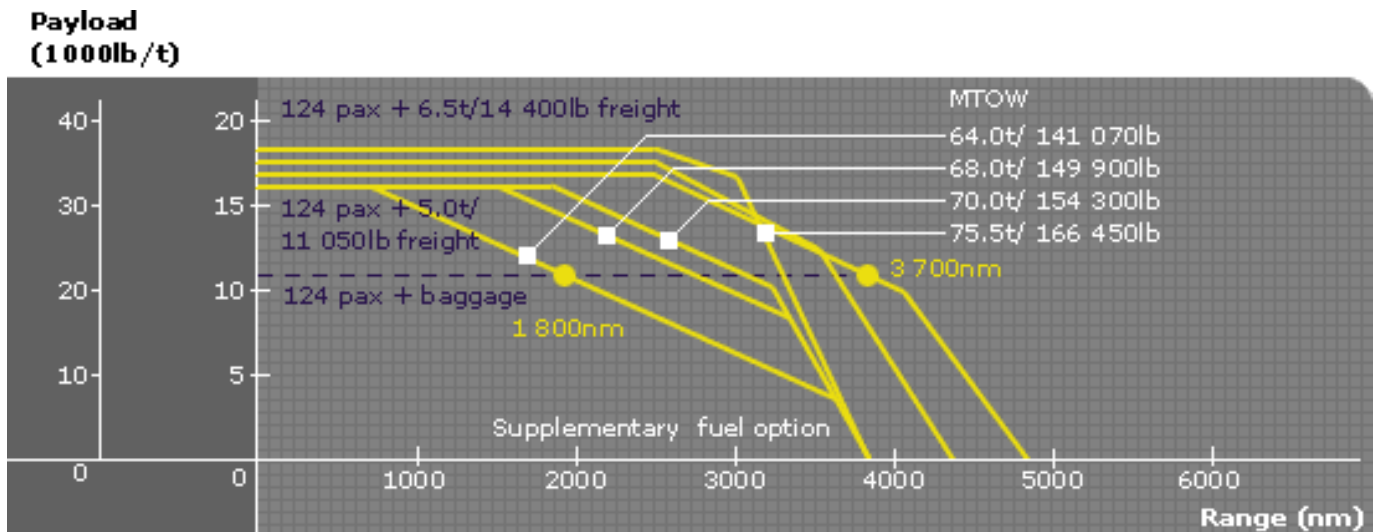


Figure 19 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A319

3.1.5. A320

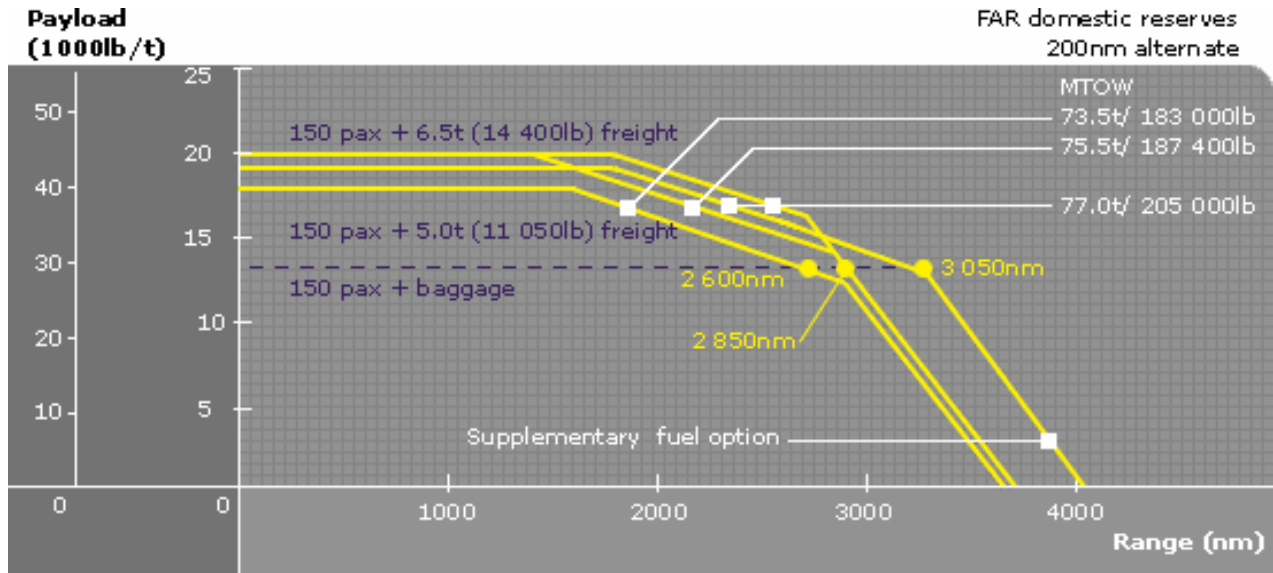


Figure 20 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A320

3.1.6. A330-200

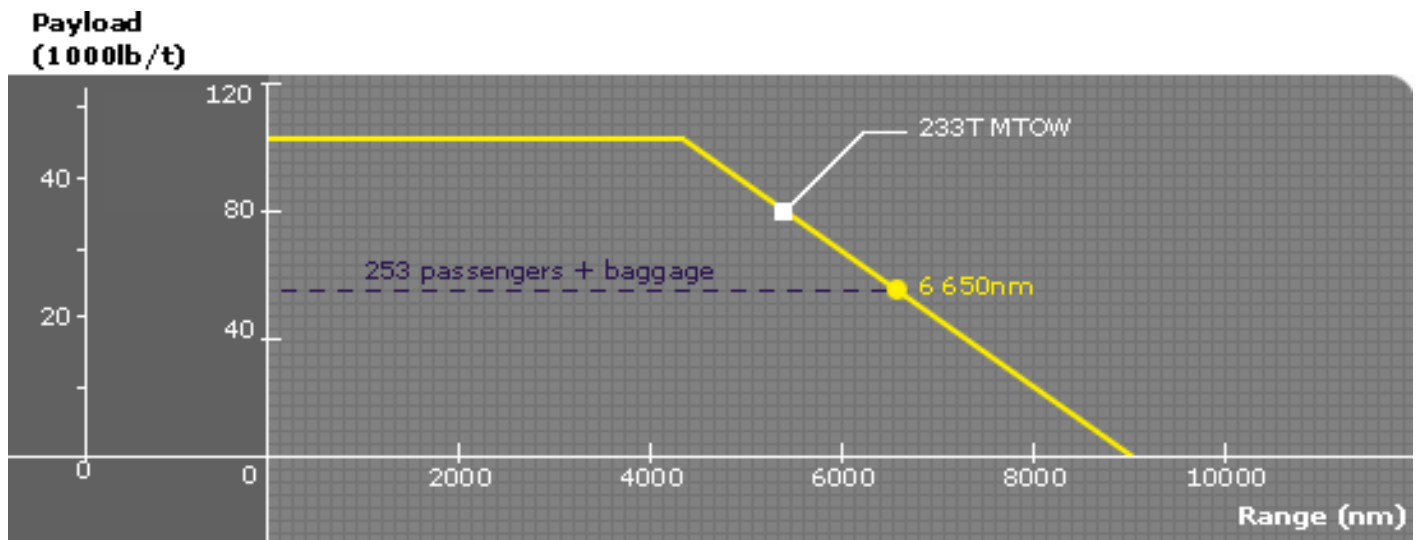


Figure 21 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A330-200

