

Bilan Carbone®

Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées (version 3.0)

AVRIL 2005



BILAN CARBONE

ADEME



**Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie**



**Mission Interministérielle
de l'Effet de Serre**



La méthode Bilan Carbone® a été élaborée pour l'ADEME par Jean-Marc Jancovici, du bureau d'études Manicore. BILAN CARBONE® est une marque déposée de l'ADEME.

TABLE DES MATIERES

Introduction	10
1 - Incertitudes par défaut	11
1.1 Energie	11
1.1.1 Combustibles fossiles	11
1.1.2 Electricité.....	11
1.2 Emissions d'autres gaz à effet de serre dans le cadre des émissions non liées à l'énergie ..	12
1.3 Transports	12
1.4 Matériaux entrants et Services tertiaires	12
1.5 Déchets et eaux usées	13
1.6 Amortissements	13
2 - Facteurs associés à la consommation directe d'énergie	14
2.1 Nature des émissions	14
2.2 Combustibles fossiles	14
2.2.1 Combustibles liquides	16
2.2.2 Gaz naturel	19
2.2.3 Combustibles solides	20
2.2.4 Plastiques utilisés comme combustibles	21
2.2.5 Cas du bois	21
2.3 Electricité	22
2.3.1 Quelques considérations préliminaires.....	22
2.3.2 Cas de l'électricité de réseau	23
2.3.3 Facteurs d'émission par producteur pour les électriciens européens	25
2.3.4 Saisonnalité de l'électricité EDF (producteur).....	26
2.3.5 facteurs différenciés selon les usages pour l'électricité de réseau française	27
2.3.6 Consommations standard des principaux équipements électriques résidentiels.....	28
2.3.7 Consommations spécifiques d'électricité pour le tertiaire	30
2.3.8 Pertes en ligne de l'électricité	31
2.4 Achats de vapeur	31
2.4.1 Généralités.....	31
2.4.2 CPCU	32
2.5 Cas du chauffage des locaux sans compteur propre	34
2.5.1 Activités tertiaires, chauffage non électrique	34
2.5.2 Logements	35
2.5.2.1 facteurs d'émission par logement.....	35
2.5.2.2 proportion de chaque énergie dans le chauffage des logements	36
2.5.2.3 proportion de chaque énergie dans l'eau chaude sanitaire des logements	37
3 - Prise en compte des émissions non énergétiques des procédés	38
3.1 - PRG des principaux gaz considérés	38
3.2 - Emanations de protoxyde d'azote des engrais azotés	39
3.3 - Fuites de fluides frigorigènes	40
3.4 - Autres cas	41

4- Prise en compte des transports	42
4.1 Transport routier de personnes	42
4.1.1 Véhicules particuliers	43
4.1.1.1 amortissement des véhicules particuliers	43
4.1.1.2 Calcul de la consommation de référence des véhicules particuliers	45
4.1.1.3 Déplacements entre domicile et travail	51
4.1.1.4 Déplacements en voiture pour motifs professionnels dans la journée	54
4.1.2 Bus et cars	54
4.1.2.1 Amortissement des bus et autocars	54
4.1.2.2 Emissions par véhicule.km	55
4.1.2.3 Emissions par passager.km	56
4.1.3 RER, métro et tramways	57
4.2 Transport routier de marchandises	57
4.2.1 Amortissement des camions et camionnettes	57
4.2.2 Consommations moyennes par véhicule.km par classe de PTAC	62
4.2.3 Facteurs d'émission par véhicule.km tenant compte du taux de remplissage et de parcours à vide ..	65
4.2.3.1 Raisonnement	65
4.2.3.2 Détermination des consommations à vide et à pleine charge	67
4.2.3.3 Réintégration des émissions de fabrication	68
4.2.4 Facteurs d'émission par tonne.km tenant compte du taux de remplissage et de parcours à vide	69
4.2.4.1 Typologie des transports de marchandises	69
4.2.4.2 Formulation des émissions par tonne.km dans le Bilan Carbone	70
4.2.5 Incertitudes des méthodes exposées au 4.2.3 et 4.2.4	71
4.2.6 Calculs exacts des distances routières	72
4.3 Transport aérien	72
4.3.1 Consommations par passager.km	72
4.3.2 Consommations par tonne.km pour les marchandises	76
4.3.3 Détermination des distances parcourues par trajet	78
4.3.4 Gain ultérieur en précision	79
4.4 Transport ferroviaire	79
4.4.1 Généralités	79
4.4.2 Personnes	79
4.4.2.1 Train national	79
4.4.2.2 Train express régional	80
4.4.2.3 Train à l'étranger	80
4.4.3 Fret	80
4.4.3.1 En France	80
4.4.3.2 A l'étranger	81
4.4.4 Calculs exacts des distances ferroviaires	81
4.5 Transport Maritime	81
4.5.1 Emissions liées à la fabrication des bateaux	82
4.5.2 Emissions spécifiques liées au carburant consommé	82
4.5.2.1 Cas des porte-conteneurs	83
4.5.2.2 Cas des vraquiers	85
4.5.2.3 Cas des cargos	86
4.5.2.4 Cas des péniches	86
4.5.3 Calcul des routes maritimes	86
5 - Prise en compte des matériaux de base entrants et des services tertiaires achetés	87
5.0 Remarque liminaire pour les matériaux entrants	87
5.1 Acier & métaux ferreux	87
5.2 Aluminium	89

5.3 Autres métaux	91
5.4 Plastiques	93
5.4.1.1 Polystyrène	93
5.4.1.2 Polychlorure de Vinyle	94
5.4.1.3 Polyéthylène haute densité	94
5.4.1.4 Polyéthylène basse densité	95
5.4.1.5 Polyéthylène terephthalate	96
5.4.1.6 Nylon	97
5.4.1.7 valeurs moyennes	97
5.5 Verre.....	97
5.6 Matériaux de construction	99
5.6.1 Ciment, béton	99
5.6.2 Autres matériaux	100
5.6.2.1 Pierres	100
5.6.2.2 Autres matériaux de construction : valeur moyenne.....	100
5.6.2.3 Bois.....	101
5.7 Papiers et cartons.....	101
5.8 Services tertiaires	102
5.8.1 Remarque liminaire	102
5.8.2 Ratio proposé.....	103
5.8.3 Dépense informatique, services divers	103
6 - Prise en compte des autres produits entrants : produits servant aux activités agricoles, d'élevage, et agro-alimentaires	104
6.1 Remarque liminaire	104
6.2 Engrais	105
6.3 Phytosanitaires	106
6.3.1 Herbicides.....	106
6.3.2 Fongicides	107
6.3.3 Insecticides	107
6.3.4 Molluscides	107
6.3.5 Régulateurs de croissance.....	108
6.3.6 Valeur par défaut.....	108
6.4 Céréales, farine.....	108
6.4.1 Blé	109
6.4.2 Maïs fourrage	110
6.4.3 Farine.....	112
6.5 Fruits et légumes	112
6.6 Viande de bœuf et de veau.....	112
6.6.1 Emissions annuelles du bétail.....	113
6.6.2 Affectation des vaches allaitantes.....	114
6.6.3 Veaux de lait.....	115
6.6.4 Vaches laitières et lait.....	116
6.6.5 Bœufs	117
6.6.5.1 Races à viande	117
6.6.5.2 Valeur moyenne.....	117
6.7 Laitages	118
6.7.1 Fromage à pâte cuite.....	118
6.7.2 Fromages frais, yaourts	118
6.7.3 Fromages au lait cru	118
6.7.4 Beurre, crème	118

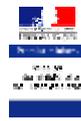
6.8 Porc de batterie	119
6.9 Volailles et produits dérivés	120
6.9.1 Poulets de batterie	120
6.9.2 Œufs	120
6.10 Mouton.....	121
6.10.1 Agneaux de lait.....	122
6.10.2 Agneaux à l'herbe.....	122
6.11 Poisson.....	122
6.12 Alcool, sucre.....	123
6.13 Autres produits.....	123
6.14 Facteurs d'émission agrégés pour les exploitations agricoles.....	123
6.14.1 Emissions à l'hectare pour les principales cultures.....	124
6.14.1.1 Emanations de protoxyde d'azote	124
6.14.1.2 Fabrication des engrais	125
6.14.1.3 Mécanisation.....	126
6.14.2 Emissions de méthane des animaux d'élevage.....	126
7 - Prise en compte des déchets directs et des eaux usées.....	128
7.0 Remarque liminaire	128
7.1 Matériaux inertes	128
7.1.1 Matériaux inertes - décharge et incinération	129
7.1.2 Matériaux inertes - valeur par défaut.....	129
7.2 Matériaux non fermentescibles mais combustibles.....	129
7.2.1 Cas du plastique mis en décharge.....	130
7.2.2 Cas du plastique incinéré sans valorisation	130
7.2.3 Cas du plastique incinéré avec valorisation.....	130
7.2.4 Cas du plastique recyclé	132
7.2.5 Répartition française et valeurs moyennes	132
7.3 Matériaux fermentescibles et combustibles	133
7.3.1 Mise en décharge sans valorisation	133
7.3.1.1 Papiers et cartons	133
7.3.1.2 déchets alimentaires.....	133
7.3.2 Mise en décharge avec valorisation.....	134
7.3.2.1 déchets alimentaires.....	134
7.3.2.2 papiers et cartons	134
7.3.3 Incinération sans valorisation.....	135
7.3.3.1 déchets alimentaires.....	135
7.3.3.2 Papiers et cartons	135
7.3.4 Incinération avec valorisation.....	136
7.3.4.1 Déchets alimentaires	136
7.3.4.2 Papiers et cartons	136
7.3.5 Recyclage	136
7.3.6 Moyenne française	137
7.4 Eaux usées.....	137
8 - Traitement de fin de vie des emballages.....	140
9 - Prise en compte de l'amortissements des immobilisations	142
9.0 Remarque liminaire	142
9.1 Bâtiments	142

9.2 Routes et parkings.....	145
9.2.1 Constituants primaires	145
9.2.2 Facteurs d'émission au m ² de surface construite (routes et parkings).....	147
9.2.2.1 Catégories de voies routières	147
9.2.2.2 Emissions au m ² construit.....	147
9.2.2.3 Emissions liées aux glissières de sécurité	148
9.2.2.4 Parkings	148
9.3 Machines & véhicules	148
9.3.1 Véhicules	149
9.3.2 Machines de production	149
9.3.3 Informatique	149
9.3.3.1 Fabrication des puces.....	149
9.3.3.2 Circuits imprimés.....	150
9.3.3.3 Ecrans	151
9.3.3.4 Autres constituants et total.....	151
9.3.3.5 Imprimantes et serveurs	152
10 - Sources, Bibliographie.....	154
10.1 - Sources.....	154
10.1.1 - Personnes mises à contribution pour la mise au point des facteurs d'émission	154
10.1.2 - Ouvrages consultés pour l'élaboration des facteurs d'émission.....	156
10.1.3 - Principaux sites Internet consultés pour la mise au point de la méthodologie	159
10.2 Bibliographie générale.....	160
10.2.1 - Documents édités par le GIEC	160
10.2.2 - Documents édités par le CITEPA	160
10.2.3 - Documents édités par l'ADEME	160
10.2.4 - Documents édités par d'autres organismes français	161
Annexe 1 : Production d'électricité en Europe	162
Annexe 2 - Contenu en équivalent carbone de l'électricité EDF	164
Annexe 3 : Répartition des terres agricoles en France.....	166
Annexe 4 : Contenu en carbone des volailles	167
1 - Dindes industrielles.....	167
2 - Canards & pintades de batterie	167
3 - Volailles fermières	168
Annexe 5 - Répartition des véhicules routiers de transport de marchandises par PTAC ..	169
1 - Camionnettes de PTAC < à 1,5 t.....	170
2 - Camionnettes de PTAC compris entre 1,5 et 2,5 t.....	170
3 - Camionnettes de PTAC compris entre 2,51 et 3,5 t.....	171
4 - Camionnettes de PTAC compris entre 3,51 et 5 t.....	171
5 - Camions de PTAC compris entre 5,1 et 6 t.....	172
6 - Camions de PTAC compris entre 6,1 et 10,9 t.....	172
7 - Camions de PTAC compris entre 11 et 19 t.....	173
8 - Camions de PTAC compris entre 19,1 et 21 t.....	173
9 - Camions de PTAC compris entre 21,1 et 32 t.....	174
10 - Ensembles articulés.....	174

<i>Annexe 6 - Consommations des véhicules de tourisme par puissance administrative.....</i>	<i>175</i>
1 - Catégorie 3 à 5 CV fiscaux, essence.....	175
2 - Catégorie 6 à 10 CV fiscaux, essence.....	176
3 - Catégorie plus de 11 CV fiscaux, essence	177
4 - Catégorie 3 à 5 CV fiscaux, diesel	178
5 - Catégorie 6 à 10 CV fiscaux, diesel	178
6 - Catégorie 11 CV fiscaux et plus, diesel	179
<i>Annexe 7 - Rayon d'action et aménagements intérieurs des avions Airbus</i>	<i>180</i>
1 - Rayons d'action.....	180
1.1 A300 version fret.....	180
1.2 A310.....	180
1.3 A318.....	181
1.4 A319.....	181
1.6 A330-200.....	182
1.7 A330-300.....	183
1.8 A340-200.....	183
1.9 A340-300.....	184
1.10 A340-500.....	184
1.11 A340-600.....	184
2. Cabines.....	186
2.1 A320.....	186
2.2 A330-200.....	186
2.3 A340-200.....	187
2.4 A340-600.....	187
<i>LISTE DES TABLEAUX.....</i>	<i>188</i>
<i>LISTE DES FIGURES.....</i>	<i>193</i>



Bilan Carbone®



Introduction

Le présent document détaille le calcul et/ou les sources retenues pour l'ensemble des facteurs d'émission¹ contenus dans les tableurs associés à la méthode Bilan Carbone.

Il est indissociable de l'ensemble des documents liés à la méthode Bilan Carbone. La séparation en plusieurs documents disjoints répond à un souci pratique, non au fait que ces documents sont autonomes.

¹ Les chiffres qui permettent de convertir les données observables dans l'entité en émissions de gaz à effet de serre, exprimées en équivalent carbone, sont appelés des facteurs d'émission. L'équivalent carbone est la mesure "officielle" des émissions de gaz à effet de serre. Beaucoup d'entreprises, toutefois, utilisent "l'équivalent CO₂", donnant des valeurs 3,67 fois supérieures (dans un rapport de 44/12 pour être exact), facteur qui correspond au rapport (masse moléculaire du CO₂)/(masse atomique du carbone). Le tableur de la méthode "Bilan Carbone®" propose désormais les résultats avec les deux unités, toutefois les facteurs d'émission sont uniquement en équivalent carbone. Attention, toutefois, à ne pas confondre "équivalent CO₂" avec "émissions de CO₂ seul", confusion hélas courante.

1 - Incertitudes par défaut

Comme indiqué dans le document méthodologique de base, chaque facteur d'émission possède une incertitude qui lui est associée. Le présent chapitre donne la valeur de l'incertitude qui s'applique par défaut lorsqu'elle n'est pas précisée de manière explicite dans l'un des chapitres ci-dessous.

1.1 Energie

1.1.1 Combustibles fossiles

Les émissions de gaz à effet de serre liées à la combustion de gaz, de charbon et de pétrole sont bien documentées, car sont objet de nombreux travaux. La source d'incertitude majeure résulte dans la connaissance précise du composé brûlé, surtout pour le charbon, dont la composition est très fortement variable d'une qualité à une autre. Lorsque le composé est bien connu, la variabilité liée aux conditions de combustion est faible.

De ce fait, les facteurs d'émission calculés (dans le document calcul des facteurs d'émissions) ont été affectés d'une incertitude par défaut de :

- 5% pour les produits pétroliers et gaziers,
- 20% pour le charbon et les produits dérivés.

1.1.2 Electricité

Les facteurs d'émission sont aujourd'hui publiés par les électriciens eux-mêmes, avec des incertitudes faibles, car les quantités de combustibles utilisés dans les centrales thermiques à flamme sont très bien connues des exploitants. Il peut cependant y avoir des différences de méthode d'un électricien à l'autre sur la prise en compte des autres contributions. En particulier, pour les modes faiblement émetteurs de gaz à effet de serre (nucléaire et renouvelables), la prise en compte ou pas de la fabrication du dispositif de production change beaucoup les résultats en valeur relative, même s'ils restent faibles en valeur absolue (passer de 10 à 20 rajoute 100% !).

En outre l'incertitude retenue dépend notablement du fait que l'on considère, ou pas, que conventionnellement le kWh a toujours le contenu moyen en gaz à effet de serre. Si tel n'est pas le cas l'incertitude dépend de la manière dont le facteur utilisé "colle" à la réalité que l'on tente de représenter par le calcul.

Par défaut les facteurs d'émission concernant l'électricité seront de 10%.

1.2 Emissions d'autres gaz à effet de serre dans le cadre des émissions non liées à l'énergie

Le facteur d'émission pour un gaz à effet de serre autre que le CO₂ est son PRG (voir § 2.1). Ce dernier est une approximation en soi, estimée valide à $\pm 30\%$ par le GIEC.

De la sorte, pour les gaz autres que le CO₂, le facteur d'émission sera entaché d'une incertitude par défaut de 30%.

1.3 Transports

L'incertitude pour les facteurs d'émission pour les transports est très largement variable d'un domaine à l'autre. Il n'y a donc pas de valeur par défaut et les incertitudes sont toujours précisées avec les facteurs d'émission décrits plus loin.

1.4 Matériaux entrants et Services tertiaires

Matériaux entrants

La valeur par défaut de l'incertitude sur le facteur d'émission d'un matériau, c'est-à-dire la variation autour de la valeur moyenne du "contenu en gaz à effet de serre" d'un matériau primaire, a été prise égale à 20%. Pour les produits alimentaires, cette incertitude a été prise égale à 30% par défaut.

Ici aussi, une détermination de l'incertitude requiert de répondre à la question de savoir quelle est la convention prise : si le facteur doit refléter très exactement les émissions engendrées pour la tonne d'acier que l'on utilise dans l'entreprise audité, il est vraisemblable que l'imprécision sera supérieure à 20%. En cas d'acier fait à l'électricité, par exemple, il sera indispensable de connaître le pays de provenance, auprès de quel fournisseur d'électricité il achète son énergie, etc., et un facteur 2 entre les extrêmes semble un minimum.

Mais si le facteur d'émission reflète conventionnellement les émissions moyennes liées à la production d'une tonne d'acier, tous pays et procédés confondus, alors l'imprécision sur les facteurs d'émission ne reflète que l'imprécision sur les données utilisées pour le calculer (tonnes de charbon consommées dans le monde, par exemple). Dans ce cas, 20% est probablement une valeur pessimiste.

Toute la question, finalement, sera de savoir quelle est l'imprécision entourant les émissions marginales évitées en consommant moins du matériau considéré, or cette imprécision va dépendre, entre autres, de l'ampleur de la réduction marginale effectuée.

Services tertiaires :

Faute d'investigations complémentaires, l'incertitude a été mise de manière conservatoire à 50%, ce qui est peut-être pessimiste, vu que le premier "Bilan Carbone" effectué sur une activité tertiaire² a précisément abouti à une valeur pas très éloignée du coefficient moyen utilisé.

1.5 Déchets et eaux usées

Tout ce qui a trait à la fin de vie des déchets (y compris les eaux usées), a été affecté, à titre conservatoire, d'une incertitude de 50%, reflétant ainsi une connaissance approximative de certains processus, notamment la putréfaction des matières fermentescibles en décharge (concerne les déchets alimentaires, papiers et cartons). Il y a toutefois une exception : l'incinération des produits plastiques, qui est affectée d'un coefficient d'incertitude de 20% seulement, le contenu en carbone fossile des plastiques étant relativement facile à cerner.

1.6 Amortissements

L'intitulé "amortissements" désigne les émissions liées à la fabrication des biens durables possédés par l'entreprise ou l'activité tertiaire (immeubles, machines, etc ; cette dénomination établit un parallèle avec les immobilisations corporelles en comptabilité).

Ici aussi, faute d'investigations complémentaires précises, les incertitudes ont été prises égales à 50% pour les estimations concernant les bâtiments et l'outillage, et même 80% pour les ordinateurs.

Seules des analyses de filière précises permettraient de réduire ces incertitudes de manière significative.

² Il s'agissait de la Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, du Ministère chargé de l'Energie

2 - Facteurs associés à la consommation directe d'énergie

2.1 Nature des émissions

L'utilisation de l'énergie est une source de gaz à effet de serre à cause :

- du gaz carbonique provenant de la combustion des carburants fossiles (pétrole, gaz, charbon), qui, comme leur nom l'indique, sont le résultat de la décomposition très ancienne d'organismes vivants,
- de polluants locaux divers qui sont parfois aussi des gaz à effet de serre ou qui engendrent des gaz à effet de serre (c'est notamment le cas de l'ozone, mais aussi des NO_x, etc).
- du fait que l'électricité est partiellement ou totalement, selon les pays, fabriquée à partir de combustibles fossiles (voir annexes 1 et 2),
- des fuites de gaz survenant pendant l'exploitation des hydrocarbures : le méthane, principal constituant du gaz naturel, est lui-même un gaz à effet de serre 23 fois plus puissant que le gaz carbonique.

Les facteurs d'émission calculés ci-dessous correspondent pour l'essentiel à des émissions de CO₂. Lorsque d'autres gaz sont pris en compte, il s'agira uniquement de méthane et de N₂O, et pour des contributions généralement marginales.

2.2 Combustibles fossiles

Tous les combustibles fossiles comprennent, en quantités variables, du carbone et de l'hydrogène. Leur combustion produit donc toujours du CO₂ et de la vapeur d'eau. A cause de cette dernière, il y a toujours deux manières de mesurer l'énergie disponible par unité de combustible, le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

Le pouvoir calorifique supérieur désigne la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète, à pression constante, d'un mètre cube de gaz mesuré à 0 °C sous 1 013 mbar. Les constituants du mélange combustible sont pris secs et à 0 °C et les produits de la combustion sont ramenés à 0 °C. L'eau résultant de la combustion est supposée ramenée à l'état liquide.

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) répond à la même définition que celle du PCS, mais l'eau de combustion est supposée conservée à l'état de vapeur à 0°C. La différence entre les deux correspond donc à l'énergie libérée ou non par le passage de l'eau de l'état de vapeur à l'état liquide.

Toutefois dans la majorité des chaudières installées, les gaz d'échappement repartent sans que la vapeur d'eau n'ait condensé, car l'exploitation de la condensation (dans des chaudières éponymes) est relativement récente. De la sorte, lorsqu'il n'est pas précisé dans la bibliographie si les valeurs disponibles sont PCS ou PCI, elles sont réputées être des valeurs PCI par défaut. Bien évidemment ce point a été vérifié chaque fois que possible.

Le passage du PCI au PCS (ou inversement) dépend de la proportion d'hydrogène dans le combustible, et n'est donc pas constant pour tous les combustibles.

Combustible liquide ou gazeux	Rapport PCS/PCI	Source
Gaz naturel	1,11	www.thermexcel.com
GPL	1,09	www.thermexcel.com
Essence	1,08	Extrapolation de l'auteur
Diesel, fioul domestique	1,07	www.thermexcel.com
Fioul lourd	1,06	www.thermexcel.com
Charbon	1,05	www.thermexcel.com

Tableau 1 : rapport PCS/PCI pour les combustibles liquides ou gazeux

Il s'avère donc, par exemple, que pour le gaz naturel le facteur d'émission par unité d'énergie augmente de 11% lorsque l'on passe du PCS au PCI (ou inversement le facteur d'émission par kWh PCS est 11% inférieur au facteur par kWh PCI).

Il convient donc de bien faire attention à l'unité de facturation. Par exemple, Gaz de France facturant en kWh PCS, il n'est pas possible de mentionner les kWh figurant sur la facture dans le tableur du Bilan Carbone, où les facteurs d'émission sont prévus pour des kWh PCI. Il faut donc diviser les kWh figurant sur la facture par 1,1 pour obtenir des kWh PCI.

Les facteurs d'émission calculés ci-dessous ont par ailleurs pour objet de convertir des données facilement disponibles dans le site audité (tonnes de charbon, kWh de gaz, litres d'essence, etc) en émissions de gaz à effet de serre. Ils concernent tous les usages de l'énergie fossile : chauffage, alimentation de fours industriels, alimentation de machines fixes ou mobiles, etc. Ils sont également utilisés, dans le cadre du présent document, pour obtenir des facteurs d'émission applicables à d'autres postes (utilisation de moyens de transports, production de matériaux de base...).

Nous proposons deux jeux de facteurs d'émission :

- des valeurs "complètes", intégrant l'essentiel des émissions amont (par exemple : raffinage, transport, ...), encore appelées "du puits au réservoir".
- des valeurs ne tenant compte que de la combustion *in situ* seront éventuellement exploités dans le cadre de certaines extractions³.

Attention : toutes les valeurs ci-dessous sont exprimées en référence au PCI.

³ On appelle extraction la possibilité de réduire le champs d'investigation. Les items pris en compte selon l'extraction sont détaillés dans le guide méthodologique et le manuel d'utilisation.

2.2.1 Combustibles liquides

Les données de base dont nous disposons sont obtenues auprès des organismes qui en ont publié, à savoir le PNUE⁴ et l'ADEME. Il existe parfois de petites différences entre les valeurs retenues par ces différents organismes, mais qui ne sont pas significatives. A partir de ces publications nous avons retenu les valeurs suivantes :

Source d'énergie	kg équivalent carbone par tonne	kg équivalent carbone par kWh	kg équivalent carbone par tep ⁵ (énergie finale)	kg équivalent carbone par litre
Essence	870	0,072	833	0,63
Pétrole	855	0,071	830	0,73
Fioul lourd	850	0,077	890	0,73
Diesel, fioul domestique	850	0,074	856	0,73
GPL	805	0,063	731	0,45
Kérosène	859	0,073	845	0,69

Tableau 2 : facteurs d'émission des combustibles liquides

En effet, ces valeurs ne tiennent compte que de la phase de combustion de l'hydrocarbure, et ne prennent pas en compte les émissions "amont", c'est à dire les émissions de la filière qui a permis leur production à partir des sources primaires. Les émissions non prises en compte dans les valeurs ci-dessus sont associées à l'extraction, au transport, et au raffinage éventuel de ces combustibles.

Nous pouvons aussi utiliser d'autres facteurs d'émission, obtenus en intégrant ces émissions amont. Un document publié par l'IFP en 2001⁶ précise les émissions "du puits au réservoir" de ces combustibles, lorsqu'ils proviennent de brut conventionnel (les données sont en grammes de CO₂ par MJ d'énergie finale, que nous avons converties en kg équivalent carbone par tonne équivalent pétrole³⁴, puis en kg équivalent carbone par tonne :

Emissions liées à l'extraction et au raffinage des carburants à partir de brut conventionnel	Essence ou gazole	GPL
Grammes de CO ₂ par MJ	13	9
kg équ. C/tep	148	103
kg équ. C/tonne	155	113

Tableau 3 : facteurs d'émission de l'ensemble extraction + raffinage des carburants à partir de brut conventionnel (IFP 2001)

Faute de précisions, nous avons ramené ce supplément au facteur d'émission par unité PCI.

⁴ Creating a Standard for a Corporate CO₂ Indicator, PNUE, 1998, téléchargeable sur <http://www.ghgprotocol.org/prot/UNEP+CO2Indicator3.doc>

⁵ tep signifie tonne équivalent pétrole. Il s'agit d'une unité d'énergie courante chez les pétroliers et énergéticiens et qui vaut conventionnellement 11 600 kWh, ou encore 42 GJ (42 milliards de joules).

⁶ Evaluation des émissions de CO₂ des filières énergétiques conventionnelles et non conventionnelles de production de carburants à partir de ressources fossiles, IFP rapport 55 949, avril 2001, page 44

Dans le cas présent, les émissions d'extraction, de transport et de raffinage représentent plus de 15% de l'énergie finale (c'est-à-dire celle disponible dans le réservoir) dans le cas du gazole ou de l'essence, et 13% dans le cas du GPL. Incidemment, il importe de signaler que ce GPL est pour le moment ce que les pétroliers appellent un "produit fatal", à savoir un sous-produit inévitable du raffinage, obtenu en petites quantités. Si des raffineries supplémentaires devaient être construites spécifiquement pour obtenir du GPL, son bilan amont serait alors bien moins bon.

Une publication de la DGEMP, portant sur les émissions liées au raffinage, conclut quant à elle aux chiffres suivants

Produits raffinés	Contenu intrinsèque (source CITEPA) en kg équ. C par tonne	Contenu lié aux consommations d'énergie du raffinage (résultat de l'étude) en kg équ. C par tonne	Contenu total en kg équ. C par tonne
GPL	803	90	893
Essence	876	88	964
Kérosène	888	18	906
FOL (fioul lourd)	851	56	907
FOD/Gazole	859	31	890

Tableau 4 : facteurs d'émission liés aux consommations d'énergie du raffinage (DGEMP – 2002)

Comme nous ne disposons que d'informations partielles pour obtenir un bilan "du puits au réservoir" pour tous les types de carburants, la méthode proposée pour y parvenir est la suivante :

- pour l'essence, nous disposons des émissions amont complètes, du puits au réservoir (IFP), qui se montent à 155 kg équivalent carbone par tonne, et des émissions du raffinage stricto sensu, soit 88 kg équivalent carbone par tonne. Il en découle que les émissions "du puits à la raffinerie" sont alors de 67 kg équivalent carbone par tonne d'essence.
- les chiffres relatifs au GPL ne peuvent être rapprochés entre l'IFP et le CEREN, qui ont pris des méthodes différentes pour l'imputation des émissions de raffinage. Toutefois il s'agit d'une fraction minime des produits en sortie de raffinerie,
- enfin nous disposons des émissions "du puits à la raffinerie" pour le pétrole dans son ensemble⁷, qui sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Emissions d'extraction et de transport du pétrole	
Extraction (g CO ₂ /MJ)	2,82
transport (g CO ₂ /MJ)	2,40
total (g CO ₂ /MJ)	5,22
total (kg équ. C/tep)	59,6
total (kg équ. C/tonne)	61,4

Tableau 5 : facteurs d'émission de l'extraction et du transport du pétrole

⁷ Evaluation des émissions de CO₂ des filières énergétiques conventionnelles et non conventionnelles de production de carburants à partir de ressources fossiles, IFP rapport 55 949, avril 2001, page 68

- la valeur de 61,4 kg équivalent carbone par tonne est assez proche de ce que donne la soustraction du "total" de 148 kg équivalent carbone par tonne pour l'ensemble de l'amont (IFP) moins les 88 kg équivalent carbone par tonne du seul raffinage (DGEMP/CEREN), soit 60 kg équivalent carbone par tonne.

- nous retiendrons donc cette valeur de 61 kg équivalent carbone par tonne pour la partie extraction + transport des carburants liquides issus du pétrole, quels que soient ces derniers. En effet, les dépenses liées à l'extraction peuvent être considérées comme identiques pour tous les carburants, dans la mesure où des derniers sont indissociables, tant pour l'extraction que pour le transport, tant qu'ils ne sont pas séparés par le raffinage, et la dépense énergétique dans les deux cas est proportionnelle au poids, en première approximation.

Cette approche permet de retenir finalement les valeurs suivantes récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Carburant	Emissions de combustion, en kg équ. C par tonne (source CITEPA)	Emissions liées au raffinage en kg équ. C par tonne (CEREN)	Emissions liées à l'extraction et transport amont, en kg équ. C par tonne (IFP)	Emissions totales liées à l'emploi d'une tonne PCI, en kg équ. C	Supplément par rapport aux seules émissions de combustion
GPL	803	90	61	954	19%
Essence	876	88	61	1025	18%
Kérosène	888	18	61	967	9%
FOL (fioul lourd)	851	56	61	968	14%
FOD/Gazole	859	31	61	951	12%

Tableau 6 : calcul des facteurs d'émission (amont + combustion) en kg / tonne PCI à partir de la décomposition des facteurs d'émission amont et de la combustion en fonction de différents carburants.

En convertissant ces nouvelles valeurs par tonne pour d'autres unités (tep, kWh, litre), et en prenant comme valeur de référence pour la seule combustion les chiffres du CITEPA, nous obtenons finalement les valeurs suivantes pour les émissions "tout compris", c'est-à-dire en intégrant les émissions amont :

Source d'énergie	Kg équivalent carbone par tonne	Kg équivalent carbone par kWh	Kg équivalent carbone par tep	kg équivalent carbone par litre
Essence	1025	0,085	981	0,739
Pétrole	916	0,076	889	0,779
Fioul lourd	968	0,088	1013	0,828
Diesel, fioul domestique	951	0,082	958	0,814
GPL	954	0,074	867	0,539
Kérosène	967	0,082	952	0,778

Tableau 7 : conversion des facteurs d'émission globaux (amont + combustion) en fonction de différents carburants

Nous constatons ainsi qu'en intégrant les émissions amont, diesel, essence et kérosène sont comparables en termes d'émission par unité d'énergie finale, et que le GPL n'est "que" 10% plus propre que l'essence question émissions de CO₂ par unité d'énergie.

Le tableur possède une séparation entre ce qui relève des émissions de combustion sur place, et ce qui relève des émissions amont.

Enfin en ce qui concerne les facteurs d'émission ainsi calculés, les procédés étant relativement standard, les énergies de combustion étant bien connues, et les dépenses intermédiaires connues en moyenne mondiale, nous avons affecté à ce poste une imprécision de 5% seulement.

2.2.2 Gaz naturel

L'étude précitée du PNUE⁸ fournit les valeurs suivantes pour les émissions de combustion du gaz naturel :

Combustible	kg équ. C par tonne	kg équ. C par kWh	kg équ. C par tep
Gaz naturel	799	0,056	651

Tableau 8 : facteurs d'émission de la combustion du gaz naturel (PNUE – 1998)

Mais tout comme pour les carburants liquides, il est possible d'obtenir une estimation des émissions liées aux processus amont que sont l'extraction, le transport et le stockage. Le document de l'IFP précité⁹ propose le résultat des calculs concernant les émissions liées aux différentes étapes de l'exploitation du gaz naturel :

Etape	g CO ₂ /MJ d'énergie finale
Extraction	1,9
Traitement	1,6
Transport	2,2
Total	5,7

Tableau 9 : facteurs d'émission des processus amont du gaz naturel (IFP-2001)

5,7 g équivalent CO₂ par MJ se convertissent en 65 kg équivalent carbone par tep, soit 10% des émissions liées à la seule combustion (qui sont de 651 kg équivalent carbone par tep).

Par ailleurs ce même document indique (page 70) que les pertes du réseau de transport et de distribution s'élèvent, en Europe, à 0,35% du gaz commercialisé. La Russie fait pour sa part l'objet de pertes supposées bien plus élevées (supérieures à 1%), mais faute de savoir quelles parts respectives sont imputables à la distribution capillaire et au transport, il ne sera pas possible de retenir les pertes liées au seul transport du gaz en Russie pour la part de notre consommation importée de ce pays. Rappelons que 1% de fuites (soit 10 kg de gaz par tonne) ajoutent l'équivalent de 10% aux émissions de combustion du gaz, le méthane étant un puissant gaz à effet de serre.

⁸ Creating a Standard for a Corporate CO₂ Indicator, PNUE, 1998.

⁹ Evaluation des émissions de CO₂ des filières énergétiques conventionnelles et non conventionnelles de production de carburants à partir de ressources fossiles, IFP rapport 55 949, avril 2001, page 70.

En retenant le chiffre de 0,35% de fuites, cela équivaut à rajouter 2,2% d'émissions supplémentaires en équivalent CO₂¹⁰, de telle sorte que le pourcentage qu'il convient de rajouter aux émissions de combustion est de 13,6%.

Nous aboutissons alors au tableau suivant pour les émissions "tout compris" :

	kg équivalent carbone par tonne	kg équivalent carbone par kWh	kg équivalent carbone par tep
Gaz	908	0,064	739

Tableau 10 : calcul du facteur d'émission global (amont + combustion) du gaz naturel

2.2.3 Combustibles solides

A partir des valeurs proposées par le PNUE¹¹, nous avons retenu les valeurs suivantes pour les émissions de combustion des principaux charbons employés par l'industrie :

Combustible	kg équ. C par tonne	kg équ. C par kWh	kg équ. C par tep
Charbon	660	0,097	1123
Coke de lignite	710	0,106	1233

Tableau 11 : facteurs d'émission de la combustion de combustibles solides

Le document de l'IFP précité¹² comporte également une étude sur les émissions liées à l'extraction et au transport du charbon pour la France, sachant que l'essentiel nous parvient sous forme maritime :

Etape	g CO ₂ /MJ d'énergie finale
Energie d'extraction	1,1
Fuites de CH ₄ (équ. CO ₂)	4,3
Transport	2,2
Total	7,6

Tableau 12 : facteurs d'émission amont de combustibles solides

7,6 grammes équivalent CO₂ par MJ d'énergie finale, cela représente 86,3 kg équ. C par tep, soit 7,7% de l'énergie finale. Compte tenu de la faiblesse de la part liée au seul transport, ce facteur ne changera pas du tout au tout si nous considérons un site situé dans un pays possédant sa propre industrie charbonnière, sans transport longue distance associé. En fait la qualité du charbon influe de manière bien plus importante sur les émissions par tep.

¹⁰ soit $0,35 \times (12/44) \times 23$

¹¹ Creating a Standard for a Corporate CO₂ Indicator, PNUE, 1998.

¹² Evaluation des émissions de CO₂ des filières énergétiques conventionnelles et non conventionnelles de production de carburants à partir de ressources fossiles, IFP rapport 55 949, avril 2001, page 71

Faute de disposer de données particulières pour la lignite, nous appliquerons le même pourcentage supplémentaire de 8% (environ) des émissions de combustion pour tenir compte des processus amont.

Source d'énergie	kg équivalent carbone par tonne	kg équivalent carbone par kWh	kg équivalent carbone par tep
Charbon	710	0,105	1.209
Coke de lignite	764	0,115	1.327

Tableau 13 : facteurs d'émission globaux (amonts + combustion) de combustibles solides

La dispersion autour des moyennes pour le charbon étant plus importante que pour les combustibles liquides raffinés, nous retiendrons une incertitude de 20% pour ce facteur standard. Bien entendu, un utilisateur de la méthode peut toujours rajouter une ligne avec le facteur d'émission "collant" au mieux à son cas.

2.2.4 Plastiques utilisés comme combustibles

Il peut survenir que du plastique soit utilisé comme combustible, notamment dans des installations de chauffage utilisant des ordures ménagères. On se reportera au chapitre 7.2.2 pour les valeurs utilisées, sachant que nous ferons abstraction du transport amont (4 kg équivalent carbone par tonne) pour la valeur "sans émissions amont".

Dans la mesure où la combustion de plastiques est une valorisation de déchets, les émissions de fabrication ne sont pas imputées à l'utilisateur qui effectue son Bilan Carbone.

2.2.5 Cas du bois

Le bois n'est bien entendu pas un combustible fossile. Cela étant, sa combustion conduit incontestablement à des émissions de gaz à effet de serre, puisque du CO₂ est émis lorsque l'on en brûle.

Cependant, si le bois provient de forêts européennes, dont la surface est constante ou en progression, cela signifie que, dans le même temps qu'une petite partie du bois sur pieds est coupé, le reste des arbres est en croissance et contribue donc à absorber du CO₂ atmosphérique. Si la superficie forestière est au moins constante, cela signifie que cette absorption est égale à celle du bois coupé. Comme il est nécessaire que du bois soit périodiquement coupé pour que la forêt ne parvienne pas à un état climacique où elle n'absorbe pas plus qu'elle ne rejette (si le bois n'est pas coupé il meurt et se décompose, et cette décomposition compense la photosynthèse), nous pouvons considérer, en première approximation, que le bilan global du bois de chauffe provenant de forêts européennes est nul, aux émissions de traitement près (bûcheronnage, débardage, transport), qui n'ont pas pu être estimées par l'auteur.

Notons que tous les inventaires d'émission n'adoptent pas forcément cette convention d'un facteur d'émission nul pour la combustion de biomasse hors déforestation. Ainsi, le CITEPA, pour l'inventaire national des émissions françaises, comptabilise séparément la combustion de biomasse et le puits forestier, ce qui explique les émissions relativement importantes de l'agriculture, qui sont bien supérieures à ce qui provient uniquement de l'usage de l'énergie (ces émissions proviennent notamment de l'élimination par le feu des vieux fruitiers, des sarments de vigne après la taille, et de divers autres déchets organiques).

2.3 Electricité

2.3.1 Quelques considérations préliminaires

Que ce soit dans une centrale à charbon, nucléaire, avec une éolienne ou un barrage, l'électricité est toujours produite à partir d'énergie dite "primaire" (pétrole, gaz, nucléaire, solaire...). Pour calculer le "contenu en équivalent carbone" d'un kWh électrique fourni à l'utilisateur, il serait nécessaire, dans l'idéal, de tenir compte :

- de l'énergie primaire utilisée pour faire un kWh en sortie de centrale,
- des émissions amont liées à la mise à disposition de cette énergie primaire à la centrale électrique,
- des émissions qui ont été engendrées par la construction de l'installation de production (qu'il s'agisse d'une centrale produisant en masse ou d'un panneau solaire),
- des pertes en ligne si l'énergie électrique n'est pas produite sur place, car cette énergie perdue a bien entendu conduit à des émissions.

L'électricité est produite avec des énergies primaires qui sont très variables d'un pays d'Europe à un autre (voir annexe 1). Il en résulte que le "contenu moyen en gaz à effet de serre" d'un kWh en sortie de centrale est très variable d'un pays à l'autre.

Mais il peut aussi y avoir plusieurs producteurs d'électricité dans un même pays, utilisant des sources d'énergie primaire très différentes, et donc proposant de l'électricité avec un "contenu en gaz à effet de serre" très variable pour un même pays. En Grande Bretagne, par exemple, selon le producteur considéré, le kWh en sortie de centrale aura engendré des émissions quasi-nulles (British Energy, qui n'a que des centrales nucléaires) ou parmi les plus élevées d'Europe (Innogy, qui possède essentiellement des centrales à charbon).

Comme les différents producteurs nationaux sont souvent tous connectés à un même réseau, il n'est pas toujours facile de savoir à qui exactement attribuer le kWh que l'on vient de consommer. En France, il n'y a qu'un producteur significatif, mais dans d'autres pays il peut y en avoir plusieurs, et si certains clients savent explicitement à qui ils achètent l'électricité, il n'en est pas de même pour les clients dits "non éligibles" (dont les particuliers) qui consomment de l'électricité "de réseau", comprenant des apports, dans des proportions qui peuvent varier au cours du temps, des différents producteurs nationaux ou même étrangers.

Enfin les centrales en fonctionnement ne sont pas les mêmes en fonction de la période de l'année, ni même de l'heure de la journée. Par exemple, en France, les centrales nucléaires ne s'arrêtent pas facilement en quelques minutes, alors que les barrages et les centrales à charbon ou à gaz sont beaucoup plus faciles à arrêter ou à démarrer rapidement.

Cela étant, comme ce sont ces dernières (les centrales à charbon, à fioul lourd ou à gaz) qui conduisent à des émissions de gaz carbonique, on comprendra facilement qu'en fonction de leur mise en route ou pas le "contenu moyen en gaz carbonique" du kWh qui circule sur le réseau électrique changera de manière significative.

La méthode tente de proposer des facteurs d'émission adaptés aux cas les plus courants :

- électricité de réseau sans producteur désigné pour la majeure partie des pays d'Europe,
- électricité explicitement achetée à EDF pour les clients éligibles, avec ou sans prise en compte du mois d'achat,
- électricité explicitement achetée à un autre producteur européen pour les clients éligibles, mais avec une moyenne annuelle seulement.

Notons que pour le moment, les facteurs d'émission proposés ci-dessous **ne tiennent pas compte des pertes en ligne**¹³, ni de l'amortissement des installations pour les producteurs européens pour les clients éligibles.

2.3.2 Cas de l'électricité de réseau

L'électricité "de réseau" est celle qui est consommée par un client situé dans un pays et qui se branche sur une prise électrique sans avoir passé un contrat avec un producteur nommé désigné, contrat par lequel le client décide de ne consommer que l'électricité fournie par le producteur en question¹⁴.

Tous les particuliers, et tous les clients dits "non éligibles", consomment de l'électricité de réseau. Le facteur d'émission pour un kWh d'électricité de réseau reflète les énergies primaires utilisées pour alimenter le réseau en question, c'est-à-dire, pour l'essentiel, l'énergie primaire consommée par les producteurs nationaux, déduction faite du solde des échanges.

En France, le facteur d'émission correspondant à un kWh produit était de 23 grammes équivalent carbone par kWh en analyse de cycle de vie¹⁵. Des valeurs plus récentes ont été publiées pour les émissions liées à la seule consommation d'énergie primaire, mais comme une large part du parc est nucléaire et hydraulique, donc sans aucune émission liée à l'énergie primaire, les chiffres obtenus sont bien plus faibles. Nous considérons que le chiffre de 23 grammes équivalent carbone par kWh reflète mieux la réalité (hors pertes en ligne) et nous le conserverons donc jusqu'à réalisation d'une nouvelle analyse de cycle de vie plus récente.

¹³ qui, de la centrale au client final basse tension, sont de l'ordre de 10%

¹⁴ Il est évident qu'un tel contrat ne reflète pas la réalité physique : il ne fait que matérialiser une consommation et une production simultanée et de même valeur en deux endroits du réseau, mais rien ne dit que l'électron injecté par le producteur finira dans les installations du consommateur !

¹⁵ source EDF

Pour l'étranger, les valeurs ont été fournies par EDF, elle-même faisant référence à l'Agence Internationale de l'Energie (année de référence : 1997). Notons que ces valeurs sont parfaitement cohérentes, même si elles diffèrent légèrement (ce qui n'est pas choquant compte tenu des éléments exposés ci-dessus), avec les valeurs exposées par le PNUE¹⁶.

Pays	Kg équivalent carbone par kWh, en 1997
Electricité en France	0,023
Electricité en Allemagne	0,164
Electricité en Autriche	0,068
Electricité en Belgique	0,091
Electricité au Danemark	0,240
Electricité en Espagne	0,111
Electricité en Finlande	0,109
Electricité en Grèce	0,236
Electricité en Irlande	0,214
Electricité en Italie	0,182
Electricité au Luxembourg	0,161
Electricité aux Pays-Bas	0,178
Electricité au Portugal	0,143
Electricité au Royaume-Uni	0,158
Electricité en Suède	0,024
Electricité, moyenne européenne	0,096
Electricité aux USA	0,167
Electricité au Japon	0,132

Tableau 14 : facteurs d'émission de la production d'électricité par pays en 1997 (PNUE – 1997)

Enfin autant les facteurs d'émission pour un producteur donné sont susceptibles de varier rapidement, s'il achète ou vend des centrales, autant l'électricité de réseau, reflétant le parc de centrales installées sur le territoire national, a un facteur d'émission variant plus lentement, car la composition de ce parc ne change pas du tout au tout d'une année sur l'autre. Les valeurs ci-dessus sont encore assez proches des valeurs pour 2003.

Par contre, ce qui peut assez rapidement changer d'une année sur l'autre est l'appel aux centrales fournissant l'électricité de pointe, qui sont, pour une large partie des pays d'Europe, des centrales thermiques à flamme, c'est-à-dire utilisant comme énergie primaire du charbon, du gaz ou du pétrole (mais il y a aussi des barrages), alors que les centrales nucléaires, qui fournissent 30% du courant européen environ, fonctionnent quasiment en permanence, pour fournir l'électricité dite "de base".