3.1.7. A330-300

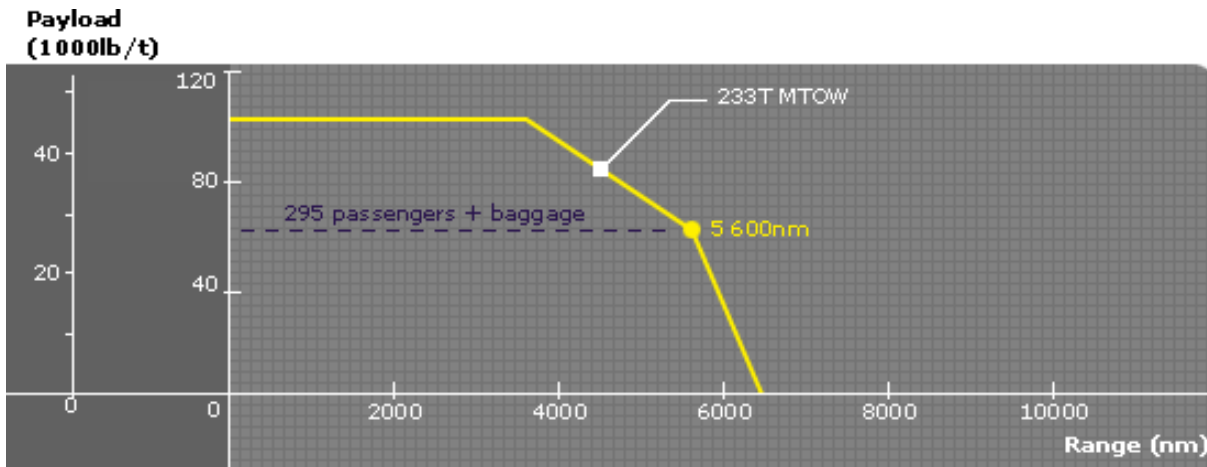


Figure 22 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A330-300

3.1.8. A340-200

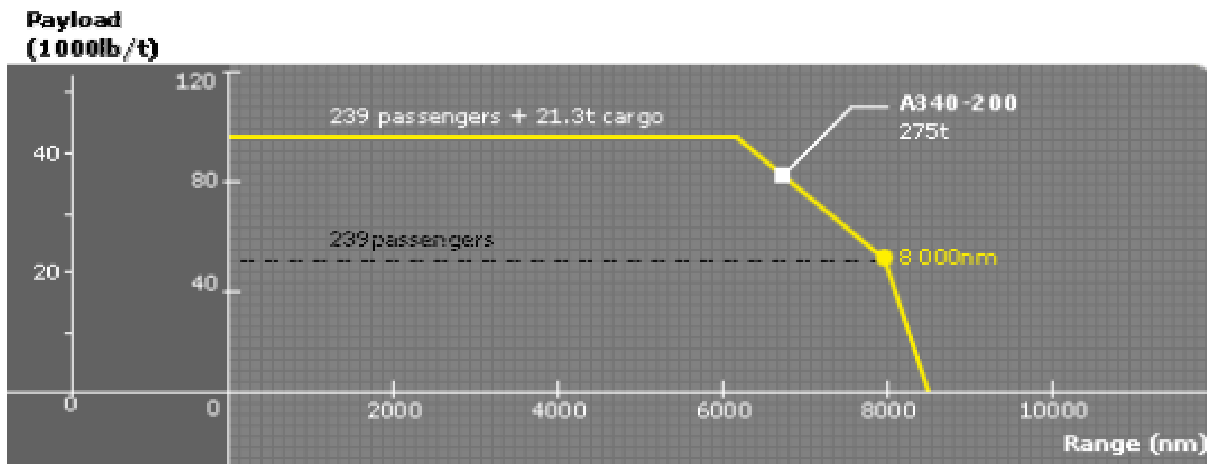


Figure 23 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-200

3.1.9. A340-300

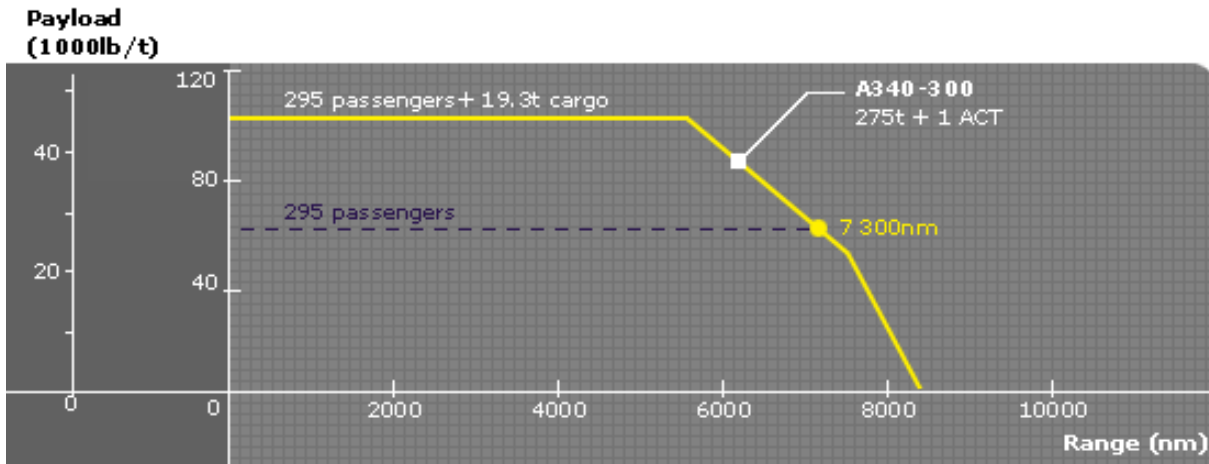


Figure 24 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-300