Compte tenu des variations au fil des constructions de centrales (rythme lent) ou de la mise en route ou pas des centrales fournissant l'électricité de pointe (fortes variations d'une année sur l'autre), et de l'antériorité des chiffres repris ci-dessus, l'incertitude attachée à ces facteurs d'émission sera prise égale à 15%.

¹⁶ Creating a Standard for a Corporate CO₂ Indicator, PNUE, 1998

2.3.3 Facteurs d'émission par producteur pour les électriciens européens

Le cabinet PriceWaterhouseCoopers a publié en 2004 une étude¹⁷ sur le "contenu en CO₂" des kWh fournis par les principaux électriciens européens pour l'année 2001. Les chiffres portent uniquement sur les émissions liées à la combustion dans les centrales ; il ne s'agit donc pas d'une approche de type "analyse de cycle de vie" (voir annexe 2).

Nom du producteur	g CO ₂ /kWh
Allemagne, EnBW	276
Allemagne, Eon	358
Allemagne, RWE	803
Autriche, Verbund	160
Belgique, Electrabel	320
Danemark, Elkraft System	765
Danemark, Elsam	450
Espagne, Endesa	470
Espagne, Hidrocantabrio	795
Espagne, Iberdrola	138
Espagne, Union Fenosa	579
Finlande, Fortum	226
Finlande, PVO	389
France, EDF France	45
France, SNET	1 024
GB, British Energy	100
GB, Drax	833
GB, EDF Energy	776
GB, Eon UK	687
GB, RWE UK	726
GB, Scottish & Southern	698
Grèce, DEI	1 004
Italie, Endesa Italia	610
Italie, Edison	587
Italie, ENEL	518
Norvège, Statkraft	0
Pays-Bas, Essent	547
Portugal, EDP	393
République Tchèque, CEZ	557
Suède/All, Wattenfall	428

Tableau 15 : facteurs d'émission CO₂/kWh par fournisseur d'électricité européens en 2003

Ne prendre en compte que les émissions liées à la combustion dans les centrales conduit à deux sous-estimations :

- d'une part les émissions amont ne sont pas prises en compte dans le cas du gaz et du charbon, minorant ainsi les valeurs obtenues de 7 ou 8% environ,
- d'autre part la construction des installations de production n'est pas prise en compte, minorant les émissions de 2 à 6 grammes équivalent carbone lorsque l'énergie primaire est "sans carbone". Rappelons que l'hydroélectricité et le nucléaire représentaient respectivement 18% et 32% de la production électrique en Europe en 2001¹⁸.

Comme pour le cas d'EDF, ces facteurs d'émission ne sont à utiliser que lorsque le producteur est nommément désigné dans un contrat pour un client "éligible". Ces chiffres ne concernent donc pas l'électricité de réseau par pays.

Nous les avons affecté d'une imprécision de 15%, avec la même réserve que celle mentionnée au § 5.3.2.

¹⁷ European carbon factors, , PriceWaterHouseCoopers & Enerpresse, 2004

¹⁸ l'éolien représente moins de 0,1% de la fourniture électrique européenne en 2001

Notons que dans le cadre de la directive européenne CO₂, l'obligation faite aux producteurs d'électricité de déclarer leurs émissions favorisera grandement l'obtention d'informations actualisées en ce qui concerne le facteur d'émission par kWh pour tous les producteurs.

2.3.4 Saisonnalité de l'électricité EDF (producteur)

Depuis le début de l'année 2002, EDF a décidé de rendre publique, en quasi-temps réel, la moyenne mensuelle de ses émissions de gaz à effet de serre par kWh, disponible en ligne sur son site¹⁹. Cela permet de proposer une estimation plus fine des émissions liées à la consommation d'électricité pour les clients éligibles, lorsque le producteur est EDF, et qu'il est possible d'accéder à des chiffres mensualisés pour la consommation d'électricité.

Nous disposons par exemple d'une série complète de facteurs d'émission pour l'année 2002 (calculés en analyse de cycle de vie) qui est reproduite ci-dessous.

mois	g équ. CO ₂ /kWh	g équ. C/kWh
janvier 2002	81	22
février 2002	68	19
mars 2002	54	15
avril 2002	57	16
mai 2002	45	12
juin 2002	43	12
juillet 2002	46	13
août 2002	33	9
septembre 2002	55	15
octobre 2002	61	17
novembre 2002	36	10
décembre 2002	47	13
Moyenne annuelle	53	14

Tableau 16 : facteurs émission mensuels d'EDF en 2002

Ces facteurs d'émission sont reportés dans le tableur de la méthode, et peuvent ainsi être utilisés pour les clients éligibles ayant explicitement contracté avec EDF comme producteur. Les émissions d'EDF étant bien connues, nous déciderons que l'incertitude sur les chiffres du tableau 16 est inférieure à 5%.

Il importe cependant de signaler qu'en France EDF est à la fois producteur - assurant environ 95% de la production nationale - et distributeur de courant. C'est au titre de cette deuxième activité que chaque particulier traite avec EDF, mais en pareil cas ce que nous consommons est de l'électricité dite "de réseau", certes vendue par EDF, mais associant la production

¹⁹ www.edf.fr/

propre d'EDF avec une partie de la production des autres producteurs nationaux (SNET, compagnie du Rhône, etc) qu'EDF leur achète.

Il n'est donc pas possible, pour un particulier, ou plus généralement pour un client qui n'a pas explicitement signé un contrat avec EDF comme producteur (c'est-à-dire un contrat stipulant que tout le courant provient de centrales appartenant à EDF), de reprendre les facteurs d'émission concernant uniquement EDF pour l'électricité de réseau.

2.3.5 facteurs différenciés selon les usages pour l'électricité de réseau française

La production électrique, en France, fait appel à des moyens extrêmement disparates en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre rapportées au kWh électrique produit :

Energie primaire utilisée	g équ. C/kWh
Gaz	100 à 130
Fioul	160 à 200
Charbon	200 à 280
Hydraulique	1
Nucléaire	2
Eolien ²⁰	2 à 10

Tableau 17 : facteurs d'émission des différents modes de production d'électricité du mix Français

Ces divers moyens ne sont toutefois pas appelés de la même manière :

- le nucléaire fonctionne en permanence, mais sa production est néanmoins un peu modulée en fonction de l'époque de l'année ou de l'heure de la journée,
- les autres moyens (hydraulique, thermique à flamme) sont appelés essentiellement pour faire face aux besoins de pointe (une consommation de pointe est une consommation qui se "concentre" dans un petit espace de temps, typiquement l'éclairage résidentiel le matin et le soir en hiver).

De la sorte, selon la courbe de charge, le "contenu en gaz à effet de serre" du kWh varie significativement. Il est alors tentant d'essayer d'affecter aux usages qui sont à l'origine de cette consommation de pointe, s'il est possible de les caractériser sans ambiguïté, la mise en route des moyens de production appelés pour la pointe, car ils sont, en France, beaucoup plus intensifs en émissions (ce n'est pas vrai dans tous les pays : en Suisse, par exemple, les moyens de pointe sont hydraulique, et leur appel n'engendre aucun supplément d'émissions).

Bien entendu, le corollaire de cette approche est que les consommations constantes tout au long de l'année se voient alors affecté uniquement de l'électricité nucléaire ou hydraulique de fleuve, à "contenu en gaz à effet de serre" inférieur à la moyenne.

²⁰ L'électricité d'origine éolienne a représenté, en 2000, 0,06% de l'ensemble de la production électrique. Elle n'intervient donc pas de manière significative dans le calcul du facteur d'émission, même marginal.

Des travaux de cette nature, menés à l'ADEME²¹, aboutissent aux facteurs d'émission suivants :

Usage	Grammes de CO2/kWh	Grammes equ. CO2/kWh
Usages résidentiels, moyenne	99	27
Chauffage	180	49
ECS	40	11
éclairage résidentiel	116	32
froid	40	11
cuisson	82	22
lavage	79	22
bruns	62	17
autres usages résidentiel	39	11
Usages tertiaires, moyenne	84	23
chauffage	180	49
éclairage tertiaire	80	22
climatisation tertiaire	37	10
autres usages tertiaire	52	14
éclairage public et éclairage industriel	109	30
industrie	55	15
agriculture transport	38	10
Autres usages	35	9

Tableau 18 : facteurs d'émission électriques français en fonction des usages

Ces facteurs d'émission par usage pour l'électricité de réseau française sont notamment utilisés pour la version collectivités locales, .

2.3.6 Consommations standard des principaux équipements électriques résidentiels

Pour estimer la consommation électrique liée à l'existence d'un parc d'appareils électroménagers, il peut être utile de disposer des consommations moyennes mesurées des appareils les plus répandus.

Les valeurs proposées sont alors les suivantes²² :

²¹ Note de Cadrage sur le contenu du kWh par usage en France, Ademe, janvier 2005

²² Ces valeurs sont dérivées des 3 publications d'Olivier Sidler/Enertech mentionnées dans la bibliographie

Appareil	Consommation annuelle moyenne (kWh)
Réfrigérateur	365
Réfrigérateur-congélateur	600
Congélateur	615
Congélateur américain	1 640
Lave-linge	250
Lave-vaisselle	285
Sèche-linge	430
TV	160
Magnétoscope	122
Décodeur Canal+	96
Démodulateur d'antenne parabolique	80
HiFi	35
Répondeur téléphonique	25
Téléphone répondeur	45
Téléphone sans fil	23
Aspirateur	18
Eclairage	465
Lampe halogène	292
Fer à repasser	40
Chaudière murale mal asservie	400
Aquarium à poissons exotiques	800
Pompe de piscine	1 500
Ventilation mécanique contrôlée individuelle	311
Totalité des consommations électriques en cuisine	568
Four de cuisine	224
Cuisinière	457
Plaques fonte	198
Plaques vitro	281
Table à induction	337
Plaques de cuisson (tous types confondus)	273
Micro-ondes	60
Mini-four	99
Cafetière	31
Bouilloire	58
Friteuse	11
Grille-pain	14
Cuiseur à vapeur	15

Tableau 19 : consommation standard des différents équipements électriques résidentiels

Ces diverses consommations pourront bien sûr être associées à des "contenus en carbone" différents selon les usages (par exemple éclairage et froid), pour aboutir à des "émissions standard" par appareil et par an.

Par ailleurs, pour en déduire des émissions sur un parc de logements, il faut pouvoir associer à chaque appareil un taux d'équipement moyen ainsi qu'un facteur d'émission pour la "qualité" d'électricité consommée (voir § 2.3.5 ci-dessus).

Les taux d'équipement retenus par défaut correspondent aux moyennes nationales, et les équivalents carbone par kWh retenus sont issus des travaux mentionnés au § 2.3.5 ci-dessus. L'ensemble est rassemblés dans le tableau suivant :

Appareil	Taux d'équipement par défaut en 2001	Kg équ. C par kWh par défaut
----------	--------------------------------------	------------------------------

Réfrigérateur seul	49%	0,008
Réfrigérateur-congelateur	56%	0,008
Congélateur	47%	0,008
Congélateur américain	5%	0,008
Lave-linge	90%	0,039
Lave-vaisselle	39%	0,039
Sèche-linge	30%	0,039
TV ²³	137%	0,039
Magnétoscope ²⁴	50%	0,039
Décodeur Canal+ ²⁵	20%	0,039
Démodulateur d'antenne parabolique	20%	0,039
HiFi	50%	0,039
Répondeur téléphonique ²⁶	10%	0,039
Téléphone répondeur	80%	0,039
Aspirateur	90%	0,039
Eclairage	100%	0,079
Fer à repasser	80%	0,039
Pompe de piscine	0%	0,039
Totalité des consommations électriques en cuisine	100%	0,039

Tableau 20 : facteurs d'émission des différents équipements électriques résidentiels

2.3.7 Consommations spécifiques d'électricité pour le tertiaire

Des données publiées par l'Observatoire de l'Energie donnent la consommation d'électricité tous usages confondus pour les surfaces tertiaires qui sont chauffées à l'électricité, ainsi qu'il suit :

Nature d'activité	Electricité tous usages confondus (kWh/m ² de local)
Commerces	451
Bureaux	532
Enseignement	341
Santé - action sociale	600
Autres branches	458

Tableau 21 : consommations électriques totales pour des activités chauffées à l'électricité.

Par ailleurs les données exposées au § 2.5.2 permettent de conclure que le chauffage électrique des logements consomme de l'ordre de 70 kWh par m² et par an. En supposant que, dans le tertiaire, nous pouvons retenir une valeur un peu supérieure de 100 kWh/m².an pour le seul chauffage, nous avons alors, par différence, ce qui relève de l'électricité spécifique :

Nature d'activité	Consommation d'électricité
-------------------	----------------------------

²³ ce pourcentage supérieur à 100% reflète un taux de multiéquipement de 37%

²⁴ Source INSEE, ainsi que pour les chaînes Hifi

²⁵ sur la base d'un parc de 5 millions d'abonnés pour environ 25 millions de foyers en France, et le taux d'équipement pour les antennes paraboliques est supposé être du même ordre

²⁶ estimation personnelle de l'auteur, ainsi que le taux d'équipement des téléphones répondeur, aspirateurs, fers à repasser

	spécifique(kWh/m ² de local)
Commerces	351
Bureaux	432
Enseignement	241
Santé - action sociale	500
Autres branches	358

Tableau 22 : consommation d'électricité spécifique par nature d'activité

2.3.8 Pertes en ligne de l'électricité

Le transport²⁷ et la distribution²⁸ de l'électricité, depuis la centrale électrique jusqu'au consommateur, occasionnent des pertes par effet Joule. Pour un consommateur de courant basse tension (220 volts) ces pertes représentent, en moyenne, 10% de l'électricité finale consommée. En d'autres termes, quand le consommateur soutire 1 kWh du réseau, l'appareil de production a dû injecter 1,1 kWh.

Or le facteur d'émission fourni par le producteur concerne généralement le "contenu en gaz à effet de serre" en sortie de centrale électrique. Si ce facteur d'émission est directement appliqué à la consommation relevée chez le consommateur, les pertes ne sont pas couvertes, alors que pourtant l'électricité dissipée dans le réseau a bien dû être produite.

Il convient donc de rajouter 10% aux émissions calculées à partir de la consommation finale et des facteurs d'émission en sortie de centrale pour aboutir à une bonne estimation des émissions réelles.

Toutefois ce pourcentage de pertes sera inférieur si l'électricité est fournie au consommateur en moyenne ou en haute tension, car l'essentiel des pertes a lieu dans la partie "basse tension" de l'acheminement du courant. Il faudra donc faire attention, pour les clients industriels très gros consommateurs d'électricité, à prendre un coefficient de pertes plus adapté s'ils sont livrés en moyenne tension (un taux de 3% semble alors une estimation raisonnable).

2.4 Achats de vapeur

2.4.1 Généralités

²⁷ Le transport désigne classiquement le cheminement du courant électrique sur les réseaux à très haute, haute haute et moyenne tension (au-dessus de 20 kV, environ).

²⁸ La distribution de l'électricité désigne la partie "basse tension" de l'acheminement du courant électrique (l'essentiel des pertes ont lieu dans le réseau de distribution).

Lorsqu'une entreprise achète de la vapeur, la production de cette vapeur a nécessité l'utilisation de combustibles divers par le fournisseur. La présente méthode ne propose pas de facteur d'émission par défaut pour cette vapeur, dans la mesure où tout dépend du ou des combustible(s) utilisé(s) par le producteur. Souvent l'alimentation de l'installation productrice de vapeur est multi-énergies : charbon, fioul lourd, gaz, et ordures ménagères y contribuent dans des proportions variables.

Notons qu'à partir de 2005 les possesseurs d'installation de chauffage urbain - qui brûlent toujours pour partie du charbon, du fioul et du gaz - devront déclarer leurs émissions dans le cadre de la directive européenne CO₂, ce qui permettra de disposer de facteurs d'émission appropriés pour la majorité d'entre eux.

A titre conservatoire, nous proposons ci-dessous un facteur d'émission pour la vapeur fournie par la CPCU (Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain) pour l'année 2001, qui donne une valeur indicative.

2.4.2 CPCU

L'un des modes de chauffage des locaux parisiens est la vapeur fournie par la Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain (CPCU). Pour obtenir cette vapeur, la CPCU brûle des combustibles divers, à savoir du charbon, du gaz, du fioul, et des ordures ménagères.

Pour la fabrication de sa vapeur, la CPCU utilise la répartition suivante pour l'énergie primaire :

- à 50% à partir d'ordures ménagères,
- à 20% à partir du charbon,
- à 20% à partir de gaz (en cogénération),
- à 10% à partir de fioul.

De la sorte, dans une tonne de vapeur fournissant 700 kWh exploitables pour le client, il y aura 350 kWh provenant d'ordures ménagères, et 140 du charbon, 140 du gaz, et 70 du fioul :

- pour obtenir 140 kWh thermique avec du charbon, il faut émettre 15 kilos équivalent carbone de gaz à effet de serre.
- pour obtenir 140 kWh thermique avec du gaz, il faut émettre 8,6 kilos équivalent carbone de gaz à effet de serre.
- pour obtenir 70 kWh thermique avec du fioul, il faut émettre 5,9 kilos équivalent carbone de gaz à effet de serre.

Enfin pour les ordures ménagères, il y a deux approches possibles pour estimer les émissions de combustion :

- la première est de dire que compte tenu de la loi française, qui vise la suppression des mises en décharge, l'incinération est obligatoire, et donc que la récupération de chaleur à cette occasion est une valorisation à émission marginale nulle. Cette convention conduit à ce que la partie "ordures ménagères" soit affectée d'un facteur d'émission nul.

- la deuxième manière de raisonner est de dire que si l'objectif est de minimiser les émissions de gaz à effet de serre, la combustion des ordures ménagères aux fins d'en retirer de la chaleur doit se comparer à la manière la plus économe (du point de vue des émissions) de gérer les déchets. Or, compte tenu de la composition de ces derniers en France (comme dans l'essentiel des pays développés), la mise en décharge et l'incinération conduisent à des émissions voisines, comme les tableaux comparatifs ci-après l'attestent.

Emissions de gaz à effet de serre lié à la combustion d'une tonne d'ordures ménagères²⁹			
Composant des ordures ménagères	En % du total	kg équ. C par tonne incinérée	Contribution sur une tonne d'ordures
Déchets putrescibles (hors papier carton)	28,80%	0	0
Papier carton	25,30%	0	0
Plastiques	11,10%	800	88,8
Verre	13,10%	0	0
Métaux	4,10%	0	0
Textiles	5,70%	500 ³⁰	28,5
Divers	11,90%	250 ³¹	29,75
Kg équ. C découlant de la combustion d'une tonne d'ordures ménagères			147,05

Tableau 23 : décomposition des émissions de la combustion d'une tonne d'ordure ménagère en fonction des matériaux incinérés

Emissions de gaz à effet de serre lié à la mise en décharge d'une tonne d'ordures ménagères			
Composant des ordures ménagères	En % du total	kg équ. C par tonne mise en décharge	Contribution sur une tonne d'OM
Déchets putrescibles	28,80%	290	83,52
Papier	16,20%	400	64,8
Carton	9,10%	280	25,48
Plastiques	11,10%	0	0
Verre	13,10%	0	0
Métaux	4,10%	0	0
Textiles	5,70%	0	0
Divers	11,90%	0	0
Kg équ. C découlant de la mise en décharge d'une tonne d'ordures ménagères			173,8

Tableau 24 : décomposition des émissions de la mise en décharge d'une tonne d'ordure ménagère en fonction des matériaux traités

Nous voyons donc que l'incinération et la mise en décharge sont comparables en ce qui concerne les émissions engendrées. De la sorte, l'incinération des ordures ménagères confère

²⁹ sans récupération d'énergie

³⁰ Valeur approximative provenant essentiellement de l'énergie utilisée par l'industrie textile et du "contenu en carbone fossile" des fibres synthétiques. La faible part de ce poste rend de toute façon l'incertitude peu gênante.

³¹ Cette valeur est totalement arbitraire, la composition exacte de cette rubrique n'étant pas connue, pas plus que les émissions par nature de produit brûlé.

à la chaleur produite un "contenu en gaz à effet de serre" voisin de zéro, ce qui nous amène au total suivant (le facteur d'émission par kWh de la dernière ligne est calculé) :

Combustible	% du total	kWh	g équ. C/kWh	Contribution pour une tonne de vapeur (700 kWh)
Charbon	20%	140	107	14,94
Gaz	20%	140	62	8,62
Fioul	10%	70	85	5,93
Ordures	50%	350	0	0,00
Total	100%	700	42	29,49

Tableau 25 : calcul du facteur d'émission global de la vapeur CPCU

La vapeur CPCU a donc un contenu en gaz à effet de serre de 42 grammes équivalent carbone par kWh. Compte tenu des variations potentiellement importantes sur la composition des ordures, et surtout sur la répartition entre combustibles, cette valeur sera affectée d'une imprécision de 30%.

2.5 Cas du chauffage des locaux sans compteur propre

2.5.1 Activités tertiaires, chauffage non électrique

Il peut arriver qu'une activité tertiaire (notamment une activité de bureaux) n'ait pas commodément accès aux consommations de combustibles nécessaires pour le chauffage des locaux, car ce dernier est assuré par un prestataire extérieur.

La méthode propose alors une estimation basée sur le nombre de m² chauffés et l'énergie utilisée pour le chauffage. Pour permettre de donner des points de repère, nous reproduisons ci-dessous les consommations moyennes par m² chauffé selon le type d'activité exercée dans les locaux et l'énergie utilisée pour le chauffage³².

Nature d'activité	Fioul (kWh/m ²)	Gaz (kWh/m ²)
Commerces	197	188
Bureaux	248	190
Enseignement	161	134
Santé - action sociale	292	202
Autres branches	259	287

Tableau 26 : consommation de chauffage (non électrique) par m² occupé selon la nature d'activité.

Par ailleurs, notons que le premier "Bilan Carbone" détaillé d'une activité tertiaire aboutit à une dépense de chauffage de l'ordre de 110 kWh/m², de telle sorte que nous pouvons

³² Tableaux des consommations d'énergie en France, Observatoire de l'Energie, édition 2001, page 89. En fait l'OE publie les consommations totales et les m² totaux, la division est faite ici.

raisonnablement considérer que les valeurs moyennes proposées ci-dessus peuvent être diminuées de 40% pour un local récent, bien isolé, etc, et augmentées de 20% en cas de local ancien.

Avec ces hypothèses, il est vraisemblable que l'estimation en fonction des m² ne sera pas imprécise de plus de 30%, que nous retenons comme facteur d'incertitude.

2.5.2 Logements

2.5.2.1 facteurs d'émission par logement

Lorsque la méthode Bilan Carbone sera appliquée au cas d'une collectivité, il pourra être nécessaire de disposer d'une estimation des émissions liées au chauffage des logements présents au sein de la collectivité, et dans ce cas il est bien évident qu'il ne sera pas possible d'accéder aux compteurs pris un par un des particuliers concernés.

Il sera donc nécessaire de disposer de la consommation moyenne par logement, éventuellement discriminée par énergie primaire utilisée.

Des travaux menés par l'auteur du présent document, pour le compte de l'Institut Français de l'Environnement³³, permettent d'aboutir, sur la base de chiffres publiés par le CEREN, aux consommations de chauffage, discriminées par type d'énergie, et par type de logement :

Energie de chauffage ³⁴	Superficie moyenne par maison	Superficie moyenne par appartement	KWh par m ² et par an, maison	KWh par m ² et par an, appartement	Kg équivalent carbone, par m ² et par an, maison	Kg équivalent carbone, par m ² et par an, appartement
Gaz	106	68	161	169	10,3	10,8
Fioul	118	71	140	165	11,5	13,5
GPL	115	73	94	84	6,9	6,2
Electricité	103	55	61	61	1,7	1,7
Bois	104	79	216	167	0	0

Tableau 27 : facteurs d'émission pour le chauffage par type d'énergie pour des logements

En d'autres termes, une maison chauffée au fioul aura en moyenne une superficie de plancher de 118 m², et dépensera en moyenne 140 kWh par m² et par an pour son chauffage.

³³ Indicateurs de consommation durable, Jancovici pour IFEN, à paraître en 2004.

³⁴ Sans production d'eau chaude sanitaire, et sans autre énergie en base.

Les consommations beaucoup plus faibles (2,5 à 3 fois inférieures) des logements chauffés à l'électricité, par rapport au gaz ou au fioul, s'expliquent par une conjonction des divers facteurs ci-dessous :

- pour le gaz et le fioul, ce qui est compté est l'énergie achetée (donc celle qui passe le compteur), mais le rendement de l'installation de chauffage n'est que de 50% en moyenne³⁵ : le reste part dans la cheminée avec les gaz de combustion, fait l'objet de déperditions thermiques dans la tuyauterie en cave, et d'une manière générale est "perdue" autrement que par dissipation thermique dans le radiateur. De la sorte, l'énergie utile (celle qui est dissipée dans le radiateur), est quasiment inférieure de moitié à l'énergie achetée (celle qui passe le compteur),
- pour l'électricité, au contraire, l'énergie achetée (celle qui passe le compteur) se retrouve à 100% dans le radiateur,
- le chauffage électrique concerne pour plus de la moitié des bâtiments construits après 1975, donc mieux isolés que les logements chauffés avec d'autres énergies, en moyenne plus anciens,
- le prix au kWh de l'électricité est nettement supérieur à celui du gaz, et donc les consommateurs sont plus attentifs à leur consommation.

Le fait que les consommations au m² ne soient pas significativement inférieures pour les appartements (ce qui devrait être le cas, puisque la surface en contact avec l'extérieur est moindre à surface habitable égale) peut peut-être s'expliquer :

- pour partie par une température intérieure éventuellement supérieure dans les appartements, par rapport aux maisons,
- pour partie par la logique budgétaire des êtres humains, qui est mise en évidence dans d'autres cas de figure (déplacements notamment) : ce qui compte est le montant de la facture, et donc on monte le thermostat jusqu'à ce que la facture atteigne la limite psychologiquement acceptable, qui est voisine pour les maisons et les appartements (c'est finalement une manière de justifier une température probablement supérieure dans les appartements),
- enfin les appartements chauffés au gaz ou au fioul ont souvent un chauffage central collectif, et le gestionnaire de la chaudière préférera généralement satisfaire ceux qui se plaignent d'avoir trop froid plutôt que ceux qui se plaignent d'avoir trop chaud. Cela est encore une autre manière de dire que la température moyenne des appartements est probablement plus élevée que la température moyenne des maisons.

2.5.2.2 proportion de chaque énergie dans le chauffage des logements

³⁵ Conversation avec André Pouget, Pouget Consultants, mai 2004

L'exploitation de statistiques du CEREN³⁶ permet d'aboutir aux données suivantes concernant l'utilisation des diverses énergies de chauffage par les logements³⁷ :

Energie	Milliers de maisons équipées	%	Milliers d'appartements équipés	%
Gaz	4 064	30%	5 356	49%
Fioul	4 302	32%	1 417	13%
GPL	740	5%	81	1%
Electricité	4 118	30%	2 952	27%
Bois	339	2%	0	0%
Chauffage urbain	12	0%	1 046	10%
Ensemble	13 616	100%	10 852	100%

Tableau 28 : Mix énergétique français pour le chauffage des logements

Cette répartition nationale peut servir pour estimer la proportion des logements chauffés par type d'énergie lorsque cette donnée n'est pas directement accessible.

2.5.2.3 proportion de chaque énergie dans l'eau chaude sanitaire des logements

L'exploitation des mêmes statistiques du CEREN que précédemment mentionnées permet d'aboutir aux données suivantes concernant l'utilisation des diverses énergies pour l'eau chaude sanitaire des logements :

Energie pour ECS	Milliers de maisons équipées	%	Milliers d'appartements équipés	%
Gaz	3 779	28%	5 405	50%
Fuel	2 183	16%	683	6%
GPL	1 036	8%	111	1%
Electricité	6 953	51%	4 145	38%
Bois	179	1%		
Chauffage urbain		0%	764	7%
Ensemble	14 129	104%	11 108	102%

Tableau 29 : Mix énergétique français pour l'eau chaude sanitaire des logements

De même que ci-dessus, cette répartition nationale peut servir pour estimer la proportion des logements équipés par type d'énergie par défaut lorsqu'aucune information supplémentaire n'est disponible dans le cas concret étudiée.

³⁶ Suivi du parc et des consommations de l'année 2002, CEREN

³⁷ Indicateurs de développement durable, Jancovici pour IFEN, 2004 (à paraître)

3 - Prise en compte des émissions non énergétiques des procédés

Ce poste est destiné à permettre la prise en compte des émissions liées :

- à des réactions chimiques qui n'ont pas pour objet de produire de l'énergie,
- aux fuites.

Cela concernera par exemple :

- les émanations de protoxyde d'azote à la suite de l'épandage d'engrais azotés,
- les fuites de fluides frigorigènes, utilisés dans les chaînes du froid,
- les vapeurs de solvants fluorés utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs,
- les émissions de gaz fluorés survenant lors de l'électrolyse de l'alumine,
- les émissions de CO₂ liées à la décarbonatation des composés utilisés comme matière première pour les matériaux de construction (production de chaux, de ciment...)
- etc.

3.1 - PRG des principaux gaz considérés

L'essentiel de ces émissions "non énergétiques" fera intervenir des gaz autres que le CO₂. Afin de convertir en équivalent carbone les émissions de ces gaz, nous avons retenu les facteurs proposés par le GIEC³⁸, et qui font l'objet du tableau ci-dessous. Notons que **même ces facteurs d'émission sont susceptibles de changer à l'avenir**. Par construction, les PRG sont en effet dépendants :

- des concentrations des divers gaz à effet de serre déjà présents dans l'atmosphère.
- des cycles naturels des gaz considérés, qui conditionnent leur rythme d'épuration de l'atmosphère, et donc leur "durée de vie" dans l'air³⁹

³⁸ GIEC signifie Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. L'abréviation anglaise est IPCC, pour International Panel on Climate Change.

³⁹ très souvent de l'ordre du siècle

Gaz	Kg équivalent carbone par kg de gaz ⁴⁰
CO ₂	0,273
Méthane	6,27
N ₂ O	80,7
NOx	10,9
Dichlorométhane	2,46
HFC – 125	764
HFC – 134	273
HFC – 134a	355
HFC – 143	81,8
HFC – 143a	1 040
HFC – 152a	38,2
HFC – 227ea	791
HFC – 23	2 670
HFC – 236fa	1 720
HFC – 245ca	153
HFC – 32	177
HFC – 41	40,9
HFC – 43 – 10mee	355
Perfluorobutane	1 910
Perfluoromethane	1 310
Perfluoropropane	1 910
Perfluoropentane	2 050
Perfluorocyclobutane	2 370
Perfluoroethane	2 510
Perfluorohexane	2 020
R22	518
R404a	1 020
SF ₆	6 520

Tableau 30 : facteur d'émissions non énergétiques (procédés et fuites)

3.2 - Emanations de protoxyde d'azote des engrais azotés

Les engrais azotés de synthèse, désormais d'un usage courant en agriculture, contiennent, comme leur nom l'indique, des composés azotés divers, dont des nitrates (NO₃). Lorsque ces engrais sont épandus sur le sol, une petite partie des composés azotés initiaux donne, par réduction sous l'action de la flore microbienne du sol, du protoxyde d'azote (N₂O), un puissant gaz à effet de serre qui s'échappe vers l'atmosphère. Il se forme aussi d'autres gaz à l'occasion de cet épandage, en proportions mineures toutefois. Le principal d'entre eux est l'ammoniac (NH₃).

⁴⁰ L'équivalent carbone valant le PRG multiplié par 12/44, seuls les 3 premiers chiffres significatifs du résultat ont été laissés.

La fraction de l'azote initial se convertissant en gaz est variable selon les conditions climatiques, le type de sol, et le type d'engrais, mais le GIEC⁴¹ a indiqué que, sous nos latitudes, 1,25% de l'azote épandu va se volatiliser en moyenne⁴². Le poids d'azote épandu est très facile à obtenir, dans la mesure où toute la littérature agronomique ne considère précisément que le poids d'azote dans les engrais. En d'autres termes, les apports sont toujours donnés en kg d'azote, encore appelés unités d'azote, et non en kg d'engrais.

La fraction de l'azote qui va se volatiliser va former du NH₃, pour 10% du total, et du N₂O, pour 90% du total⁴³. Le NH₃ n'est pas un gaz à effet de serre pris en compte au titre des accords de Kyoto, et ne rentre donc pas en ligne de compte dans les calculs.

De la sorte, le pourcentage de l'azote contenu dans l'engrais qui se retrouve pris dans le N₂O est de $0,9 * 1,25\% = 1,125\%$. Pour obtenir le poids de N₂O émis à partir du poids de l'azote seul, il faut rajouter le poids d'oxygène associé à l'azote. Comme la masse atomique de l'azote est 14 (en négligeant les isotopes mineurs) et celle de l'oxygène est 16 (même remarque), le facteur multiplicatif permettant de convertir un poids d'azote en N₂O est de $\frac{2 * 14 + 16}{2 * 14}$, ou encore 44/28.

De la sorte, le poids de N₂O émis peut s'obtenir à partir de l'azote apporté dans les engrais avec la formule :

$$\text{Poids de N}_2\text{O émis} = (\text{Poids de l'azote épandu}) \times 1,125\% \times (44/28)$$

Ou encore :

$$\text{Poids de N}_2\text{O émis} = 1,77\% \times (\text{poids de l'azote épandu})$$

Le facteur d'émission pour obtenir directement les émissions de N₂O en fonction du poids d'azote contenu dans les engrais épandus sera donc de 1,77%. Compte tenu des fortes variations possibles d'un champ à un autre, le facteur d'incertitude attaché est de 80%. Des mesures locales permettent bien sûr de choisir un facteur d'émission précisément adapté au cas traité.

3.3 - Fuites de fluides frigorigènes

La majeure partie des fluides frigorigènes modernes sont des dérivés halogénés d'hydrocarbures, c'est à dire qu'ils sont obtenus en substituant, dans une molécule d'hydrocarbure, tout ou partie de l'hydrogène par des molécules d'halogènes (fluor, chlore, brome, iode). Ces gaz sont de puissants gaz à effet de serre, de telle sorte que, même émis en quantités minimales, ils peuvent représenter une fraction significative du total des émissions de gaz à effet de serre pour un site donné.

⁴¹ GIEC signifie Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. L'abréviation anglaise est IPCC, pour International Panel on Climate Change.

⁴² IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories - reference manual, 1996

⁴³ Échange avec Sébastien Beguier, CITEPA, décembre 2002

Les émissions de ce poste peuvent généralement se renseigner par l'achat de recharges de gaz réfrigérant. Toutefois, pour le cas où cette information ne serait pas disponible, une autre manière de procéder est de repartir des puissances frigorifiques installées, sachant que ces dernières sont généralement connues par les personnes qui gèrent les installations, et que par ailleurs le ratio charge de fluide/puissance de l'installation est connue par le constructeur.

Ainsi, pour l'agro-alimentaire, un rapport⁴⁴ donne les chiffres suivants pour les installations de l'agro-alimentaire :

Charge en fluide (kg de fluide/kW de puissance frigorifique)	2,6
% de fuites annuelles	10%
Pourcentage de fuites au moment du rebut	50%

Tableau 31 : pourcentage de fuite dans les systèmes frigorifiques de l'industrie agro-alimentaire

Avec ces informations, et les durées de vie des installations (qui peuvent se retrouver) il est possible de reconstituer des émissions approximatives de fluides frigorigènes. Cette manière de procéder est proposée dans le tableur de calcul des émissions.

3.4 - Autres cas

La prise en compte des gaz ne provenant pas de la combustion nécessitera le plus souvent une investigation spécifique. En dehors des deux cas ci-dessus, qui sont couramment rencontrés, la méthode ne propose pas de module standard permettant de convertir des données commodément accessibles dans toute entreprise ou activité pour calculer ou estimer des émissions.

⁴⁴ Inventaire 1999 et prévisions à 15 ans de l'ensemble des fluides frigorigènes, Palandre, Nacif, Mercier, Clodic, 1999

4- Prise en compte des transports

Les transports sont une source de gaz à effets de serre à cause :

- 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 (HFC le plus souvent),
- 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),

A part les problèmes de fuites de fluide de climatisation, le reste 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), 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 des raffineries pour produire le carburant. Nous avons aussi tenu compte, à chaque fois que cela est possible, de l'amortissement des véhicules.

4.1 Transport routier de personnes

NB : les rubriques ne sont pas traitées ici dans l'ordre du manuel du tableur. Ici les facteurs d'émission sont décrits par moyen de transport, alors que dans le guide de calcul ce sont les lieux de destination qui servent de trame.

4.1.1 Véhicules particuliers

4.1.1.1 amortissement des véhicules particuliers

Toute voiture utilisée a bien sûr dû être fabriquée, ce qui a engendré des émissions de gaz à effet de serre, soit pour la production des matériaux utilisés, soit pour leur travail et leur assemblage.

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 ⁴⁵	Electricité en France ⁴⁶
Tep	38 000	462 000	119 000	1 390 000

Tableau 32 : consommations énergétiques en France pour l'activité de construction des véhicules terrestres

Mais les véhicules qui circulent en France ont été faits pour une large part ailleurs en Europe. La supposition que tous les véhicules circulant en France ont été faits avec de l'électricité à faible contenu en carbone serait donc infondée. Par contre l'efficacité énergétique des différents constructeurs européens (voire japonais) doit être très voisine, et la part respective de chaque énergie primaire est probablement aussi relativement similaire d'un pays européen à l'autre.

Pour obtenir des émissions de gaz à effet de serre par véhicule, nous allons donc retenir les données françaises pour la part de chaque énergie primaire par automobile, mais utiliser les coefficients européens 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, à ceci près qu'elle ne représentera 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 ⁴⁷	Total
Tep	38 000	462 000	119 000	1 390 000	-
Tonnes équ. C/tep	1,209	0,739	1,013	0,481	-
Tonnes équ. C	45 942	341 418	120 547	668 261	1 176 168

Tableau 33 : facteurs d'émissions pour l'activité de construction des véhicules terrestres

⁴⁵ Il s'agit pour l'essentiel de fioul lourd

⁴⁶ L'équivalence ici est de 0,222 tep par MWh

⁴⁷ L'équivalence ici est de 0,222 tep par MWh et 106 g équ. C par kWh électrique (source IEA).

Par ailleurs le nombre de véhicules particuliers produits 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'énergie) était de 3,4 millions en 2001. L'écart de la consommation d'énergie du secteur d'une année sur l'autre étant inférieur à 5% entre 1995 et 1999, nous supposons que nous pouvons rapprocher les données 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 véhicules particuliers étant prépondérants 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 une société comme Valéo possède un code NAF "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" sa 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.

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

- selon l'IFP⁴⁸, 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'APME⁴⁹, 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'IRSID⁵⁰, une voiture contient en moyenne 50% d'acier, que nous supposons issu à 66% d'acier recyclé (cette estimation demanderait à être confirmée).

⁴⁸ Echanges avec Stéphane HIS, IFP, octobre 2003

⁴⁹ APME : Association of Plastic Manufacturers (l'information a été trouvée sur le site web www.apme.org)

⁵⁰ IRSID : Institut de Recherche de la Sidérurgie

Une mise en commun de ces diverses informations permet d'aboutir à la synthèse suivante, pour un véhicule de 1 tonne :

	Plastique	Aluminium	Verre	Acier ⁵¹	Caoutchouc	Liquides	Autres ⁵²	Total
Kg par véhicule	100	70	40	500	50	70	170	1000
Kg équ. C par kg de poids	0,650	2,800	0,400	0,500	0,600	0,500	1,000	-
Kg équ. C par véhicule	65	196	16	250	30	35	170	762

Tableau 34 : 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 une tonne, engendre des émissions de fabrication qui sont de l'ordre de 1,5 tonne équivalent carbone, soit 1,5 fois son poids. Ce coefficient de 1,5 tonne équivalent carbone par tonne de véhicule nous servira donc de référent, jusqu'à plus ample informé.

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 contribuent alors pour 10 ± 4 g équivalent carbone par km parcouru, 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 sous 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 2,1 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 de 2,3 tonnes équivalent carbone par tonne, ce qui semble déjà très élevé.

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.

4.1.1.2 Calcul de la consommation de référence des véhicules particuliers

Les consommations de référence sont un recours lorsqu'il n'est pas possible d'accéder directement aux achats de carburant des véhicules employés⁵³.

⁵¹ 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 chapitre 8.1)

⁵² 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

⁵³ 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 !

Des données disponibles auprès de l'Observatoire de l'énergie ont permis d'affiner les calculs, et surtout, en donnant des indications sur la dispersion autour de la valeur moyenne pour un certain nombre de critères, vont permettre de retenir des marges d'erreur réalistes selon les approches.

Notons tout d'abord que, pour les véhicules disponibles à la vente, il existe des bases de données fournissant les consommations aux normes UTAC :

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

Mais ces sites ne donnent pas les carburants consommés en utilisation réelle (qui inclut des embouteillages, des accélérations généralement plus fortes que dans les parcours de référence, des démarrages moteur froid, l'emploi de la climatisation...), et le rapport entre normes UTAC et consommations réelles varie selon la puissance administrative du véhicule (voir 7.1.1.2.3), sans qu'il soit possible de proposer une règle valable quel que soit le véhicule considéré (le supplément constaté en utilisation réelle par rapport à la norme UTAC varie selon la catégorie de véhicules).

Par ailleurs 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 ne sont pas disponibles dans cette base.

4.1.1.2.1 Emissions approchées par type de carburant et zone de résidence

L'observatoire de l'Energie fournit les consommations segmentées suivant le lieu de résidence du propriétaire⁵⁴. Pour obtenir des valeurs au km, nous allons :

- convertir ces consommations en émissions, en utilisant les facteurs d'émission "complets" pour les carburants, calculés au § 2.2.1,
- 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), et de 1.322 kg par véhicule diesel.

Ces valeurs ont été obtenues en utilisant le poids moyen par puissance administrative pour les véhicules neufs vendus en 2001⁵⁵ et le parc de véhicules en circulation au 31-12-2001⁵⁶. 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.

⁵⁴ Tableaux des consommations d'énergie en France, Observatoire de l'Energie, édition 2001

⁵⁵ Source ADEME

⁵⁶ Source Ministère de l'Équipement, des Logements et du Transport, Service Économique et Statistique

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	10,9	68,6	-3%
De 2.000 à 49.999 hab.	8	10,9	70,0	-1%
> 50.000 hab. hors RP	8,3	10,9	72,3	2%
Région Parisienne (RP)	9,1	10,9	78,2	10%
Ensemble	8,1	10,9	70,8	0%

Tableau 35 : émissions, au km parcouru, des véhicules essences en fonction de la zone habitée.

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	9,9	63,6	-2%
De 2.000 à 49.999 hab.	6,8	9,9	65,3	0%
> 50.000 hab. hors RP	6,9	9,9	66,1	1%
Région Parisienne (RP)	6,8	9,9	65,3	0%
Ensemble	6,8	9,9	65,3	0%

Tableau 36 : émissions, au km parcouru, des véhicules diesels en fonction de la zone habitée

La zone de résidence ne semble donc pas être un discriminant 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 (il y a 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.

4.1.1.2.2 Emissions approchées par type de carburant et date de mise en circulation

L'Observatoire de l'Energie propose également des émissions discriminées par date de mise en circulation.

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 37 : consommations moyennes des véhicules en fonction de leur date de mise en circulation

Là encore, les valeurs moyennes discriminées par date de mise en circulation 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.

Par contre le poids a augmenté au fil des ans (donc les émissions de fabrication) 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

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'Energie 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'énergie.

Ces données de l'Observatoire de l'Energie 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 38 : 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 conduite confondus, soit 71 grammes équivalent carbone par km pour les véhicules essence, et 65 grammes équivalent carbone par km pour les véhicules diesel (tableaux 35 et 36), 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 68 grammes équivalent carbone par km.

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,
- la consommation moyenne aux normes UTAC pour tous les véhicules ayant la même puissance administrative et utilisant le même type de carburant.

Ces données sont donc d'un niveau de détail élevé, mais portent sur des consommations non réelles (celles aux normes UTAC), 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).

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 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'énergie, nous n'avons 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 nous allons donc :

- effectuer la moyenne, par puissance administrative, des consommations aux normes UTAC 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 consommations UTAC et sur les seuls véhicules neufs pour obtenir la consommation réelle des véhicules de la catégorie fournie par l'OE. La consommation réelle de référence concernera un parcours mixte, qui est supposé se rapprocher le plus de la réalité⁵⁷.

Par exemple les consommations UTAC pour les véhicules essence de 3 à 5 CV conduisent aux moyennes ci-dessous :

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 39 : consommation UTAC 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 (UTAC), 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 selon les normes UTAC, 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),

⁵⁷ 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

pour passer d'un calcul fait sur les seuls véhicules neufs, et avec les consommations UTAC, 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 6 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

Dans le cas de figure où il est seulement possible de connaître le nombre de voitures utilisées par les salariés venant en voiture, nous proposons ci-dessous un facteur d'émission permettant d'obtenir une approximation.

Nous connaissons, via des études de l'INRETS, la distance moyenne au travail⁵⁸ des actifs 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 de province,
- 15 km environ s'il réside en 2^e couronne parisienne.

Par ailleurs une étude de l'INSEE donne la distance au travail des actifs selon qu'ils changent ou pas de commune, de département, etc. 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 - avril 2001		
catégorie	1999	
	nombre d'actifs	moyenne km dom/travail
ne changent pas de commune pour aller travailler	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	280 896	40,00
totaux	26 606 595	14,9

Tableau 40 : distance moyenne domicile-travail en fonction du parcours.

Sur cette base, nous supposerons qu'un actif qui réside en zone rurale et qui occupe une activité "de bureau", ou industrielle, parcourt 25 km en moyenne pour se rendre à son travail.

⁵⁸ J.-P. Orfeuill, La Jaune et La Rouge, avril 1998

Un actif allant en voiture au travail parcourt en moyenne 2 fois ces distances par jour (4 fois s'il rentre manger), et effectue ce déplacement 220 jours travaillés par an.

Nous allons par ailleurs supposer que les cycles de conduite sont les suivants, ce qui reflète à la fois les types de parcours et le fait que ces déplacements se font préférentiellement aux heures de pointe :

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

Enfin il faut rajouter les émissions liées à la fabrication du véhicule ainsi que les émissions amont du raffinage 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.

Pour les émissions amont du carburant, comme le kilométrage des véhicules particuliers est, en première approximation, effectué pour moitié par des véhicules diesel et pour moitié par des véhicules essence, nous prendrons comme base un supplément de 15% par rapport aux seules émissions de combustion. En effet, la valeur moyenne des suppléments du diesel est de 12% (cf. 2.2.1) et celui de l'essence est de 18% (même paragraphe).

Il nous reste à faire 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^e couronne parisienne. Compte tenu du fait que 80% de la population est urbaine aujourd'hui, cette hypothèse ne doit pas être grossièrement fautive.

Sur cette base, nous obtenons le tableau suivant :

Déplacements domicile travail, selon le domicile du conducteur	Nb jours par an	Km par jour	Km par an	Gr équ. C par km, combust°	Sup. pour amont carb.	Fab° véhicule, G. équ. C/km	kg équ. C par an, combust°	kg équ. C par an, amont carb.	kg équ. C par an, amort.	kg équ. C par voiture et par an
périphérie rurale	220	20	8 800	39,7	15%	11	350	53	97	500
Ile de France banlieue lointaine	220	15	6 600	48,1	15%	11	317	48	73	438
banlieue urbaine	220	12	5 280	62,8	15%	11	331	51	58	440
centre ville	220	8,5	3 740	69,1	15%	11	258	39	41	339
France entière	220	15	6 600	48,1	15%	11	317	48	73	438

Tableau 41 : facteurs d'émission par voiture des déplacements domicile travail en fonction du parcours

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 de type extra - urbain pour se rendre au travail,
- un salarié habitant en banlieue de ville de province ou en 2^e 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 6, 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 ⁵⁹
Emissions par km parcouru, en grammes équivalent carbone	58	69	87	96

Tableau 42 : facteurs d'émission domicile travail en fonction du type de parcours effectué par km.