3.1.10. A340-500

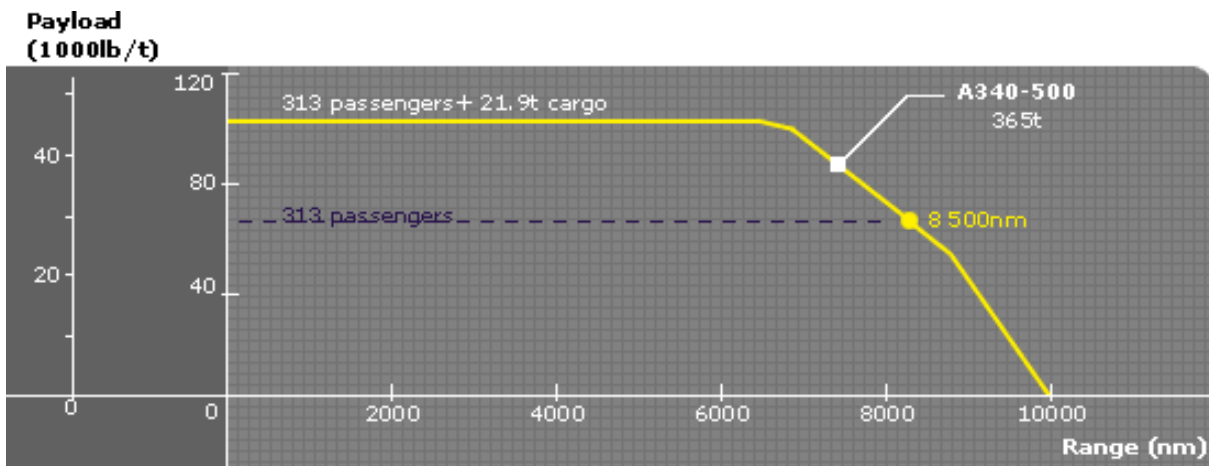


Figure 25 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-500

3.1.11. A340-600

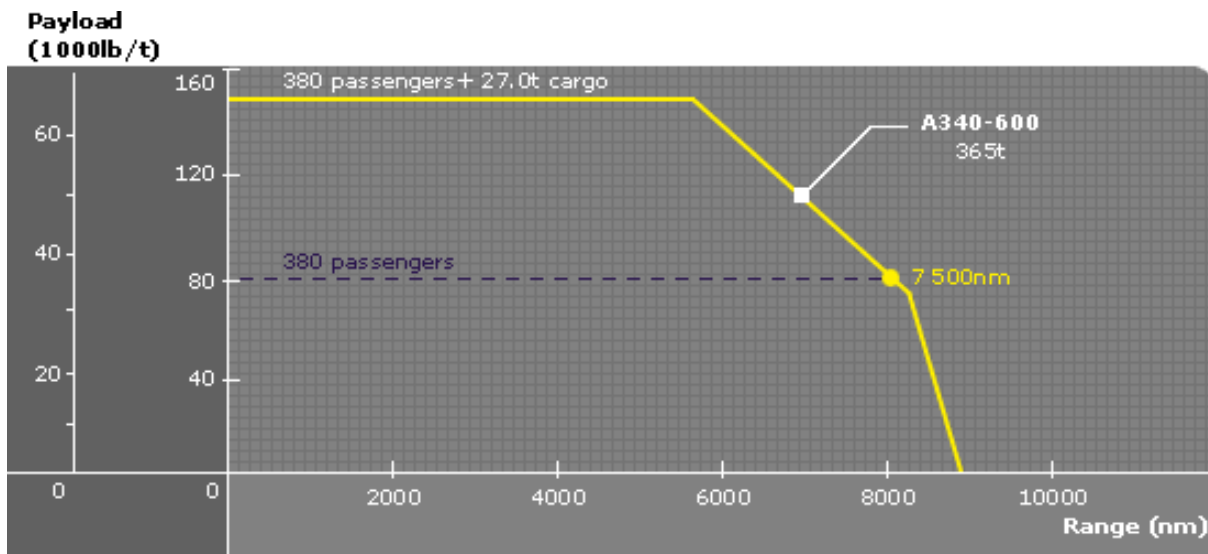


Figure 26 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-600

3.2. Cabines

C'est à partir des plans de cabines que les occupations de plancher en fonction des classes ont été établies, par décompte des sièges "business" remplaçant des sièges "seconde", ou de sièges "Première" remplaçant des sièges "seconde" ou "business".

Les plans ci-dessous ne concernent que quelques exemples, mais le ratio d'occupation d'espace déduit de ces exemples se trouve convenir à tous les cas de figure des avions Airbus.