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 6.

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.

⁵⁹ Nous avons rajouté forfaitairement 10% pour tenir compte du départ à froid, des embouteillages, etc. Cela peut bien sûr 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 dans la journée

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,

4.1.2 Bus et cars

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 un véhicule de particulier), le facteur permettant de convertir les poids en émissions peut théoriquement être choisi égal à 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 commun⁶⁰ 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	17,5
Autobus urbain	19,0	11,00	1 000 000	16,5
Autocar interurbain (3 essieux)	23,0	15,00	1 500 000	15,0

Tableau 43 : facteurs d'émission de la fabrication des minibus, autobus urbains et autocars interurbains.

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

⁶⁰ site 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

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 :

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 44 : facteurs d'émission par voyageur.km pour différents types d'autobus

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
- 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 § 2.2.1,
- 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 :

Catégorie	g équ. C par véhicule.km, carburant seul, avec amont	Incertitude combustion	Fabrication, g équ. C par véhicule.km	Incertitude fabrication	soit kg équ. C par véhicule.km	Incertitude totale
Minibus	122,1	10%	17,5	50%	0,140	15%
Autobus urbain IdF	435,7	10%	16,5	50%	0,452	11%
Autobus urbain province	260,4	10%	16,5	50%	0,277	12%
Autocar interurbain	309,8	10%	15,0	50%	0,325	12%

Tableau 45 : facteurs émission par véhicule.km pour différents types d'autobus

Faute de données sur la variation des émissions en fonction du taux de remplissage, nous prendrons cette valeur moyenne dans tous les cas de figure.

4.1.2.3 Emissions par passager.km

4.1.2.3.1 Cas général

A partir des valeurs ci-dessus et des taux de remplissage, nous pouvons également obtenir des émissions complètes par passager.km, qui sont calculées comme suit :

- les émissions liées à la combustion du carburant sont tirées de la publication Ademe précitée,
- les émissions amont sont proportionnelles à celles de combustion,
- les émissions de fabrication par véhicule.km sont divisées par le taux de remplissage moyen, pour obtenir une valeur par passager.km.

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) :

Catégorie	g équ. C par passager.km, carburant avec amont	g équ. C par passager.km, fabrication	soit g équ. C par passager.km, total
Minibus	4,4	30,5	34,9
Autobus urbain IdF	0,8	20,4	21,1
Autobus urbain province	1,7	26,0	27,7
Autocar interurbain	0,5	10,5	11,0

Tableau 46 : facteurs émission par passager.km pour différents types d'autobus

4.1.2.3.2 Valeur globale pour les déplacements domicile-travail

Pour les déplacements domicile-travail en bus, la multiplication de la distance moyenne au travail par la consommation moyenne par passager.km en bus permet d'obtenir une émission moyenne par trajet.

L'émission moyenne par passager.km en bus est de 85 g de CO₂ pour la combustion du carburant⁶¹, donc 93,5 g de CO₂ en tenant compte des émissions amont pour le carburant, soit 25,5 g équivalent carbone par km.

Nous prendrons comme distance de référence 12 km aller-retour⁶², et pour ne pas discriminer Paris et la province nous retiendrons une valeur médiane de 25,5 grammes équivalent carbone par passager.km (en fait les déplacements domicile-travail sont probablement faits pour l'essentiel aux heures de pointe, donc avec un taux de remplissage meilleur que la moyenne, mais faute de disposer du taux de remplissage spécifique pour les heures de pointe nous conserverons cette approximation).

⁶¹ Source : ADEME

⁶² Source INRETS

Tout utilisateur de bus se verra donc attribuer environ 12 (km) x 220 (jours) x 25,5 (g équ. C/km) soit 67 kg équivalent carbone par an. L'incertitude sur les valeurs exposées ici est estimée à 30%.

On voit qu'il faut covoiturer à 4 personnes pour que cela devienne équivalent au bus (à peu près 100 g équivalent carbone par km pour la voiture contre 25 pour le bus).

Ce chiffre ne s'applique pas aux trams, qui fonctionnent généralement à l'électricité (voir § ci-dessous).

4.1.3 RER, métro et tramways

Sachant qu'un passager.km en train correspond à l'émission de 2,3 g d'équivalent carbone en France tous types de modes ferrés confondus (voir § 4.4) et que les RER, métros et tramways sont uniquement à traction électrique, l'ordre de grandeur des émissions est de 30 (km) x 220 (jours) x 2 (g équ. C/km) = 15 kg équivalent carbone par an.

Un travail plus précis sur les installations de la RATP permettrait, pour ces les § 4.1.2 et 4.1.3 de disposer de valeurs plus précises.

Ces valeurs sont par ailleurs propres à la France : dans les autres pays d'Europe, il faut utiliser les facteurs d'émission du train (§ 4.4) et calculer les distances approximatives.

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 approximatifs, proposés ci-dessous, permettent néanmoins de parvenir à des ordres de grandeur acceptables 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 PTAC (Poids Total Autorisé en Charge) 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 des routes).

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 soit 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
	2,6 à 3,4 tonnes
	3,5 tonnes
Camions	3,6t à 5 tonnes
	5 à 6 tonnes
	6,1 à 10,9 tonnes
	11 à 19 tonnes
	19,1 à 21 tonnes
	plus de 21 tonnes
	tracteurs routiers (PTAC tracteur + remorque : 44 t en général).

Tableau 47 : 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 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.

Le service statistique du Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement nous a fourni le nombre de véhicules en circulation au 1^{er} janvier 2002 par PTAC (voir annexe 5). 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 47, 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 5.

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 Transports⁶³
- pour les autres classes, nous avons extrapolé le rapport entre PTAC et charge utile maximale.

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
2,6 à 3,4 tonnes	2,90	1,70	1,20
3,5 tonnes	3,50	2,10	1,40
3,6 à 5 tonnes	4,74	2,37	2,37
5 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
plus de 21 tonnes	26,87	10,21	16,66
tracteurs routiers	40,00	15,00	25,00

Tableau 48 : 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.

⁶³ L'Utilisation des véhicules utilitaires légers en 2000 - Ministère des Transports/SES

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 ⁶⁴
< 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
2,6 à 3,4 tonnes essence	200 000
2,6 à 3,4 tonnes diesel	250 000
3,5 tonnes	300 000
3,6 à 5 tonnes	300 000
5 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
plus de 21 tonnes	650 000
tracteurs routiers	750 000

Tableau 49 : 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).

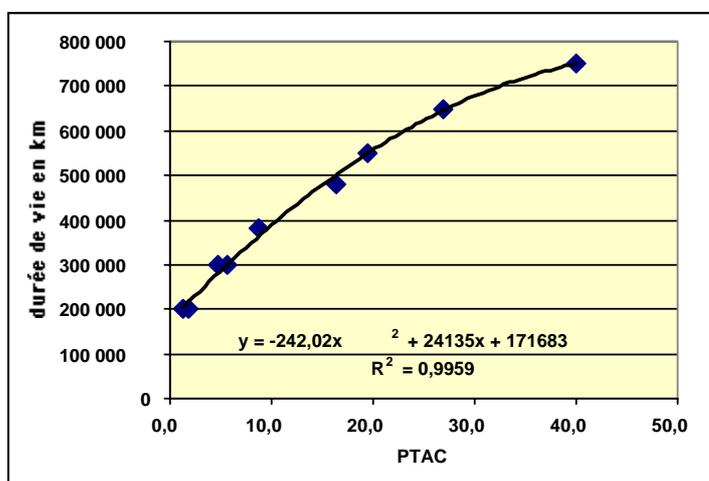


Figure 1 : corrélation entre la durée de vie et le PTAC des camions et camionnettes.

⁶⁴ 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.

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 (3 tonnes équ. C/tonne) est un métal fréquemment employé pour fabriquer les remorques, 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.

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	9,0
< 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	11,0
1,5 à 2,5 tonnes diesel	1,80	1,10	200 000	8,3
2,6 à 3,4 tonnes essence	2,90	1,70	200 000	12,8
2,6 à 3,4 tonnes diesel	2,90	1,70	250 000	10,2
3,5 tonnes	3,50	2,10	300 000	10,5
3,6 à 5 tonnes	4,74	2,37	300 000	11,9
5 à 6 tonnes	5,67	2,84	300 000	14,2
6,1 à 10,9 tonnes	8,80	4,11	380 000	16,2
11 à 19 tonnes	16,32	6,53	480 000	20,4
19,1 à 21 tonnes	19,37	7,75	550 000	21,1
plus de 21 tonnes	26,87	10,21	650 000	23,6
tracteurs routiers	40,00	15,00	750 000	30,0

Tableau 50 : 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 lorsque le commanditaire est précisé, car 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.

Les données publiées concernent des consommations moyennes par classe de PTAC (il s'agit d'une moyenne tous types de trajets confondus, sachant que 20% des trajets environ sont faits à vide) :

Classe de PTAC	Litres aux 100 km ⁶⁵	g équ. C par km
< 1,5 t essence	8,4	62,1
< 1,5 t diesel	7,2	58,6
1,5 à 2,5 tonnes essence	9,5	70,2
1,5 à 2,5 tonnes diesel	8,4	68,4
2,6 à 3,4 tonnes essence	16,7	123,4
2,6 à 3,4 tonnes diesel	10,8	87,9
3,5 tonnes	12,4	100,9
3,6 à 5 tonnes	18,5	150,6
5 à 6 tonnes	14,5	118,0
6,1 à 10,9 tonnes	21,9	178,3
11 à 19 tonnes	29,6	240,9
19,1 à 21 tonnes	34,2	278,4
plus de 21 tonnes	42,8	348,4
tracteurs routiers	37,1	302,0

Tableau 51 : facteurs d'émission de la consommation des véhicules par km et par classe de PTAC

⁶⁵Il s'agit d'une moyenne tous types de propriétaires confondus jusqu'à 5 tonnes de PTAC et des seules consommation en compte d'autrui (c'est à dire des seuls transporteurs routiers) pour les véhicules à partir de 5 tonnes de PTAC (le compte propre concerne les entreprises qui ont leur propre flotte). Source : Tableaux des consommations d'énergie en France, Direction Générale de l'Energie et des matières premières, Observatoire de l'Energie, édition 2001.

Ces consommations découlant d'observations sur un échantillon (c'est comme cela que le ministère établit ses chiffres), 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. A partir de ces consommations, nous pouvons bien entendu en déduire les émissions liées à l'usage du véhicule, le facteur d'émission utilisé pour le carburant étant bien entendu celui qui découle des calculs effectués au § 2.2.1 (émissions amont incluses).

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

Nous pouvons alors parvenir à des émissions **moyennes** par véhicule.km, résumées dans le tableau ci-dessous :

Classe de PTAC	Litres aux 100 km ⁶⁶	G équ. C par km	Incertitude sur consommation	Fabrication g équ. C/km	Incertitude sur fabrication	Soit g par véhicule.km	Incertitude totale
< 1,5 t essence	8,4	62,1	5%	9,0	40%	71,1	9%
< 1,5 t diesel	7,2	58,6	5%	6,8	40%	65,4	9%
1,5 à 2,5 t essence	9,5	70,2	5%	11,0	50%	81,2	11%
1,5 à 2,5 t diesel	8,4	68,4	5%	8,3	50%	76,6	10%
2,6 à 3,4 t essence	16,7	123,4	5%	12,8	70%	136,2	11%
2,6 à 3,4 t diesel	10,8	87,9	5%	10,2	70%	98,1	12%
3,5 t	12,4	100,9	5%	10,5	70%	111,4	11%
3,6 à 5 t	18,5	150,6	5%	11,9	70%	162,4	10%
5 à 6 t	14,5	118,0	5%	14,2	70%	132,2	12%
6,1 à 10,9 t	21,9	178,3	5%	16,2	70%	194,5	10%
11 à 19 t	29,6	240,9	5%	20,4	70%	261,3	10%
19,1 à 21 t	34,2	278,4	5%	21,1	70%	299,5	10%
plus de 21 t	42,8	348,4	5%	23,6	70%	372,0	9%
tracteurs routiers	37,1	302,0	5%	30,0	70%	332,0	11%

Tableau 52 : 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.

⁶⁶ Même remarque que ci-dessus (et même source).

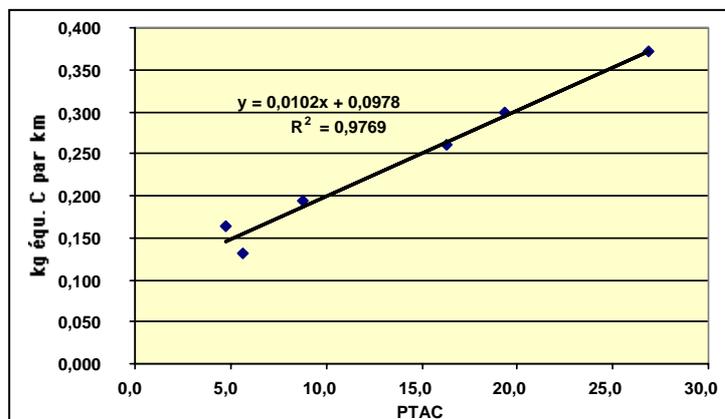


Figure 2 : corrélation entre le PTAC et les émissions par véhicule.km

Il y a une exception : la consommation des véhicules de 3,6 à 6 tonnes semble aberrante⁶⁷, 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.

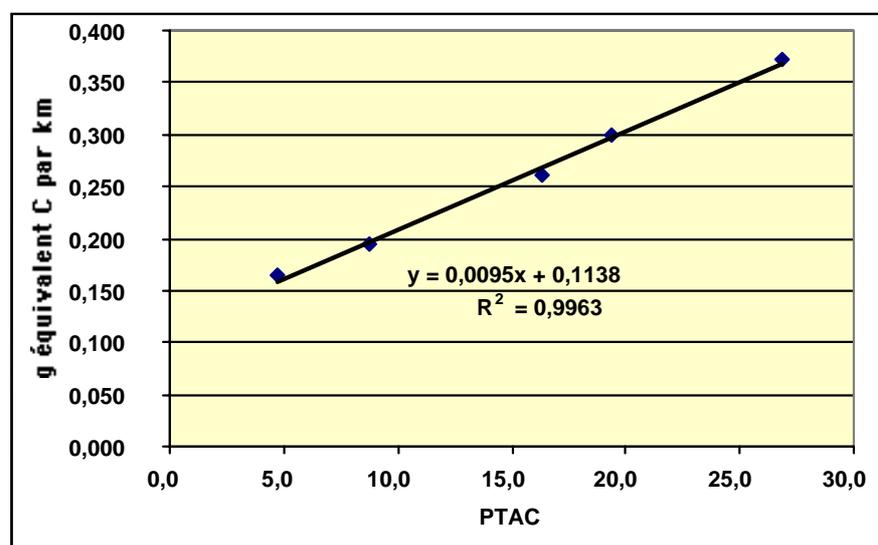


Figure 3 : corrélation entre le PTAC et les émissions moyennes par véhicule.km pour les véhicules particuliers

⁶⁷ 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")

Une telle relation linéaire entre poids et consommation se retrouve du reste dans d'autres études sur les camions⁶⁸, 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.

La formule figurant sur le graphique sera donc introduite dans le tableur et son emploi préconisé dès lors que le PTAC exact du véhicule qui sert à acheminer des produits ou des matières premières particulières est connu sans que la consommation du véhicule ne le soit.

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 20% 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.

Pour la suite 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 transportée⁶⁹.

On peut donc dire que pour évaluer les émissions de gaz à effet de serre liées à la combustion du carburant d'un véhicule (E_v), il faut connaître **5 éléments** :

- 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 tonnage moyen transporté T_m 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.

⁶⁸ Choix logistiques des entreprises et consommation d'énergie, Christophe RIZET et Basile KEÏTA, INRETS, novembre 2000, page 33

⁶⁹ 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 :

Emissions totales = émissions pour la partie à vide + émissions pour la partie en charge

Soit encore

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

Soit encore

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

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 :

Emissions par km en charge = émissions par km à vide + différentiel lié à la charge

Soit encore

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

De la sorte nous parvenons à la formule

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

Qui peut encore s'écrire :

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

Les variables du transport considéré, T_{dv} et T_m , sont ainsi individualisées dans la formule, à condition de connaître E_{vv} , E_{vpc} et CU. La charge utile est connue (4.2.1) et il reste 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 variable. L'information des consommations à vide et à pleine charge n'est donc pas immédiatement fournie par cette source.

Il faut donc parvenir, à partir des consommations moyennes, et des émissions à vide ou celles en pleine charge, à un système 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 III⁷⁰, 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 :

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

La formule énoncée plus haut pour calculer E_v :

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

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

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

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

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

PTAC	Taux de distance à vide (T_{dv}) ⁷¹	Charge utile maximale	Tonnage moyen par véhicule (T_m) ⁷²
< 1,5 t essence	20,0%	0,40	0,12
< 1,5 t diesel	20,0%	0,40	0,12
1,5 à 2,5 t essence	20,0%	0,70	0,21
1,5 à 2,5 t diesel	20,0%	0,70	0,21
2,6 à 3,4 t essence	20,0%	1,20	0,36
2,6 à 3,4 t diesel	20,0%	1,20	0,36
3,5 t	20,0%	1,40	0,42
3,6t à 5 t	20,0%	2,37	0,71
5 à 6 t	20,0%	2,84	0,85
6,1 à 10,9 t	19,0%	4,69	1,65
11 à 19 t	17,8%	9,79	4,24
19,1 à 21 t	15,0%	11,62	4,93
plus de 21 t	29,9%	16,66	8,27
tracteurs routiers	21,1%	25,00	14,31

Tableau 53 : caractéristique du transport de marchandises en fonction de la classe de PTAC.

⁷⁰ nov 2000 - voir toutes les informations sur Internet : vergina.eng.auth.gr/mech/lat/copert/copert.htm

⁷¹ Ministère chargé du transport, DAEI-SES, Utilisation des véhicules de TRM, année 2001 (transport pour compte d'autrui)

⁷² Exploitation du fichier SITRAM-TRM année 2000 (global comptes propre et d'autrui)

Pour les PTAC < 3,5 t, faute de données publiées, 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).

Pour récapituler, voici les informations caractéristiques des véhicules :

PTAC	Emissions (kg équ. C/vehicule.km)		Charge utile maximale CU
	à vide (E _{vv})	A pleine charge (E _{vpc})	
< 1,5 t essence	0,062	0,062	0,40
< 1,5 t diesel	0,059	0,059	0,40
1,5 à 2,5 t essence	0,070	0,070	0,70
1,5 à 2,5 t diesel	0,068	0,068	0,70
2,6 à 3,4 t essence	0,123	0,123	1,20
2,6 à 3,4 t diesel	0,088	0,088	1,20
3,5 t	0,101	0,101	1,40
3,6 à 5 t	0,136	0,196	2,37
de 5 t à 6 t	0,107	0,154	2,84
de 6,1 t à 10,9 t	0,158	0,228	4,69
de 11 t à 19 t	0,208	0,300	9,79
de 19,1 t à 21 t	0,240	0,346	11,62
plus de 21 t	0,302	0,435	16,66
tracteurs routiers	0,252	0,363	25,00

Tableau 54 : facteurs d'émission à vide et à pleine charge du transport de marchandises.

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

- le taux de distance à vide,
- le tonnage moyen sur la partie en charge.

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

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

Pour les entreprises qui ne les connaissent pas, les valeurs du tableau 53 seront appliquées :

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 :

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

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. Afin de proposer une solution simple pour utiliser ces informations pour déterminer les émissions, l'ADEME a fait réaliser une étude spécifique, qui a permis l'élaboration d'un utilitaire dit « t-km » fourni en complément du tableur du Bilan Carbone.

4.2.4.1 Typologie des transports de marchandises

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 effet, 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 § 4.2.4 ci-dessous).

Une première information va permettre de progresser à partir de cette situation de départ : les métiers du transport routier sont assez standardisés, et il est possible, en particulier, de relier (ces liens sont valables pour toute l'Europe) :

- le(s) type(s) de véhicules utilisés au poids unitaire d'une expédition,
- les coefficients de remplissage moyens au type de véhicule et au "métier" du transporteur.

Différentes solutions transport existent donc, et le choix dépend en premier lieu du poids de l'expédition unitaire.

4.2.4.2 Formulation des émissions par tonne.km dans le Bilan Carbone

Nous avons établi au §4.2.3 les facteurs d'émission par véhicules.km. Nous pouvons maintenant exploiter cette donnée pour parvenir à des facteurs 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 intégrera 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 :

$$(ii) \text{ Taux de remplissage moyen sur l'ensemble du parcours} = T_m * (1 - T_{dv}) \div CU$$

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

$$\text{Kg équ. C par tonne.km} = E_v \div (CU * T_m * (1 - T_{dv}) \div CU)$$

Nous aboutissons alors à :

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

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 :

Classe de PTAC	Grammes équ. C par tonne.km
< 1,5 t essence	740,4
< 1,5 t diesel	680,8
1,5 à 2,5 t essence	483,4
1,5 à 2,5 t diesel	456,1
2,6 à 3,4 t essence	472,8
2,6 à 3,4 t diesel	340,7
3,5 t	331,7
3,6 à 5 t	285,4
5 à 6 t	194,2
6,1 à 10,9 t	145,1
11 à 19 t	74,9
19,1 à 21 t	71,4
plus de 21 t	64,1
tracteurs routiers	29,4

Tableau 55 : facteurs d'émission moyens nationaux du transport de marchandise selon la classe de PTAC

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.

- 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 précisions les tonnes.km expédiées ou les véhicules.km effectués il peut être utile de connaître précisément des distances routières. Le site Internet www.infotrafic.com propose un calcul exact de ces distances entre une commune d'origine et de destination, n'importe où en Europe.

4.3 Transport aérien

Tout comme le transport routier, le transport aérien, qui nécessite du carburant d'origine fossile, contribue aux émissions de gaz à effet de serre⁷³. Nous proposons ci-dessous des facteurs d'émission discriminés par type de trajet, et par classe pour les transports de personnes.

Les données utilisées ont été prises sur le site Internet d'Airbus⁷⁴ et de Boeing en octobre 2002 (voir annexe 7).

4.3.1 Consommations par passager.km

Les rayons d'action, autonomies maximales avec seulement des passagers et nombre de sièges par classe d'un certain nombre d'avions commerciaux en service sont reproduits sur le tableau ci-dessous. Les configurations présentées sont les configurations "de référence" figurant sur la documentation constructeur.

⁷³ 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.

⁷⁴ www.airbus.com

Avion	Carburant max. (litres)	Rayon d'action ⁷⁵ (km)	Sièges 2nde	Sièges Affaire	Sièges 1ère	Total sièges	Equivalent 2nde ⁷⁶
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 56 : caractéristiques de références des principaux avions.

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),
- à un siège "Première" nous attribuons un supplément de 250% par rapport à la seconde (même méthode).

Enfin les avions émettent certes du CO₂, dont la prise en compte est facile avec les facteurs d'émission pour les carburants, calculés au § 2.2.1, mais ils émettent aussi d'autres gaz à effet de serre : vapeur d'eau⁷⁷, 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 GIEC⁷⁸).

⁷⁵ Il s'agit du rayon d'action maximal avec la capacité d'emport maximale de passagers, sans fret.

⁷⁶ 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.

⁷⁷ Qui est prise en compte ici parce qu'elle est partiellement émise dans la stratosphère, ce qui n'est pas le cas de la vapeur d'eau résultant de l'emploi de combustibles fossiles près du sol

⁷⁸ L'aviation et l'atmosphère planétaire, résumé à l'intention des décideurs, Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, 1999, téléchargeable sur www.ipcc.ch

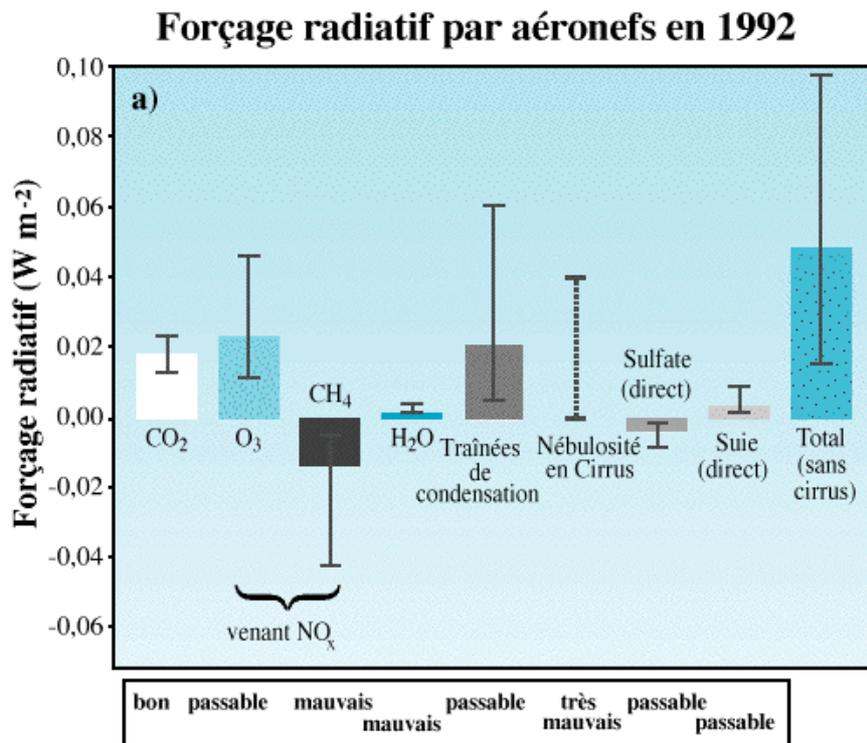


Figure 4 : forçage radiatif par avions en 1992.

La dernière ligne du graphique ci-dessus précise le degré de compréhension des processus physiques et chimiques en cause (ce qui influence 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 conduisent à un forçage radiatif total de l'ordre de 0,04 W/m², alors que le seul CO₂ ne produit que 0,02 W/m², c'est-à-dire 2 fois moins. Toutefois ce forçage total peut varier entre 0,02 et 0,1 W/m², de telle sorte que les calculs ci-après sont peut-être soit excessifs, soit au contraire très en deçà de la réalité.

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

$$\text{Emissions par passager en seconde} = 2 * \text{quantité totale de carburant} * \text{facteur d'émission du kérosène} \div (\text{nombre total de sièges "équivalent seconde"} * \text{distance totale parcourue} * \text{taux de remplissage moyen})$$

Pour les passagers "Affaires" et "Première" nous appliquons les coefficients précisés ci-dessus.

Il en ressort les émissions suivantes par passager.km (qui tiennent compte des émissions amont pour le kérosène) :

	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	58	130	-	65
	A310	9 630	66	82	-	68
	A318	5 278	80	180	-	88
	A319	6 852	67	151	-	72
	A320	5 649	66	144	-	73
	A321	5 371	58	108	-	62
Long courriers	A330-200	12 316	71	165	247	93
	A330-300	10 371	52	121	182	58
	A340-200	14 816	64	149	224	83
	A340-300	13 520	57	133	199	74
	A340-500	13 520	83	193	289	105
	A340-600	13 890	60	141	211	77
	A380	14 816	59	138	207	78
	747-400	13 446	Disposition des sièges par classe non disponible			80
	B777 ⁷⁹	11 019	59	-	-	59

Tableau 57 : facteurs d'émission par passager.km pour les transports de personnes en avion

Nous constatons sur ce tableau que la dispersion autour d'une valeur de 60 g équ. C par passager.km de seconde est de l'ordre de 40%. Si nous prenons les deux avions les plus couramment employés en long courrier, toutefois (B 747 et A 340-600), les deux valeurs sont très proches, de l'ordre de 60 g équ. C par passager.km en seconde).

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

Pour les court-courrier, 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.

⁷⁹ 1 seule classe

Compte tenu des émissions calculées pour le rayon d'action maximal et de ces remarques, les facteurs d'émission retenus pour le tableur sont les suivants :

- 80 g équ. C par passager.km pour un passager de court courrier en 2^{nde},
- 180 g équ. C par passager.km pour un passager de court courrier en classe "Affaires",
- 60 g équ. C par passager.km pour un passager de long courrier en 2^{nde},
- 140 g équ. C par passager.km pour un passager de long courrier en classe "Affaires",
- 210 g équ. C par passager.km pour un passager de long courrier en Première classe.

La marge d'erreur est estimée égale 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.

4.3.2 Consommations par tonne.km pour les marchandises

Certains avions mentionnés ci-dessus existent aussi en version fret, ou en version mixte. En prenant les abaques fournis par la société Airbus donnant le rayon d'action en fonction du tonnage emporté, nous aboutissons au tableau suivant.

Avion	Carburant max (litres)	Fret (tonnes)	Autonomie (pour la charge emportée) ⁸⁰ en km	Kg équ. C par tonne.km ⁸¹
A318	23 860	16	2 778	0,835
A318	23 860	10	5 186	0,716
A319	29 660	18,5	4 593	0,544
A319	29 660	11	6 852	0,612
A320	29 660	20	2 675	0,863
A320	29 660	15	4 116	0,748
A300F	68 150	52	5 062	0,403
A300F	68 150	43	6 297	0,392
A310	75 470	32,9	6 482	0,551
A330-200	139 090	104	8 149	0,255
A330-200	139 090	68	11 112	0,286
A340-600	194 880	147,4	10 371	0,198
A340-600	194 880	80	13 890	0,273
A380	310 000	150	10 408	0,309
747-400	216 840	113	13 446	0,222

Tableau 58 : facteurs d'émission théoriques par tonne.km pour les transports de marchandises en avion

Le tableau ci-dessus s'applique bien entendu à des avions remplis au maximum, et suppose que le rayon d'action maximal pour la charge emportée est effectivement atteint.

⁸⁰ Voir abaques en annexe 1

⁸¹ Ces chiffres tiennent compte des émissions amont pour le kérosène mentionnées au § 2.2.1 et du facteur 2 lié à la prise en compte des gaz autres que le CO₂

Si nous majorons les résultats de 20% pour tenir compte de distances généralement plus courtes que les rayons d'action maximaux, d'avions imparfaitement remplis, en particulier lorsque le fret voyage en soute d'avions prenant aussi des passagers, etc, nous aboutissons à de nouvelles valeurs qui serviront de référence :

Catégorie	Avion	Carburant max (litres)	Autonomie (pour la charge emportée) ⁸² en km	Fret (tonnes)	Kg équ. C par tonne.km ⁸³
Court-courrier	A318	23 860	2 778	16	1,044
	A318	23 860	5 186	10	0,895
	A319	29 660	4 593	18,5	0,680
	A319	29 660	6 852	11	0,765
	A320	29 660	2 675	20	1,078
	A320	29 660	4 116	15	0,934
Moyen-courrier	A300F	68 150	5 062	52	0,504
	A300F	68 150	6 297	43	0,490
	A310	75 470	6 482	33	0,689
Long-courrier	A330-200	139 090	8 149	104	0,319
	A330-200	139 090	11 112	68	0,358
	A340-600	194 880	10 371	147	0,248
	A340-600	194 880	13 890	80	0,341
	A380	310 000	10 408	150	0,386
	747-400	216 840	13 446	113	0,278

Tableau 59 : facteurs d'émission « réels » par tonne.km pour les transports de marchandises en avion

Nous pouvons alors retenir pour chaque catégorie la valeur moyenne, dont les autres valeurs ne s'écartent pas de plus de 20%.

Pour le court-courrier, c'est à dire les vols inférieurs à 1000 km, cette valeur est de 0.9 kg équivalent carbone par tonne.km.

Valeur moyenne retenue pour les court-courriers		0,900
Avion	Kg équ. C par tonne.km	Ecart à la moyenne
A318	1,044	14%
A319	0,765	-18%
A320 - remplissage 1	1,078	17%
A320 - remplissage 2	0,748	-20%

Tableau 60 : facteur d'émission pour le transport de marchandises en avion pour les vols court-courriers

Pour les moyen-courriers, c'est-à-dire les vols compris entre 1000 et 4000 km, cette valeur est de 0,57 kg équivalent carbone par tonne.km.

⁸² Voir abaques en annexe 1

⁸³ Ces chiffres tiennent compte des émissions amont pour le kérosène mentionnées au § 2.2.1

Valeur moyenne retenue pour les moyens-courriers		0,570
Avion	Kg équ. C par tonne.km	Ecart à la moyenne
A300F- remplissage 1	0,504	-13%
A300F- remplissage 2	0,490	-16%
A310	0,689	17%

Tableau 61 : facteur d'émission pour le transport de marchandises en avion pour les vols moyens-courriers

Enfin pour les long-courriers, c'est-à-dire les vols supérieurs à 4000 km, cette valeur est de 0,32 kg équivalent carbone par tonne.km.

Valeur moyenne retenue pour les long-courriers		0,320
Avion	Kg équ. C par tonne.km	Ecart à la moyenne
A330-200	0,358	11%
A340-600	0,341	6%
A340-600	0,273	-17%
A380	0,386	17%
747-400	0,278	-15%

Tableau 62 : facteur d'émission pour le transport de marchandises en avion pour les vols long-courriers

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.

4.3.3 Détermination des distances parcourues par trajet

Lorsque seules les destinations de départ et d'arrivée sont connues, il est possible de reconstituer les distances parcourues grâce à des sites Internet indiqués ci-dessous. 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.wcrl.ars.usda.gov/cec/java/lat-long.htm donne les distances entre deux villes,
- http://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).

4.3.4 Gain ultérieur en précision

A la différence du transport routier où les consommations réelles ont une dispersion relativement faible autour des valeurs moyennes, le transport aérien connaît une dispersion significative autour des consommations moyennes selon les avions et distances parcourues.

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 représentent 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.

4.4 Transport ferroviaire

4.4.1 Généralités

Les émissions de gaz à effet de serre liés à l'emploi des transports ferroviaires proviennent de :

- la fabrication des infrastructures (partiellement la production des rails, mais aussi les travaux de génie civil qui sont nécessaires),
- 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 primaire⁸⁴ 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.

La pertinence de ce choix n'est pas trop contestable en ce qui concerne les infrastructures, généralement anciennes (sauf pour les TGV), mais l'est peut-être plus pour le matériel roulant, qui doit être fabriqué et entretenu.

4.4.2 Personnes

4.4.2.1 Train national

Les données ont été obtenues auprès de la SNCF, qui les tire elle-même de l'étude INFRAS (Zurich) & IWW (Université de Karlsruhe), publiée en mars 2000, avec pour année de référence 1995.

Un **passager.km correspond à 2,3 g équivalent carbone en France**. Ce chiffre tient compte de la manière dont le pays produit son électricité, du coefficient de remplissage moyen du train, et de la proportion du parc de locomotives qui fonctionne au diesel.

⁸⁴ l'énergie primaire est celle qui est utilisée dans la centrale

Notons qu'il recoupe une publication de l'ADEME, parue en décembre 2002⁸⁵, qui donne presque la même valeur (2,8 g équivalent carbone par passager.km).

4.4.2.2 Train express régional

La publication précitée "Evaluations des efficacités énergétiques et environnementales des transports, Ademe 2002" fournit une valeur pour les émissions du transport ferroviaire régional, tenant compte de la forte diésélisation de cette catégorie particulière de transport ferré.

La valeur proposée est de 9,3 g équivalent carbone par passager.km, compte non tenu des émissions de fabrication du train.

4.4.2.3 Train à l'étranger

La même source (étude INFRAS) a été utilisée. Les chiffres sont les suivants (en grammes équivalent carbone par passager.km) :

Pays	Grammes équivalent carbone par passager.km
Allemagne	14,2
Autriche	6,3
Belgique	11,5
Espagne	10,7
Italie	10,5
Pays-Bas	14,6
Royaume-Uni	22,9
Suède	3,2
Suisse	1,0

Tableau 63 : facteurs d'émission par passager.km pour les déplacements en train à l'étranger

4.4.3 Fret

4.4.3.1 En France

La source est la même qu'au § 4.4.2.1.

Une tonne.km en France correspond à 3,0 g équivalent carbone. Ce chiffre tient aussi compte de la manière dont le pays produit son électricité, du coefficient de remplissage moyen du train, et de la proportion du parc de locomotives qui fonctionne au diesel.

4.4.3.2 A l'étranger

La même source (étude INFRAS) a été utilisée. Les chiffres sont les suivants (en grammes équivalent carbone par tonne.km) :

⁸⁵ Evaluations des efficacités énergétiques et environnementales des transports, Ademe 2002

Pays	Grammes équivalent carbone par tonne.km
Allemagne	15,7
Autriche	6,7
Belgique	9,6
Espagne	16,1
Italie	14,9
Pays-Bas	5,9
Royaume-Uni	6,0
Suède	2,3
Suisse	1,0

Tableau 64 : facteurs d'émission par tonne.km pour le fret en train à l'étranger

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 pas connues. Toutefois elles peuvent être reconstituées avec le site servant au calcul des distances routières (§ 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

Pour le transport maritime, les émissions proviennent de :

- la fabrication des bateaux, et leur entretien,
- 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 65 : poids à vide des principaux bateaux

Un gros vraquier, par exemple, pèse 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 20 ans (en fait les bateaux fonctionnent facilement 30 ans), les émissions liées à la fabrication, ramenées à la journée, sont de l'ordre de 2 tonnes équivalent carbone, à comparer à plus de 50 tonnes équivalent carbone 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 ne prendrons donc pas en compte les émissions de fabrication ici.

4.5.2 Emissions spécifiques 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. Leur usage ne concerne que les compagnies pétrolières, à qui la présente méthode n'est pas prioritairement destinée. Nous n'avons pas cherché à calculer de facteurs d'émission pour ces bateaux dans cette version-ci de la méthode.
- 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 Cas des porte-conteneurs

Les porte-conteneurs sont des bateaux qui chargent des marchandises déjà contenues dans des conteneurs, c'est-à-dire des caisses métalliques parallélépipédiques, de telle sorte que les manipulations de chargement et déchargement sont extrêmement simples. Ces bateaux servent pour l'essentiel à transporter des produits manufacturés (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 2 consommations journalières :

- celle correspondant à la force motrice, qui ne s'applique que pour les jours de mer,
- celle correspondant aux besoins autres que la traction (électricité, chauffage de l'équipage, etc), et qui s'applique que le bateau soit en mer ou au port.

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 66 : 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.

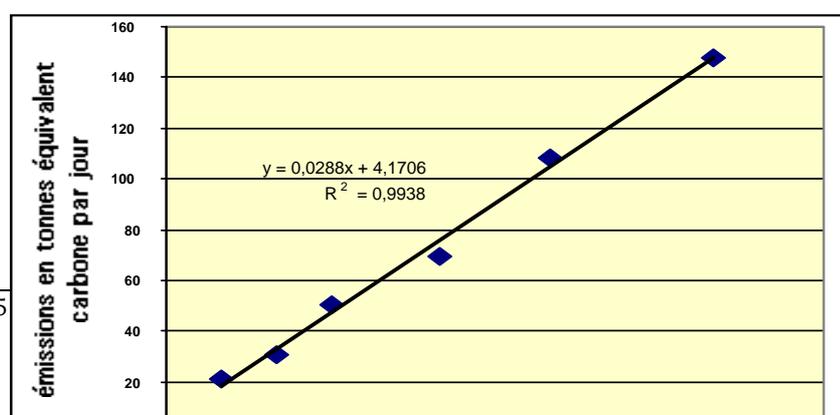


Figure 5 : corrélation entre les émissions quotidiennes d'un porte conteneurs en mer et sa capacité d'emport.

En cas d'usage d'un porte-conteneurs d'une capacité intermédiaire, 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, 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.

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 connues, 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 :

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

Ces émissions seront reportées dans le tableur, les données à renseigner lors de l'élaboration du Bilan Carbone étant alors :

- 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 Cas des vraquiers

Les vraquiers servent au transport des marchandises "en vrac", telles que minerais, 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 67 : 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, toutes choses que les armateurs connaissent, selon la formule :

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

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 Cas des 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 Cas des péniches

Une étude réalisée par le CITEPA⁸⁶ donne une valeur par défaut pour la navigation intérieure, qui est de 52 grammes équivalent CO₂ par tonne de fret transporté, soit 14 grammes équivalent carbone par tonne.km. Il n'est pas précisé ce qui est pris en compte dans ce chiffre ; il est probable que ces émissions soient juste le fait de la combustion du carburant dans le moteur du bateau (sans prendre en compte les émissions amont, la construction du bateau, voire du canal, etc).

Cette valeur, très élevée au regard des autres émissions liées au transport maritime, laisse penser qu'elle ne concerne que les petites péniches, et non les grosses barges.

4.5.3 Calcul des routes maritimes

Tout comme pour les distances routières ou aériennes, il existe un site Internet permettant de connaître la longueur des routes maritimes lorsque les ports de départ et d'arrivée sont connus : www.dataloy.com. Ce site comporte une base de données, qui recense plus de 4.000 ports de commerce dans le monde, et permet de calculer les distances suivies par les bateaux d'un port à l'autre. Les calculs tiennent compte, bien entendu, du contournement des continents, et de toute autre contrainte imposée au bateau.

⁸⁶ Etude sur les pollutions de l'air par les moteurs des bateaux de la navigation intérieure, Sébastien BEGUIER & al., CITEPA, septembre 2000

5 - Prise en compte des matériaux de base entrants et des services tertiaires achetés

5.0 Remarque liminaire pour les matériaux entrants

La production des matériaux de base (verre, acier, autres métaux, plastique, etc) engendre des émissions de gaz à effet de serre essentiellement à cause de l'énergie fossile utilisée dans les processus industriels de fabrication (charbon pour la fabrication d'acier par exemple), et à cause de l'électricité également utilisée dans ces processus (voir § 2.3).

Les facteurs d'émission ont été obtenus de deux manières distinctes :

- soit par le biais d'analyses de cycle de vie déjà publiées, qui sont alors mentionnées,
- soit par calcul direct lorsque les dépenses énergétiques décomposées par source d'énergie utilisée sont connues.

Ces facteurs d'émission ont vocation à être réactualisés en fonction des progrès des industries concernées d'une part, et en fonction de l'acquisition de nouvelles connaissances (notamment la réalisation de "bilans carbone" sectoriels pour les diverses filières de production de matériaux) d'autre part.

Par ailleurs ces facteurs servent dans deux cas :

- pour tenir compte des matériaux entrants,
- pour aboutir à des approximations pour d'autres facteurs d'émission, par exemple dans le cas du transport, comme nous l'avons vu pour l'amortissement des véhicules.

5.1 Acier & métaux ferreux

La production d'acier est une source de gaz à effet de serre essentiellement à cause des émissions de CO₂ engendrées par le charbon lors de la réduction du minerai de fer, et des émissions dues à la combustion du gaz de cokéfaction.

La publication suisse "Cahiers de l'environnement"⁸⁷ fournit des inventaires des émissions dans l'air des gaz à effet de serre suivants : CO₂, N₂O, CH₄, et halocarbures (ces dernières émissions sont marginales) pour deux qualités de métal ferreux :

- l'acier ECCS (electrolytic chrome coated steel),
- le fer blanc.

⁸⁷ Cahiers de l'Environnement, N° 250/I, déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I, Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages, 1998

Il s'agit de métaux essentiellement destinés aux emballages et les inventaires tiennent compte du taux de recyclage.

Toutefois les valeurs obtenues pour ces deux qualités de métaux ferreux sont extrêmement voisines : il faut émettre en moyenne 870 kg équivalent carbone pour produire une tonne d'acier ECCS "neuf" (c'est-à-dire entièrement à partir de minerai de fer), ou de fer-blanc "neuf". Lorsque la production est entièrement faite à partir de ferrailles (donc d'acier recyclé), les émissions sont de 300 kg équivalent carbone par tonne d'acier produite.

Par ailleurs nous disposons des chiffres suivants :

- le contenu énergétique d'une tonne de fonte (CEREN, 1999) : 0,25 tep,
- le contenu énergétique d'une tonne d'acier travaillé (CEREN, 1999) : 0,5 à 1,5 tep
- le contenu énergétique d'une tonne d'acier brut (Enerdata) : 0,4 tep
- le contenu énergétique d'une tonne d'acier brut (Observatoire de l'Énergie, Sessi) : 0,52 tep/, qui se compose de :
 - 289 kWh d'électricité,
 - 0,72 tonnes de houille naturelle et coke de houille,
 - 138 kWh de gaz naturel,
 - 5,3 kg de fioul lourd,
 - 1,6 litres de fioul domestique,

ce qui correspond à des émissions de 0,55 tonne équivalent carbone, hors transport et 2è transformation (acier neuf et recyclé confondus).

Notons enfin que l'agence fédérale américaine "Environment Protection Agency" (EPA) a publié un document⁸⁸ dans lequel elle donne une valeur comprise entre 790 kg et 970 kg équivalent carbone par tonne pour les canettes en acier (sans précision sur les gaz retenus), ce qui est cohérent avec les chiffres mentionnés ci-dessus.

Compte tenu de ces chiffres qui sont tous du même ordre, nous prendrons comme valeur de référence celle donnée par la publication suisse, soit **870 kg de C** pour une tonne d'acier en première fonte, et **300 kg de C** pour une tonne d'acier entièrement issue du recyclage (c'est-à-dire entièrement faite à partir d'acier recyclé, ou en d'autres termes de ferrailles).

Pour une tonne d'acier partiellement composée d'acier recyclé, à supposer que l'on connaisse le taux de ferrailles (ou de recyclé) X% dans la matière première, on prendra l'interpolation suivante :

$$\text{Kg équivalent carbone par tonne d'acier} = 300 * X\% + 870 * (1-X\%)$$

⁸⁸ Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998

Notons qu'avec un taux de recyclé de l'ordre de 50% (c'est-à-dire que la production d'acier comporte alors 50% de ferrailles et 50% de minerai de fer dans les matières premières), nous obtenons une valeur de 585 kg équivalent carbone par tonne d'acier, très proche de la valeur découlant des données de l'Observatoire de l'Energie, obtenue pour la production française qui, précisément, comporte un taux de ferrailles de l'ordre de 50% dans les matières premières utilisées (le reste est bien entendu du minerai de fer).

Compte tenu de la bonne concordance entre ces valeurs, et de la concordance avec une autre publication utilisée au § 5.3 ci-dessous⁸⁹, l'incertitude sur le facteur d'émission est prise égale à 10%.

5.2 Aluminium

La production d'aluminium est une source de gaz à effet de serre à cause de l'énergie utilisée d'une part (production de chaleur dans l'entreprise, et production d'électricité en dehors), et d'émanation de perfluorocarbures (notamment du CF₄) lors de l'électrolyse de l'alumine (à laquelle on ajoute des additifs fluorés pour cette opération) d'autre part.

Les émissions ont été obtenues dans la même publication suisse "Cahiers de l'environnement, 250/I". Elles concernent le CO₂, le CH₄, le N₂O, et les halocarbures, (notamment le CF₄).

Les données permettent de tenir compte du taux de recyclé (il est aussi possible de produire de l'aluminium à partir de ferrailles d'aluminium, bien sûr), et d'une répartition des énergies primaires pour la production d'électricité qui correspond *grosso modo* à la moyenne européenne.

Enfin les chiffres concernent l'aluminium en lingots (avant transformation en produits finis). Toutefois les données pour les feuilles d'aluminium ne sont pas différentes de plus de quelques % de celles pour les lingots (c'est-à-dire moins que la variation due à la provenance de l'électricité) : on pourra donc utiliser les chiffres ci-dessous pour toute prise en compte d'aluminium sous forme "brute" (feuilles, lingots, barres).