3.2.1. A320

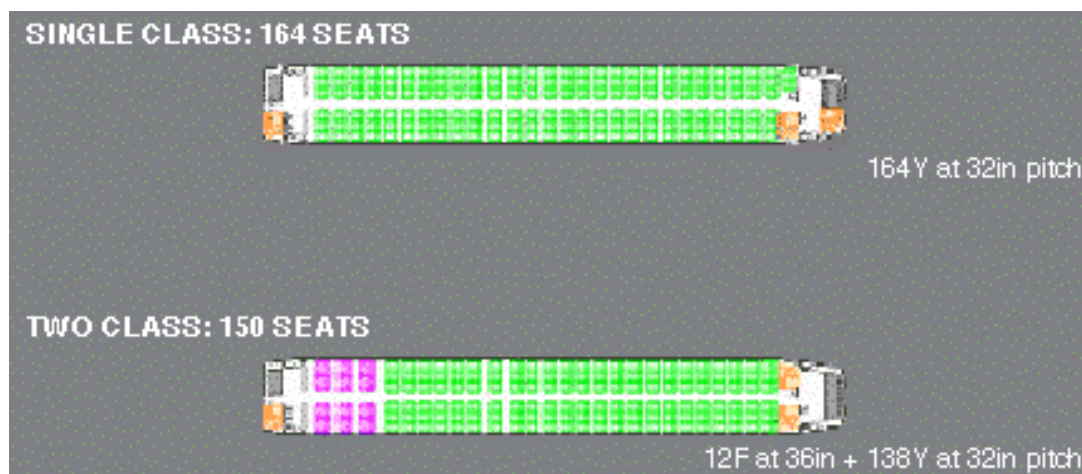


Figure 27 : Plan d'occupation d l'espace de l'A320 en fonction du nombre de classe

On distingue nettement, sur le graphique ci-dessus, que 26 sièges de seconde ont été remplacés par 12 siège business, soit un siège business = 2,17 sièges de seconde (ratio employé pour allouer des émissions par siège).

3.2.2. A330-200

version 2 cabines

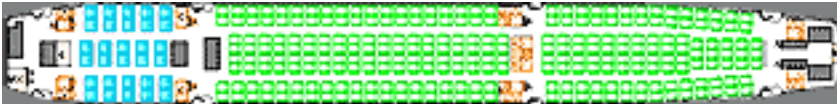


Figure 28 : Plan d'occupation de l'espace de l'A330-200, version deux cabines

version 3 cabines

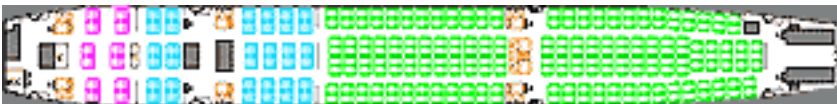


Figure 29 : Plan d'occupation de l'espace de l'A330-200, version trois cabines

Le graphique ci-dessus permet de voir que les sièges "Première" occupent 50% d'espace de plus que les sièges "Business". Il permet aussi (avec un décompte attentif !) de voir qu'un siège "Business" occupe 2,33 fois l'espace d'un siège de seconde, puisque 56 sièges de seconde ont été remplacés par 24 sièges "business" dans la partie du milieu de l'avion en passant du schéma du haut à celui du bas.

3.2.3. A340-200

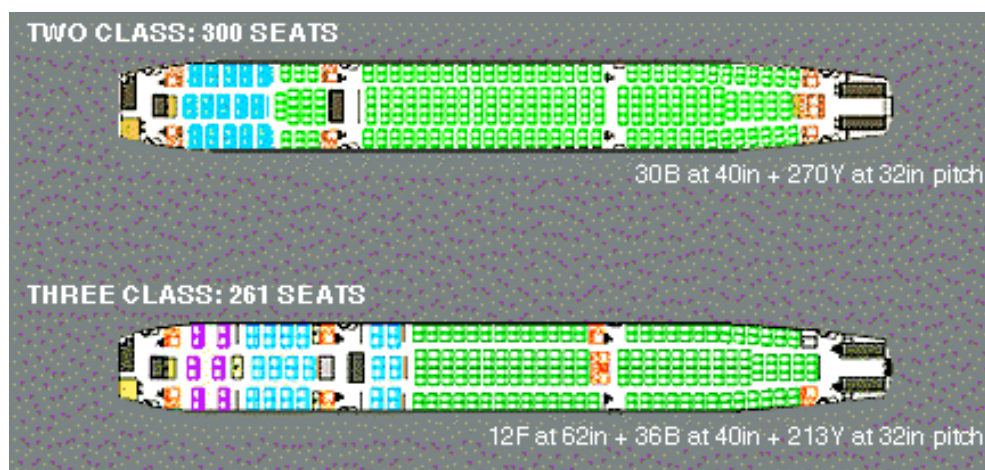


Figure 30 : Plan d'occupation de l'espace de l'A340-200 en fonction du nombre de classe

Les ratios utilisés pour l'A330-200 permettent, avec cet avion, d'obtenir le même nombre "d'équivalent seconde" avec 2 et 3 cabines, à quelques sièges près.

3.2.4. A340-600

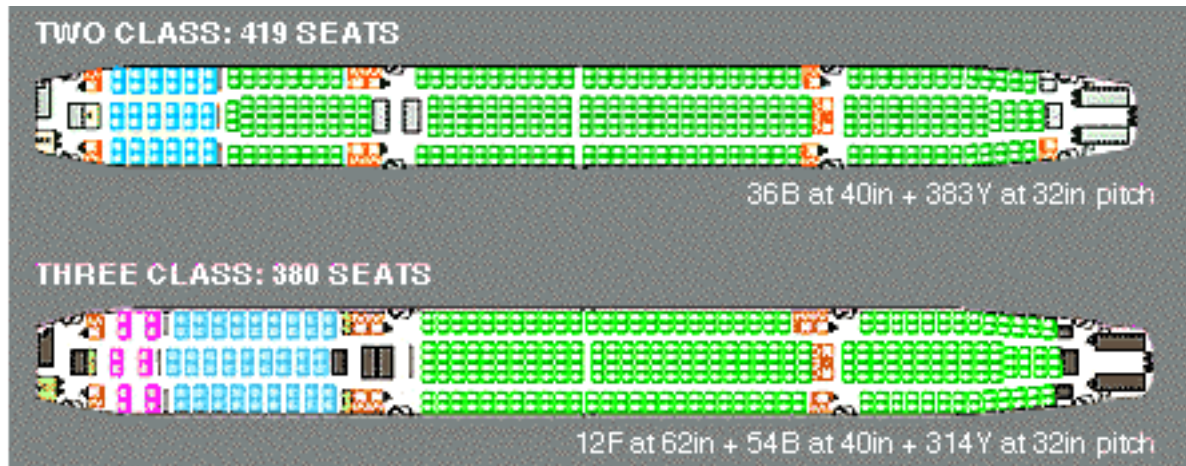


Figure 31 : Plan d'occupation de l'espace de l'A340-600 en fonction du nombre de classe

Conclusion identique à ci-dessus.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Consommations énergétiques en France pour l'activité de construction des véhicules terrestres (1999)	7
Tableau 2 :	Facteurs d'émissions pour l'activité de construction des véhicules terrestres	7
Tableau 3 :	Facteurs d'émission de la production des différents matériaux nécessaires à la construction d'un véhicule d'une tonne	9
Tableau 4 :	Grammes équivalent carbone par km parcouru des véhicules essence en fonction du domicile du conducteur.....	11
Tableau 5 :	Grammes équivalent carbone par km parcouru des véhicules diesel en fonction de la zone de résidence du conducteur.....	11
Tableau 6 :	Consommations moyennes des véhicules en fonction de leur ancienneté de mise en circulation	12
Tableau 7 :	Consommation moyenne des véhicules essence et diesel en fonction de leur puissance administrative	13
Tableau 8 :	Consommations associées aux cycles de roulage conventionnels des véhicules essence pour des puissances administratives de 3 à 5 CV fiscaux.....	15
Tableau 9 :	Distance moyenne domicile-travail en fonction du parcours.	16
Tableau 10 :	Facteurs d'émission par voiture des déplacements domicile travail en fonction du parcours (Métropole).....	17
Tableau 11 :	Facteurs d'émission domicile travail en fonction du type de parcours effectué par km (Métropole)	18
Tableau 12 :	Distances parcourues et répartition modale pour la mobilité quotidienne en Métropole	20
Tableau 13 :	Millions de véhicule.km par semaine et par mode en 1993, France entière.....	21
Tableau 14 :	Kilométrages parcourus par personne et par an en France en 1993, selon le mode	22
Tableau 15 :	Caractéristiques principales des minibus, autobus urbains et autocars interurbains, et facteur d'émission pour la fabrication ramené au km parcouru. Sources diverses.....	23
Tableau 16 :	Facteurs d'émission par voyageur.km pour différents types d'autobus (ADEME, 2002)	24
Tableau 17 :	Facteurs d'émission par véhicule.km pour différents types d'autobus.....	24
Tableau 18 :	Facteurs d'émission par passager.km pour différents types d'autobus	25
Tableau 19 :	Distances moyennes au travail en fonction du type de bus emprunté pour le déplacement domicile-travail.....	26
Tableau 20 :	Distance annuelle moyenne parcourue par Français en 1993 et part des transports collectifs	26
Tableau 21 :	Distance annuelle moyenne parcourue en transport collectif par Français en 1993	27