Les facteurs d'émission vont de 2,89 tonnes équivalent carbone par tonne d'aluminium entièrement produite à partir de bauxite, à 0,67 tonne équivalent carbone par tonne d'aluminium issu à 100% à partir d'aluminium recyclé.

De même que ci-dessus, une interpolation peut être réalisée pour un aluminium partiellement issu du recyclage, avec la formule suivante, où X% représente le taux de recyclé (c'est-à-dire la proportion de ferrailles d'aluminium dans les matières premières, le reste étant de la première fonte à partir de bauxite) :

$$\text{Kg équivalent carbone par tonne d'aluminium} = 670 * X\% + 2890 * (1-X\%)$$

⁸⁹ CSIRO Sustainability Network, Update 30E, août 2003.

La production d'aluminium étant très consommatrice en électricité, et les facteurs d'émission pour l'électricité étant susceptibles de varier d'un facteur 10 d'un pays à un autre (voir § 2.3), les émissions réelles correspondant à la production d'une tonne d'aluminium sont susceptibles de varier très fortement selon les circonstances. Par exemple, en Australie, avec un taux de recyclé de 22%, mais une électricité entièrement au charbon, les émissions sont supérieures à 6 tonnes équivalent carbone par tonne d'aluminium.

Aux Etats-Unis, l'Environment Protection Agency, agence fédérale américaine chargée des questions d'environnement⁹⁰, précise que pour les canettes d'aluminium produites aux USA, les valeurs sont les suivantes :

- 3,9 tonnes équivalent carbone par tonne d'aluminium si ce dernier est entièrement issu de minerai,
- 0,7 tonne équivalent carbone par tonne d'aluminium si ce dernier est entièrement issu du recyclage⁹¹.

Sachant que les facteurs d'émission moyens pour l'électricité aux USA sont 30% plus élevés que la moyenne européenne, environ 3 tonnes équivalent carbone par tonne d'aluminium semble donc une valeur acceptable pour de l'aluminium entièrement issu de la bauxite en Europe.

Enfin notons que l'électricité en Suisse est produite avec peu d'émissions de gaz à effet de serre, comme en France (la Suisse n'a pratiquement que des centrales nucléaires ou hydroélectriques, voir annexe 1), et donc que la publication suisse prend en compte une part de fabrication locale avec une électricité dont le facteur d'émission est voisin de ce que nous avons en France.

Nous retiendrons donc la valeur proposée par l'inventaire suisse : **2.890 kg équivalent carbone** par tonne d'aluminium entièrement issu de la bauxite ; **670 kg équivalent carbone** par tonne d'aluminium issue à 100% du recyclage. Cette valeur est applicable pour tout l'aluminium produit en Europe, mais pas pour celui produit en Asie.

La formule ci-dessus permettra de retenir une valeur intermédiaire lorsque l'aluminium utilisé est partiellement issu de recyclage de ferrailles d'aluminium.

⁹⁰ www.epa.gov

⁹¹ Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998

5.3 Autres métaux

Il n'existe pas beaucoup d'analyses de cycle de vie aisément disponibles pour les autres métaux. Une publication australienne⁹² permet d'obtenir les valeurs moyennes suivantes pour divers métaux courants, y compris l'acier et l'aluminium, mais sur la base d'une électricité entièrement produite au charbon (ce qui correspond à la situation australienne) :

Métal	Kg équivalent carbone par kg de métal	Taux de recyclage pris en compte (Australie seule pour l'acier et l'aluminium, monde entier pour le reste)
Acier	0,63	36%
Aluminium	6,11	22%
Cuivre, procédé 1	0,90	40%
Cuivre, procédé 2	1,69	40%
Plomb, procédé 1	0,57	47%
Plomb, procédé 2	0,87	47%
Zinc, procédé 1	1,25	36%
Zinc, procédé 2	0,90	36%
Nickel, procédé 1	3,11	34%
Nickel, procédé 2	4,39	34%

Tableau 68 : facteurs d'émission pour différents types de métaux produits en Australie.

Pour la France, le CEREN nous donne des consommations énergétiques par secteur d'activité (sur la base des codes NAF)⁹³, discriminées entre combustibles fossiles et électricité, et rapportées à la tonne de métal produite ou travaillée.

En considérant que chaque tonne équivalent pétrole de combustibles fossiles utilisée dans l'industrie engendre 0,76 tonne équivalent carbone d'émissions de gaz à effet de serre⁹⁴, et en supposant que chaque kWh d'électricité utilisé engendre des émissions de 96 g équivalent carbone (ce qui correspond à la moyenne européenne), il est possible d'aboutir à des valeurs par tonne de métal détaillées ci-dessous :

Code NAF	Libellé exact de l'activité	Consommation de combustibles en tep/tonne	Emissions CO ₂ combustibles en tC/tonne	Consommation d'électricité en tep/tonne ⁹⁵	Emissions CO ₂ électricité en tC/tonne	Emissions CO ₂ totales en tC/tonne
27.4F	Plomb première et deuxième fusion	0,17	0,13	0,02	0,02	0,15
27.4F	Zinc	0,29	0,22	0,25	0,28	0,50
27.4J	Cuivre	0,16	0,12	0,05	0,05	0,18
27.4M	Nickel	0,88	0,67	0,45	0,50	1,17
27.4G	1 ^{ère} transformation plomb et zinc	0,19	0,14	0,03	0,03	0,18
27.4K	Première transformation du cuivre	0,06	0,04	0,04	0,05	0,09

Tableau 69 : facteurs d'émission pour différentes activités métallurgique.(CEREN – 1999)

⁹² CSIRO Sustainability Network, Update 30E, août 2003.

⁹³ Contenu énergétique des produits de base de l'industrie, les matériaux de construction, juillet 1999

⁹⁴ contenu en carbone découlant du mix énergétique moyen de l'industrie pour les combustibles fossiles : 19% de charbon, 27% de fioul, 49% de gaz, 5% de renouvelables et divers.

⁹⁵ sur la base de l'énergie finale, soit 1 tep = 11.600 kWh

En "fusionnant" les diverses activités relatives au même métal nous aboutissons alors à une autre approximation, qui est la suivante, et qui est nécessairement une borne inférieure, puisque ne tenant pas compte de la part minière (il n'y a quasiment pas de mines de métaux en France, à l'exception du Nickel en Nouvelle Calédonie) :

Métal	Emissions CO ₂ totales en tC/tonne
Plomb	0,33
Zinc	0,68
Cuivre	0,27
Nickel	1,17

Tableau 70 : calcul des facteurs d'émission pour différents métaux sans tenir compte de la part minière

Par ailleurs le mémento des décideurs de la MIES fournit un chiffre pour le cuivre, qui est de 280 kg équivalent carbone par tonne. Ce même mémento donne aussi 436 kg équivalent carbone par tonne d'acier, et 1,8 tonne équivalent carbone par tonne d'aluminium.

Si nous reprenons toutes les valeurs proposées, nous pouvons arriver au tableau de synthèse suivant, avec la mention de la part de l'électricité (celle qui conduit aux plus grands écarts) pour les chiffres du CEREN :

Métal	Borne inférieure (CEREN)	Borne inférieure (Australie)	Borne supérieure (Australie)	Part de l'électricité consommée, pour les valeurs CEREN
Plomb	0,33	0,57	0,87	10%
Zinc	0,68	0,9	1,25	40%
Cuivre	0,27	0,9	1,69	25%
Nickel	1,17	3,11	4,39	34%

Tableau 71 : récapitulatif des facteurs d'émission de la production de différents types de métaux.

Sachant que les chiffres du CEREN ne tiennent pas compte de l'activité minière amont, ni du transport, mais que par contre une partie significative de ces métaux sont importés déjà produits (et non sous forme de minerai), nous pouvons alors retenir des valeurs comprises entre les valeurs "basses" pour l'Australie (où, rappelons-le, l'électricité est essentiellement produite à base de charbon) et les valeurs du CEREN.

Cela donne ce qui est rassemblé dans le tableau ci-dessous (nous retenons la valeur médiane d'une fourchette large, avec un facteur d'incertitude qui reflète l'ampleur de la fourchette) :

Métal	Valeur retenue (kg équivalent carbone par kg de métal)	Incertainie retenue
Plomb	0,57	30%
Zinc	0,80	20%
Cuivre	0,80	50%
Nickel	2,50	30%

Tableau 72 : synthèse des facteurs d'émission retenues pour la production de différents types de métaux

Il s'agit très clairement de valeurs approximatives, et il serait fort opportun de réaliser des bilans carbone de filière plus approfondis.

Enfin les métaux non listés ci-dessus se verront affecter, à titre conservatoire, un facteur d'émission de 1000 kg équivalent carbone par tonne et un facteur d'incertitude de 80%.

5.4 Plastiques

L'association européenne des producteurs de plastique (en Anglais Association of Plastic Manufacturers in Europe, APME⁹⁶) propose des analyses de cycle de vie donnant les émissions dans l'air de CO₂, méthane, N₂O et halocarbures (ces dernières étant généralement négligeables, elles ne sont pas reprises ci-dessous) associées à la production d'un certain nombre de produits chimiques de base et de matières plastiques.

5.4.1.1 Polystyrène

Nous reproduisons ci-dessous les émissions dans l'air associées à la production du polystyrène (non expansé, avant transformation en produit fini)⁹⁷.

Emissions dans l'air liées à la production d'une tonne de polystyrène			
Gaz	PRG/CO ₂	Emissions (g/tonne)	kg équivalent C par tonne produite
Méthane	21	11.000	63,00
N ₂ O	310	0	0,00
CO ₂	1	2.600.000	709,09
Total kg équivalent carbone			772,09

Tableau 73 : facteur d'émission de la production de Polystyrène.

⁹⁶ <http://lca.apme.org>

⁹⁷ Eco-profiles in the european industry - report 4 : polystyrene (second edition), Dr. I. Boustead, april 1997 - Il s'agit de polystyrène GPPS (General Purpose Polystyrene) : polystyrène pur, contenant peu d'additifs ; produit clair et cassant.

Notons que les PRG utilisés pour le méthane et le N₂O sont ceux de 1995, mais utiliser ceux de 2001 ne change la valeur finale que de 1% environ. Faute de disposer d'autres sources, nous retiendrons la valeur proposée ci-dessus pour le polystyrène : **770 kg équivalent carbone par tonne**.

Le styrène est à 737 kg équivalent carbone par tonne selon cette même source.

5.4.1.2 Polychlorure de Vinyle

Un papier issu de la même association⁹⁸ donne les valeurs suivantes pour les émissions des principaux gaz à effet de serre lors de la production de Polychlorure de Vinyle (avant transformation en produit fini) :

Emissions dans l'air liées à la production d'une tonne de polychlorure de vinyle			
Gaz	PRG/CO ₂	Emissions (g/tonne)	kg équivalent C par tonne produite
Méthane	21	6.300	36,08
N ₂ O	310		0,00
CO ₂	1	1.800.000	490,91
Total kg équivalent carbone			526,99

Tableau 74 : facteur d'émission de la production de Polychlorure de vinyle.

De même que ci-dessus, nous retiendrons la valeur proposée de **520 kg équivalent carbone par tonne**.

5.4.1.3 Polyéthylène haute densité

Une autre publication de l'APME disponible sur leur site Internet⁹⁹ indique que la production d'une tonne de polyéthylène haute densité conduit à des émissions de 500 kg équivalent carbone par tonne (avant transformation en produit fini).

Emissions dans l'air liées à la production d'une tonne de polyéthylène haute densité			
Gaz	PRG/CO ₂	Emissions (g/tonne)	kg équivalent C par tonne produite
Méthane	21	5.700	32,65
N ₂ O	310	0	0,00
CO ₂	1	1.700.000	463,64
Total équivalent carbone			496,28

Tableau 75 : facteur d'émission de la production de Polystyrène haute densité. (APME – 1998)

⁹⁸ Eco-profiles in the european industry - report 6 : Polyvinyl Chloride (second edition), Dr. I. Boustead, May 1998

⁹⁹ Eco-profiles in the european industry, Dr. I. Boustead, 1999

L'Environment Protection Agency (EPA) a fait faire deux analyses de cycle de vie différentes pour le polyéthylène haute densité¹⁰⁰, mais sans précision sur les gaz à effet de serre retenus, aboutissant à des émissions respectives de 500 et 790 kg équivalent carbone par tonne.

Nous retiendrons donc la valeur arrondie de l'APME pour le polyéthylène haute densité : **500 kg équivalent carbone par tonne.**

L'EPA propose également une valeur pour le polyéthylène haute densité issu à 100% du recyclage : **250 kg équivalent carbone par tonne**, que nous retiendrons faute de disposer d'autres sources.

Une formule d'interpolation, identique dans le principe à ce qui est utilisé pour l'acier ou l'aluminium (voir § 5.1 ou 5.2), permettra de tenir compte d'un taux de recyclé variable.

5.4.1.4 Polyéthylène basse densité

La même publication que ci-dessus de l'APME propose la valeur de 550 kg équivalent carbone par tonne¹⁰¹ pour la production d'une tonne de polyéthylène basse densité (avant transformation en produit fini), ainsi qu'il suit.

Emissions dans l'air liées à la production d'une tonne de polyéthylène basse densité			
Gaz	PRG/CO ₂	Emissions (g/tonne)	kg équivalent C par tonne produite
Méthane	21	5.800	33,22
N ₂ O	310	0	0,00
CO ₂	1	1.900.000	518,18
Total équivalent carbone			551,40

Tableau 76 : facteur d'émission de la production de Polystyrène basse densité.

Le document déjà cité de l'EPA¹⁰² propose quand à lui respectivement 630 et 1.050 kg de C/tonne.

Nous retiendrons la valeur de l'APME, soit **550 kg équivalent carbone par tonne.**

Le document de l'EPA propose également une valeur pour le polyéthylène basse densité issu du recyclage : **230 kg équivalent carbone par tonne**, que nous retiendrons faute de disposer d'autres sources.

Ici encore une interpolation linéaire permettra de tenir compte d'un taux de recyclé variable.

¹⁰⁰ Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998

¹⁰¹ Eco-profiles in the european industry, Dr. I. Boustead, 1999

¹⁰² Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998

5.4.1.5 Polyéthylène terephthalate

Une autre publication de l'APME disponible sur leur site Internet¹⁰³ donne les émissions dans l'air liées à la production d'une tonne de Polyéthylène terephthalate.

Emissions dans l'air liées à la production d'une tonne de Polyéthylène terephthalate amorphe			
Gaz	PRG/CO ₂	Emissions (g/tonne)	kg équivalent C par tonne produite
Méthane	21	10.000	57,27
N ₂ O	310	0	0,00
CO ₂	1	4.100.000	1 118,18
Total équivalent carbone			1 175,45

Tableau 77 : facteur d'émission de la production de Polyéthylène terephthalate amorphe.

Emissions dans l'air liées à la production d'une tonne de Polyéthylène terephthalate qualité bouteille			
Gaz	PRG/CO ₂	Emissions (g/tonne)	kg équivalent C par tonne produite
Méthane	21	10.000	57,27
N ₂ O	310	0	0,00
CO ₂	1	4.300.000	1 172,73
Total équivalent carbone			1 230,00

Tableau 78 : facteur d'émission de la production de Polyéthylène terephthalate (bouteille).

Emissions dans l'air liées à la production d'une tonne de film de Polyéthylène terephthalate			
Gaz	PRG/CO ₂	Emissions (g/tonne)	kg équivalent C par tonne produite
Méthane	21	21.000	120,27
N ₂ O	310	0	0,00
CO ₂	1	5.500.000	1 500,00
Total équivalent carbone			1 620,27

Tableau 79 : facteur d'émission de la production de Polyéthylène terephthalate (film).

Enfin, de même que ci-dessus, le document déjà cité de l'EPA propose respectivement 980 et 1290 kg équivalent carbone par tonne pour la même production d'une tonne de polyéthylène terephthalate (PET).

A titre conservatoire nous retiendrons donc les valeurs suivantes :

- PET amorphe : **1.175 kg équivalent carbone par tonne**
- PET qualité bouteille : **1.230 kg équivalent carbone par tonne**
- PET valeur moyenne : **1.200 kg équivalent carbone par tonne**
- PET en film : **1.600 kg équivalent carbone par tonne** (après transformation en film).

¹⁰³ Eco-profiles in the european industry, Dr. I. Boustead, année de publication 1999, année de référence 1995

Pour le PET issu du recyclage, nous retiendrons la seule valeur disponible (issue du document de l'EPA), soit **400 kg équivalent carbone par tonne**.

Une interpolation linéaire permettra ici aussi de tenir compte d'un taux de recyclé variable.

5.4.1.6 Nylon

Nous donnons, à titre indicatif, les émissions dans l'air associées à la production de Nylon fournies également par l'APME¹⁰⁴, car cela permet de fixer les idées en ce qui concerne un produit plus sophistiqué que les plastiques de base.

Emissions dans l'air liées à la production d'une tonne de Nylon 66			
Gaz	PRG/CO ₂	Emissions (g/tonne)	kg équivalent C par tonne produite
Méthane	21	24.000	137,45
N ₂ O	310	740	62,56
CO ₂	1	6.900.000	1 881,82
Total équivalent carbone			2 081,84

Tableau 80 : facteur d'émission de la production de Nylon 66.

5.4.1.7 valeurs moyennes

Il peut arriver que, lors d'un Bilan Carbone, la décomposition par type de plastique utilisé ne soit pas commode à réaliser (par exemple pour tenir compte des emballages en plastique pour les produits achetés, pour lesquels la composition ne figure pas). Il faut alors recourir à une valeur moyenne, représentant les émissions moyennes liées à la production d'une tonne de plastique. Il s'agit, en quelque sorte, d'une valeur tenant compte des tonnages respectifs des différentes qualités de plastique et des facteurs d'émission par plastique.

Le mémento des décideurs de la MIES¹⁰⁵ donne une **valeur moyenne pour le plastique de 640 kg équivalent carbone par tonne**. Ce montant étant cohérent avec les valeurs obtenues ci-dessus pour les plastiques les plus courants, nous la retiendrons, faute de mieux, lorsque le type de plastique n'est pas connu. Il n'est pas précisé dans le document de la MIES quels sont les gaz pris en compte.

5.5 Verre

Le premier jeu de données dont nous disposons pour estimer les émissions liées à la production d'une tonne de verre concerne les contenus énergétiques des produits de base donnés par le CEREN (année de référence : 1995)¹⁰⁶.

¹⁰⁴ Eco-profiles in the european industry, Dr. I. Boustead, année de publication 1999, année de référence 1995

¹⁰⁵ Memento des décideurs, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, juin 1999

¹⁰⁶ Energies par produit, CEREN, 1999

En utilisant la répartition énergétique moyenne en France pour les énergies primaires hors électricité¹⁰⁷, on peut convertir le "contenu en énergie" du verre en "contenu en équivalent carbone" pour le seul CO₂.

Cela donne le tableau suivant :

Type de produit	Tonnes équivalent carbone par tonne de verre
verre creux : bouteille bonbonne	0,145
verre plat	0,171
verre main	1,612
verre technique	0,555
fibre de verre	0,228

Tableau 81 : facteur d'émission de la production de différents produits verriers.(CEREN 95)

Le CEREN donne également une consommation énergétique moyenne pour le code NAF correspondant au verre¹⁰⁸ qui est de l'ordre de 0,35 tep/tonne. Sur la base du mix énergétique standard de l'industrie, cela conduit, pour le seul CO₂, à 266 kg équivalent carbone par tonne, ce qui est bien d'un ordre de grandeur compatible avec ce qui figure ci-dessus.

L'Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (Suisse) fournit quant à lui des analyses de cycle de vie pour plusieurs qualités de verre, sans précision sur leur forme ou leur emploi, mais qui prennent en compte tous les gaz possibles et qui intègrent le taux de recyclage moyen par type de produit.

Type de verre	Tonnes d'équivalent carbone par tonne
Verre vert (comportant 99% de verre recyclé)	0,163
Verre brun (comportant 61% de verre recyclé)	0,213
Verre incolore (comportant 55% de verre recyclé)	0,209

Tableau 82 : facteur d'émission de la production de différents types de verres(OFEFP)

Une interpolation linéaire sur les valeurs ci-dessus conduit à attribuer au verre issu à 100% de matériaux bruts (c'est à dire sans incorporation de verre recyclé) la valeur d'environ 280 kg équivalent carbone par tonne de verre.

¹⁰⁷ 19% de charbon, 27% de fioul, 49% de gaz, 5% de renouvelables et divers

¹⁰⁸ C'est à dire pour la moyenne de consommation énergétique par tonne de produit vendu de toutes les entreprises du secteur "verre"

Le mémento des décideurs de la MIES¹⁰⁹ indique également des valeurs moyennes, sans préciser les gaz retenus :

Type de produit	Tonnes d'équivalent carbone par tonne
Verre plat	0,414
Laine de verre	0,580

Tableau 83 : facteur d'émission de la production de verre plat et de laine de verre – valeurs MIES 1999

Enfin l'EPA¹¹⁰ propose la valeur de 120 kg équivalent carbone par tonne de verre bouteille, sans préciser les gaz retenus, que l'on peut rapprocher des chiffres du CEREN tirés de l'énergie utilisée.

Nous retiendrons donc les chiffres suivants :

- verre bouteille : 120 kg équivalent carbone par tonne (EPA)
- verre plat : 414 kg équivalent carbone par tonne (MIES).
- laine de verre : 580 kg équivalent carbone par tonne (MIES),
- valeur moyenne par défaut : 280 kg équivalent carbone par tonne (OFEFP),
- verre recyclé (hors bouteilles) : 165 kg équivalent carbone par tonne (OFEFP).

Pour les **verres techniques**, nous ferons une interpolation sur la base des autres verres, en constatant qu'il y a un facteur 2,5 environ entre les émissions provenant des seules consommations énergétiques des entreprises situées en France (CEREN) et les émissions (supposées complètes) données par la MIES. En restant prudent quand à cette extrapolation cela nous amène à environ **1.000 kg équivalent carbone par tonne** pour cette catégorie.

5.6 Matériaux de construction

5.6.1 Ciment, béton

Enerdata, bureau d'études spécialisé dans les questions d'énergie¹¹¹, indique qu'il est nécessaire d'avoir une dépense énergétique d'environ 0,1 tep pour aboutir à une tonne de ciment, ce qui correspond à des émissions de CO₂ représentant environ 100 kg équivalent carbone par tonne en utilisant des combustibles très carbonés (vieux pneus, charbon, fioul lourd, etc).

¹⁰⁹ Memento des décideurs, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, juin 1999

¹¹⁰ Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998

¹¹¹ <http://www.enerdata.grenet.fr/>

A partir du contenu en énergie du produit publié par le CEREN¹¹², on peut calculer qu'une tonne de clinkers (constituant prépondérant du ciment) conduit à l'émission de CO₂ à hauteur d'environ 70 kg équivalent carbone par tonne, donc une valeur proche.

Dans les deux cas de figure, la seule approche par les dépenses énergétiques ne permet pas de prendre en compte les émissions non énergétiques de cette industrie. En effet, l'industrie cimentière obtient sa matière première par décarbonatation du carbonate de calcium (CaCO₃) ce qui engendre des émissions de CO₂ dit "non énergétique", c'est à dire qui ne découle pas d'une utilisation d'énergie.

Dans le mémento des décideurs, la MIES donne une valeur de 235 kg équivalent carbone par tonne (décarbonatation comprise, donc)¹¹³, sans toutefois préciser si d'autres gaz à effet de serre sont pris en compte.

Enfin un rapide calcul effectué avec les documents proposés par l'initiative GHGprotocol¹¹⁴ donne environ 250 kg équivalent carbone par tonne (on peut supposer que tous les gaz sont pris en compte).

On retiendra donc la valeur de **235 kg équivalent carbone par tonne** proposée par la MIES. Notons au passage que les émissions non énergétiques représentent un peu plus que les émissions énergétiques (135 kg équivalent carbone par tonne contre 100 en gros).

Ici aussi, la publication d'un "Bilan Carbone" de filière serait utile.