Tableau 22 :	Kilométrages hebdomadaires totaux par mode, 1993 - source INSEE	27
Tableau 23 :	Kilomètres effectués par personne et par an selon le mode, 1993 - source INSEE27	
Tableau 24 :	Kilomètres effectués par personne et par an selon le mode, pour les transports collectifs	28
Tableau 25 :	Kilomètres effectués par personne et par an en longue distance selon le mode - source INSEE	28
Tableau 26 :	Facteurs d'émission des deux-roues liés à la combustion (ADEME, 2002)	30
Tableau 27 :	Classes de PTAC pour les camionnettes et les camions.....	31
Tableau 28 :	Caractéristiques PTAC	33
Tableau 29 :	Durée de vie moyenne des véhicules en km en fonction de la classe de PTAC....	33
Tableau 30 :	Facteurs d'émission de la fabrication des véhicules en fonction de leur classe de PTAC	34
Tableau 31 :	Consommation des véhicules par km et par classe de PTAC, et émissions associées - Source : Tableaux des consommations d'énergie en France, Direction Générale de l'Energie et des matières premières, Observatoire de l'Energie, édition 2001	36
Tableau 32 :	Facteurs d'émission moyens par véhicule.km par classe de PTAC	36
Tableau 33 :	Caractéristique du transport de marchandises en fonction de la classe de PTAC en métropole	41
Tableau 34 :	Facteurs d'émission à vide et à pleine charge du transport de marchandises en métropole	42
Tableau 35 :	Facteurs d'émission moyens nationaux du transport de marchandise selon la classe de PTAC	45
Tableau 36 :	t.km expédiées par la route par habitant et par an selon la région.....	47
Tableau 37 :	t.km réceptionnées par la route par habitant et par an selon la région.....	47
Tableau 38 :	Caractéristiques techniques des principaux avions.....	48
Tableau 39 :	Emissions de CO ₂ (combustion seule) en geqC/passager.km en avion de ligne ...	49
Tableau 40 :	Moyenne des émissions de CO ₂ (combustion seule) en geqC/passager.km en avion de ligne	50
Tableau 41 :	Facteurs d'émission par passager.km en avion de ligne.....	52
Tableau 42 :	kg équivalent carbone par tonne.km pour le fret aérien, combustion seule	53
Tableau 43 :	Facteur d'émission pour le fret aérien court-courrier, combustion seule	53
Tableau 44 :	Facteur d'émission pour le fret aérien moyen-courrier, combustion seule	54
Tableau 45 :	Facteur d'émission pour le fret aérien long-courrier, combustion seule	54
Tableau 46 :	Facteur d'émission pour le transport de marchandises en avion	54
Tableau 47 :	km par personne et par an effectués en avion en 1993	55
Tableau 48 :	Données caractéristiques des vols partant d'un aéroport français ou y arrivant....	56

Tableau 49 :	Facteur d'émissions par type de train (source : SNCF/2009).....	57
Tableau 50 :	Données du trafic ferroviaire voyageurs en Corse.	58
Tableau 51 :	Facteurs d'émission RATP (Données de l'année 2005).....	58
Tableau 52 :	Facteurs d'émission par voyageur.km pour les déplacements en train à l'étranger (UIC – INFRAS - IWW, 2004).....	59
Tableau 53 :	Millions de voyageurs*km par semaine de déplacement longue distance en mode ferré	60
Tableau 54 :	Distance moyenne par personne et par an en longue distance en mode ferré	60
Tableau 55 :	Fret ferroviaire en 2005 en France, traction électrique.....	61
Tableau 56 :	Fret ferroviaire en 2005 en France, traction thermique	61
Tableau 57 :	Facteurs d'émission du fret ferroviaire pour la traction électrique.....	61
Tableau 58 :	Facteurs d'émission du fret ferroviaire pour la traction thermique	61
Tableau 59 :	Facteurs d'émission moyens pour le fret ferroviaire en France	61
Tableau 60 :	Facteurs d'émission par tonne.km pour le fret en train à l'étranger (UIC – INFRAS - IWW, 2004).....	62
Tableau 61 :	Poids à vide des principaux bateaux.....	63
Tableau 62 :	Facteurs d'émission des porte-conteneurs	65
Tableau 63 :	Facteurs d'émission des vraquiers	67
Tableau 64 :	Caractéristiques techniques de 3 navires pour les liaisons Corse-continent. Source : Paul Lucas, architecte naval.....	68
Tableau 65 :	Facteurs d'émission par bateau pour les liaisons Corse-continent	69
Tableau 66 :	Facteurs d'émission pour les personnes - bateaux pour la Corse	69
Tableau 67 :	Facteurs d'émission pour le fret - bateaux pour la Corse	69
Tableau 68 :	Caractéristiques techniques d'un bateau caractéristique utilisé dans le Finistère. Source : Paul Lucas, architecte naval.....	70
Tableau 69 :	Caractéristiques techniques d'un bateau caractéristique utilisé dans le Finistère. Source : Paul Lucas, architecte naval.....	70
Tableau 70 :	Indicateurs de consommation énergétique et facteurs d'émission. Données agrégées par type d'équipement et par bassin de navigation. (ADEME, VNF, T&L Associés, 2005).....	72
Tableau 71 :	Indicateurs de consommation énergétique et facteurs d'émission. Données détaillées par bassin de navigation. (ADEME, VNF, T&L Associés, 2005).....	73
Tableau 72 :	Facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué (Métropole)	74
Tableau 73 :	Facteurs d'émission des véhicules de 6 à 10 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué (Métropole)	75
Tableau 74 :	Facteurs d'émission des véhicules de plus de 11 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué (Métropole)	76

Tableau 75 : Facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué (Métropole)..... 76

Tableau 76 : Facteurs d'émission des véhicules de 6 à 10 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué (Métropole)..... 77

Tableau 77 : Facteurs d'émission des véhicules de plus de 11 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué (Métropole)..... 77

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Corrélation entre la durée de vie et le PTAC des camions et camionnettes.....	34
Figure 2 :	Corrélation entre le PTAC et les émissions par véhicule.km	37
Figure 3 :	Corrélation entre le PTAC et les émissions moyennes par véhicule.km pour les véhicules particuliers.....	37
Figure 4 :	Compilation des publications effectuées sur le forçage radiatif du aux avions, en milliwatts par m ² . Source Sausen et al. (2005).	51
Figure 5 :	Corrélation entre les émissions quotidiennes d'un porte conteneurs en mer et sa capacité d'empont.....	65
Figure 6 :	Carte des gabarits des voies navigables en 2003 en France (VNF).....	71
Figure 7 :	Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de moins de 1.5 t de PTAC	79
Figure 8 :	Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 1.5 t à 2.5 t de PTAC	79
Figure 9 :	Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 2.5 t à 3.5 t de PTAC	80
Figure 10 :	Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 3.51 t à 5 t de PTAC	80
Figure 11 :	Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 5,1 t à 6 t de PTAC	81
Figure 12 :	Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 6.1 t à 10.9 t de PTAC	81
Figure 13 :	Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 11 t à 19 t de PTAC	82
Figure 14 :	Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 19.1 t à 21 t de PTAC	82
Figure 15 :	Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 21.1 t à 32,6 t de PTAC.....	83
Figure 16 :	Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A300 version fret	84
Figure 17 :	Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A31084	
Figure 18 :	Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A31885	
Figure 19 :	Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A3109	85
Figure 20 :	Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A32086	
Figure 21 :	Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A330-200	86
Figure 22 :	Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A330-300	87
Figure 23 :	Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-200	87

Figure 24 :	Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-300	88
Figure 25 :	Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-500	88
Figure 26 :	Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-600	89
Figure 27 :	Plan d'occupation d l'espace de l'A320 en fonction du nombre de classe	89
Figure 28 :	Plan d'occupation de l'espace de l'A330-200, version deux cabines	90
Figure 29 :	Plan d'occupation de l'espace de l'A330-200, version trois cabines	90
Figure 30 :	Plan d'occupation de l'espace de l'A340-200 en fonction du nombre de classe ..	90
Figure 31 :	Plan d'occupation de l'espace de l'A340-600 en fonction du nombre de classe ..	91