5.6.2 Autres matériaux

5.6.2.1 Pierres

Selon le CEREN, les consommations énergétiques liées à l'extraction des pierres sont faibles par unité de poids¹¹⁵. Les émissions de filière sont essentiellement dues au transport, or les matériaux de construction sont classiquement des matériaux qui circulent assez peu (sauf exception pour des matériaux très rares). Compte tenu des valeurs obtenues pour les matériaux routiers de type graves (voir § 9.2.1) qui sont de l'ordre de 5 kg équivalent carbone par tonne hors transport, et compte tenu du fait que les granulats nécessitent normalement plus de traitement que la pierre, on retiendra de manière provisoire **3 kg équivalent carbone par tonne** hors transport.

Ces chiffres ne sont à considérer que comme des premières estimations et sont donc entachés d'une incertitude de 80%.

5.6.2.2 Autres matériaux de construction : valeur moyenne

¹¹² Energies par produit, CEREN, 1999

¹¹³ Memento des décideurs, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, juin 1999

¹¹⁴ www.ghgprotocol.org

¹¹⁵ Energies par produit, CEREN, 1999

A titre conservatoire, les briques et tuiles seront provisoirement assimilées au béton, soit environ **250 kg équivalent carbone par tonne**.

5.6.2.3 Bois

Le bois stockant le carbone, l'emploi du bois comme matériau d'œuvre permet de bénéficier d'un "puits de carbone", c'est-à-dire qu'au lieu d'être crédité d'émissions positives, l'emploi du bois d'œuvre permet d'être crédité d'émissions négatives.

Le bois d'œuvre est celui qui sert à faire des biens durables : charpentes de maisons, meubles, etc. En pareil cas, le carbone contenu dans les arbres coupés ne retourne pas dans l'atmosphère (il reste dans l'ouvrage réalisé avec du bois), alors que dans le même temps d'autres arbres se mettent à pousser à la place de ceux qui ont été coupés, contribuant ainsi à soustraire du CO₂ de l'atmosphère au lieu d'en rajouter.

Il y a toutefois une condition expresse pour que le bois d'œuvre corresponde à un puits : il faut qu'il provienne d'une forêt "bien gérée", c'est-à-dire d'une forêt où les coupes et les plantations se compensent.

En effet, en l'absence de replantation (ou de régénération naturelle), le fait de couper un arbre pour le transformer en charpente ne fait que déplacer un stock existant, mais n'en reconstitue aucun.

En ce qui concerne les bois exotiques, qui proviennent de forêts qui ne sont généralement pas bien gérées, et où les coupes ne sont pas compensées par des plantations (puisque la surface diminue), on ne peut donc parler de puits de carbone. En fait il est même probable que l'exploitation d'une tonne de bois exotique conduise à des émissions nettes significatives : pour pouvoir exploiter les quelques espèces commercialement intéressantes (pas plus de quelques exemplaires à l'hectare), les forestiers construisent des pistes qui, par la suite, servent à des paysans pour aller défricher le reste de la forêt, ce qui cause des émissions significatives de CO₂.

Le seul cas de figure où le bois est un puits est donc celui où l'exploitant replante ; concrètement, faute de savoir ce que fait l'exploitant, on se limitera à appliquer cette valeur à du bois de provenance européenne (les forêts européennes sont globalement à peu près bien gérées).

Dans ce cas, la valeur retenue est celle figurant dans le memento des décideurs de la MIES, à savoir **-500 kg équivalent carbone par tonne**¹¹⁶.

5.7 Papiers et cartons

Selon la publication de l'Office Suisse du Paysage¹¹⁷, citée plus haut, les émissions dans l'air (tous gaz pris en compte) pour produire une tonne de produit fini sont de l'ordre de quelques

¹¹⁶ Memento des décideurs, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, juin 1999

¹¹⁷ Cahiers de l'Environnement, N° 250/I, déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I, Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages

centaines de kg de C (varie en fonction des qualités de papier ou de carton), sans compter les émissions de méthane liées au traitement des eaux usées, or la production de papier et de carton produit des eaux usées lourdement chargées en produits organiques, qui conduiront par la suite à des émissions de méthane.

L'Environment Protection Agency donne une valeur de 0,55 tonne équivalent carbone par tonne de papier (sans recyclage) et 0,5 tonne équivalent carbone par tonne de carton¹¹⁸, sans préciser quels sont les gaz à effet de serre retenus.

Si la pulpe est issue du recyclage, les valeurs fournies par l'EPA restent du même ordre : 500 kg équivalent carbone par tonne¹¹⁹. Elles sont mêmes supérieures dans certains cas, conséquence probable d'opérations de préparation (désencrage, etc) aussi énergivores que les opérations liées à la production de pâte à papier à partir de pulpe de bois.

Sachant que l'énergie utilisée pour faire du papier ou du carton est essentiellement fossile (4/5è du total¹²⁰), nous retiendrons provisoirement les chiffres de l'EPA, dont on suppose qu'ils intègrent les émissions de méthane liées aux eaux usées :

- **550 kg équivalent carbone par tonne de papier** (quel que soit le type : papier journal, ramettes, etc)
- **500 kg équivalent carbone par tonne de carton.**

Notons que le contenu en gaz à effet de serre du papier de type "essuie-tout" ou "serviettes en papier" est environ le double selon l'EPA.

Ici aussi, un bilan de filière pour les émissions de gaz à effet de serre serait fort opportun.

5.8 Services tertiaires

5.8.1 Remarque liminaire

Les services désignent une très large variété de prestations : informatique, gardiennage, téléphone, hôtellerie, voire garde d'enfants assurée par l'entreprise....

La prise en compte proposée ici n'a pas d'autre ambition que de donner un ordre de grandeur pour les services qui correspondent à de l'emploi de bureau (informatique, assurances, services bancaires, etc).

Si les services considérés sont fortement "haut de gamme" (publicité, consultants, etc) et requièrent des déplacements en avion de manière significative, ou de l'hôtellerie "haut de gamme", il est vraisemblable que le ratio proposé ci-dessous ne sera pas valide.

Le facteur d'émission proposé ici n'a donc qu'un seul objectif : vous permettre de voir si les dépenses de services sont susceptibles, ou non, de constituer un poste important du total.

¹¹⁸ Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998

¹¹⁹ Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998

¹²⁰ Energies par produit, CEREN, 1999

Si la réponse est non, la valeur absolue n'a pas beaucoup d'importance, mais si la réponse est oui, le seul enseignement à en tirer est qu'il est nécessaire de faire faire un "Bilan Carbone" à vos principaux prestataires.

5.8.2 Ratio proposé

Dans une étude sur la demande énergétique, le CNRS indique qu'en 1990 le secteur des postes et télécoms a consommé 1.188.000 tonnes d'équivalent pétrole pour un chiffre d'affaires de 102.386 MF. Ce nombre tient compte des intrants (véhicules, transports, etc).

Comme par ailleurs la consommation d'énergie primaire en France est pour 40% de l'électricité, nous prendrons pour le secteur ci-dessus un ratio de 50% faute de mieux (le tertiaire consomme proportionnellement plus d'électricité que les transports ou l'industrie).

L'électricité étant comptée pour 0 dans les émissions, en première approximation, il en ressort qu'une tep dans le tertiaire engendre des émissions de 0,38 tonne équivalent carbone.

On arrive au fait qu'un MF de postes et télécoms correspond à l'émission de 4,4 tonnes équivalent carbone. Cela peut permettre, par analogie, de fixer les idées pour les services de manière générale.

Notons que 1.188.000 tonnes d'équivalent pétrole pour 102.386 MF, cela amène à 11,6 tep par MF, soit (en supposant que l'on ait 250 kF par salarié dans ce secteur) environ 3 tep par salarié tout compris, ce qui est cohérent avec les ordres de grandeur connus par ailleurs, ainsi qu'avec le premier Bilan Carbone effectué dans une entité tertiaire.

5.8.3 Dépense informatique, services divers

Faute d'avoir réalisé des bilans carbone de filière, nous prendrons l'approximation des postes et télécoms pour les services divers : informatique (qui est probablement au-dessus, à cause des émissions significatives liées à la fabrication des ordinateurs), honoraires, formation, etc.

6 - Prise en compte des autres produits entrants : produits servant aux activités agricoles, d'élevage, et agro-alimentaires

6.1 Remarque liminaire

Les facteurs d'émission ont été obtenus essentiellement en essayant de faire des bilans simplifiés de filière, et en retenant les émissions prépondérantes de gaz carbonique issu de l'usage de combustibles fossiles, ou des autres gaz à effet de serre éventuellement concernés.

Par contre, les émissions de CO₂ d'origine non fossile ne sont pas prises en compte dans les calculs. Par exemple, n'interviendront pas :

- la respiration des animaux (le CITEPA estime que la respiration des humains et animaux représente environ un tiers des émissions fossiles¹²¹),
- les flux de carbone organique à rotation rapide, liés aux cultures annuelles (une plante pousse puis est consommée par les animaux ou les hommes et le carbone correspondant est restitué au milieu ambiant dans l'année par la respiration et les excréments, en première approximation),
- les flux de carbone liés aux cultures pérennes (sylviculture notamment) dès lors que le bois coupé est remplacé par nouveaux plants (par contre la déforestation intervient comme une émission nette).

Il s'agit bien entendu d'un raisonnement approximatif, acceptable pour une première démarche, mais bon nombre de facteurs retenus doivent l'être à titre provisoire, et il serait éminemment opportun de réaliser des bilans de filière, surtout quand on sait que l'agriculture est en France le premier poste d'émission brute de gaz à effet de serre (tous gaz confondus), devant les transports ou l'industrie¹²².

Les "contenus en carbone" obtenus vont essentiellement servir dans les deux cas suivants :

- pour les matériaux entrants de l'industrie agroalimentaire¹²³,
- pour l'approche "Bilan Carbone" d'un restaurant (dont un restaurant du personnel).

Enfin tous les facteurs d'émission présentés dans ce chapitre 6 sont affectés d'un coefficient d'incertitude de 30%.

¹²¹ La France face à ses objectifs internationaux, CITEPA, Août 1999

¹²² Inventaire SECTEN du CITEPA, 2001.

¹²³ Une note récente de l'IFEN indique par ailleurs que l'agro-alimentaire est le "plus mauvais élève de la classe industrielle" en ce qui concerne l'augmentation de ses émissions propres de gaz à effet de serre par rapport à l'augmentation de sa valeur ajoutée produite.

6.2 Engrais

Une publication suisse, de la Station Fédérale de Recherches en Economie et Technologie Agricoles (en abrégé FAT)¹²⁴, propose les inventaires des émissions dans l'air liées à la production des principaux engrais, azotés ou non, utilisés par l'agriculture moderne, et qui sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

Type d'engrais	Unité	Emissions en mg de gaz/unité					
		CO ₂	N ₂ O	NO _x	CH ₄	C ₂ F ₆	CF ₄
Urée	kg N	2,19E+06	9480	12000	10300	0,022	0,172
Nitrate amoniaque phosphate	kg N	1,41E+06	21	3140	9420	0,018	0,142
Nitrate d'amoniaque	kg N	9,69E+05	9450	8880	9190	0,014	0,111
Urée-nitrate d'amoniaque	kg N	1,60E+06	9460	10500	9590	0,017	0,139
Trisuperphosphate (TSP)	kg P	2,46E+06	58,8	15200	3790	0,029	0,235
Nitrate d'amoniaque phosphate (ASP)	kg P	1,54E+06	40	13300	2490	0,024	0,193
Scories thomas	kg P	1,10E+06	22,6	3080	1440	0,010	0,079
Potasse	kg K ₂ O	6,30E+05	8,29	1390	1720	0,004	0,030
Chaux	kg CaO	1,41E+05	3,25	429	359	0,003	0,028
Fumier en tas	tonne	2,94E+06	64,7	12700	9120	0,028	0,227
Lisier	m ³	2,92E+06	98,8	10300	6960	0,054	0,430

Tableau 84 : facteurs d'émission de la production d'engrais en fonction des différents GES

Compte tenu des équivalent carbone des divers gaz pris en compte, cela permet d'aboutir aux chiffres suivants :

Type d'engrais	Unité	Equivalent carbone en kg/unité						Total
		CO ₂	N ₂ O	NO _x	CH ₄	C ₂ F ₆	CF ₄	
Urée	kg N	0,597	0,765	0,033	0,065	7E-05	3E-04	1,46
Nitrate amoniaque phosphate	kg N	0,385	0,002	0,009	0,059	6E-05	2E-04	0,45
Nitrate d'amoniaque	kg N	0,264	0,763	0,024	0,058	5E-05	2E-04	1,11
Urée-nitrate d'amoniaque	kg N	0,436	0,764	0,029	0,06	6E-05	2E-04	1,29
Trisuperphosphate (TSP)	kg P	0,671	0,005	0,041	0,024	1E-04	4E-04	0,74
Nitrate d'amoniaque phosphate (ASP)	kg P	0,42	0,003	0,036	0,016	8E-05	3E-04	0,48
Scories thomas	kg P	0,3	0,002	0,008	0,009	3E-05	1E-04	0,32
Potasse	kg K ₂ O	0,172	7E-04	0,004	0,011	1E-05	5E-05	0,19
Chaux	kg CaO	0,038	3E-04	0,001	0,002	1E-05	4E-05	0,04
Fumier en tas	tonne	0,802	0,005	0,035	0,057	9E-05	4E-04	0,90
Lisier	m ³	0,796	0,008	0,028	0,044	2E-04	7E-04	0,88

Tableau 85 : facteurs d'émission de la production d'engrais en fonction des différents GES en kg eqC.

Par exemple, le nitrate d'ammoniaque, encore appelé ammonitrate, engendre des émissions de fabrication de 1,11 kg équivalent carbone par kg d'azote (les engrais sont généralement comptés en kg d'azote, ou encore en unités d'azote).

Les facteurs d'incertitude sur ces valeurs - valables pour l'Europe - sont prises égales à 30%.

¹²⁴ Inventaire environnemental des intrants agricoles en production végétale, Comptes rendus de la FAT, Gaillard & al., 1997

6.3 Phytosanitaires

La même publication de la FAT propose des analyses de cycle de vie permettant de déboucher sur les émissions dans l'air liées à la production des phytosanitaires désormais utilisés de manière courante en agriculture (herbicides, insecticides, fongicides...).

6.3.1 Herbicides

Les phytosanitaires en agriculture sont généralement mesurés en "kg de matières actives" : on ne regarde alors que le seul poids du principe actif, lequel est généralement dilué dans un ou plusieurs excipient(s) (qui peu(ven)t n'être que de l'eau, tout simplement) pour aboutir à une formulation vendue avec une dénomination commerciale.

Les chiffres de la publication de la FAT pour les herbicides sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

Matière actives herbicides	Emissions en mg par kg de matière active						Kg équivalent carbone par kg de matière active
	CO ₂	N ₂ O	NO _x	CH ₄	C ₂ F ₆	CF ₄	
Amidosulfuron	9,59E+06	258	25500	31500	0,131	1,05	2,91
Asulame	8,03E+06	222	20800	28500	0,113	0,901	2,45
Atrazine	5,02E+06	126	13600	21000	0,059	0,469	1,55
Bifenox	2,63E+06	76,5	6560	6920	0,04	0,319	0,79
Carbétamide	8,03E+06	222	20800	28500	0,113	0,901	2,45
Chlortoluron	9,59E+06	258	25500	31500	0,131	1,05	2,91
Dinosèbe	2,21E+06	43,2	6560	7710	0,016	0,128	0,67
Ethofumesate	8,64E+06	231	22600	25900	0,114	0,91	2,60
Fluroxypyr	2,00E+07	538	50700	49000	0,258	2,06	5,95
Glyphosate	1,59E+07	495	38800	44700	0,273	2,19	4,77
Ioxynil	8,64E+06	231	22600	25900	0,114	0,91	2,60
Isoproturon	9,59E+06	258	25500	31500	0,131	1,05	2,91
MCPA	4,22E+06	103	11500	11900	0,047	0,375	1,27
MCPB	7,86E+06	208	20400	20400	0,1	0,802	2,35
Mecoprop P	7,86E+06	208	20400	20400	0,1	0,802	2,35
Metamitron	8,16E+06	208	21600	25500	0,096	0,769	2,46
Metolachlore	9,03E+06	233	24100	25500	0,114	0,91	2,71
Pendimethaline	3,59E+06	104	9440	13500	0,058	0,463	1,10
Phenmediphame	8,03E+06	222	20800	28500	0,113	0,901	2,45
Pyridate	8,64E+06	231	22600	25900	0,114	0,91	2,60
Rimsulfuron	9,59E+06	258	25500	31500	0,131	1,05	2,91
Tébutame	8,63E+06	226	22900	24900	0,112	0,893	2,59
Terbutylazine	8,16E+06	208	21600	25500	0,096	0,769	2,46

Tableau 86 : facteurs d'émission de différents herbicides

En l'absence de précision sur l'herbicide employé, nous prendrons comme valeur par défaut 2 tonnes équivalent carbone par tonne de principe actif (ou de matière active), avec un facteur d'incertitude égal à 50% (ce qui donne 1 à 3 tonnes équivalent carbone comme fourchette, et couvre l'essentiel des valeurs ci-dessus).

6.3.2 Fongicides

La même publication donne les chiffres suivants pour les matières actives :

Matière actives Fongicides	Emissions en mg par kg de matière active						Kg équivalent carbone par kg de matière active
	CO ₂	N ₂ O	NO _x	CH ₄	C ₂ F ₆	CF ₄	
Carbendazime	1,39E+07	367	36100	38800	0,175	1,4	4,17
Chlorothalonil	3,26E+06	104	8400	10800	0,063	0,5	0,99
Fenpropimorphe	5,53E+06	150	14400	18400	0,075	0,598	1,68
Flusilazole	5,53E+06	150	14400	18400	0,075	0,598	1,68
Mancozèbe	2,46E+06	65	6510	12100	0,031	0,247	0,77
Manèbe	2,56E+06	70,4	6880	13100	0,037	0,293	0,81
Prochloraze	5,53E+06	150	14400	18400	0,075	0,598	1,68
Tebuconazole	5,53E+06	150	14400	18400	0,075	0,598	1,68

Tableau 87 : facteurs d'émission de différents fongicides

En l'absence de précision, nous prendrons comme valeur par défaut 1,7 tonne équivalent carbone par tonne de principe actif (ou de matière active), avec un facteur d'incertitude égal à 50%.

6.3.3 Insecticides

La même publication donne les chiffres suivants pour les deux matières actives étudiées :

Matière actives insecticides	Emissions en mg par kg de matière active						total
	CO ₂	N ₂ O	NO _x	CH ₄	C ₂ F ₆	CF ₄	
Cyperméthrine	2,37E+07	627	60000	54300	0,291	2,32	7,02
Lambda-cyhalothrine	2,37E+07	627	60000	54300	0,291	2,32	7,02

Tableau 88 : facteurs d'émission de différents insecticides

En l'absence de précision, nous prendrons comme valeur par défaut 7 tonnes équivalent carbone par tonne de principe actif (ou de matière active), avec un facteur d'incertitude égal à 20%.

6.3.4 Molluscides

La même publication donne les chiffres suivants pour les deux matières actives étudiées :

Matière actives molluscides	Emissions en mg par kg de matière active						total
	CO ₂	N ₂ O	NO _x	CH ₄	C ₂ F ₆	CF ₄	
Methiocarbe	8,03E+06	222	20800	28500	0,113	0,901	2,45

Tableau 89 : facteurs d'émission de molluscides

Cette valeur servira aussi de valeur par défaut lorsqu'une autre matière active sera utilisée, avec un facteur d'incertitude de 50% en pareil cas.

6.3.5 Régulateurs de croissance

La même publication donne les chiffres suivants pour les trois matières actives étudiées :

Matière actives régulateurs de croissance	Emissions en mg par kg de matière active						total
	CO ₂	N ₂ O	NO _x	CH ₄	C ₂ F ₆	CF ₄	
Chlormequat (CCC)	7,86E+06	214	20500	24100	0,107	0,857	2,37
Ethephon	7860000	214	20500	24100	0,107	0,857	2,37
Trinexapac-éthyle	7860000	214	20500	24100	0,107	0,857	2,37

Tableau 90 : facteurs d'émission de différents régulateurs de croissance

Cette valeur de 2,4 tonne équivalent carbone par tonne de matière active servira aussi de valeur par défaut lorsqu'une autre matière active de cette même catégorie sera utilisée, avec un facteur d'incertitude de 50% en pareil cas.

6.3.6 Valeur par défaut

Lorsque seul le poids de matières actives sera connu, sans distinction de nature (herbicides, fongicides, etc) la valeur par défaut correspondra à la proportion de chaque matière active dans une grande culture standard, soit 10% d'insecticides et 90% d'herbicides et fongicides, le tout amenant à une valeur approximative de 2,5 tonnes équivalent carbone par tonne de matière active avec un facteur d'incertitude de 30%.

6.4 Céréales, farine

Les céréales cultivées en France servent majoritairement à nourrir des animaux. La production de farine pour la panification, ou de céréales pour la consommation directe des hommes (pâtes, maïs alimentaire, etc), sont des débouchés minoritaires dans l'ensemble de la production. C'est la raison pour laquelle c'est l'alimentation du bétail, et non l'alimentation humaine, qui a servi de référent pour certains rendements ci-dessous.

Les sources de gaz à effet de serre prises en compte sont les suivantes :

- émanations de N₂O liées à l'usage d'engrais azotés,
- utilisation directe de carburants dans les engins agricoles,
- dépense énergétique liée à la fabrication et à l'entretien des engins agricoles, à la fabrication de phytosanitaires et engrais, etc.

6.4.1 Blé

Les valeurs suivantes ont été obtenues dans une étude réalisée par Ecobilan pour l'ADEME sur les filières de biocarburants¹²⁵, qui fait elle-même appel à des valeurs de référence fournies par l'Institut du Végétal :

Energie de culture	Valeur	Unité
consommation du tracteur	14	Litres de diesel/heure
nombre d'heures de tracteur par hectare	3,37	h
consommation horaire automotrice	17	Litres de diesel/heure
nombre d'heures d'automotrice par hectare	1	h
consommation horaire outils tractés	3,2	Litres de diesel/heure
nombre d'heures d'outils par hectare	13,3	h
consommation de diesel totale par hectare	106,74	litres
Kg équivalent carbone par hectare pour l'énergie de culture ¹²⁶	86,9	

Tableau 91 : facteurs d'émission pour l'énergie de culture de blé par hectare cultivé

En ce qui concerne les intrants les valeurs fournies dans la même étude sont les suivantes :

Intrants	Valeur	unité
Nitrate d'ammonium	184	kg de N par ha
Engrais P	46	kg P ₂ O ₅ par ha
Engrais K	76	kg K ₂ O par ha
Fongicides	0,3	kg de matières actives par ha
Herbicides	0,9	kg de matières actives par ha
Insecticides	0,2	kg de matières actives par ha
Substance de croissance	1,5	kg de matières actives par ha

Tableau 92 : émissions des produits utilisés pour la culture du blé.

Compte tenu des facteurs d'émission de ces diverses substances (§ 6.3 ci-dessus), il en résulte des émissions de 235 kg équivalent carbone par hectare pour la prise en compte de la fabrication de ces intrants.

Par ailleurs l'épandage des engrais azotés engendre des émissions de N₂O pour 1,77% de l'azote épandu (voir § 3.2). Compte tenu du poids d'azote apporté à l'hectare, les émissions de N₂O des engrais s'élèvent à 263 kg équivalent carbone par hectare.

¹²⁵ Bilans énergétique et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants, ECOBILAN (pour l'ADEME), 2003

¹²⁶ Les facteurs d'émission sont ceux du § 2.2, tenant compte des émissions amont pour l'élaboration des carburants

Il faut également tenir compte de la fabrication du matériel agricole, au prorata des heures d'utilisation par rapport à la durée de vie du matériel. L'Institut du Végétal a ramené à l'heure d'utilisation les émissions liées à la fabrication et à l'entretien des engins agricoles, et dans le cas du blé cela débouche sur les valeurs suivantes :

Matériel	Heures par hectare	KWh par heure	kg équivalent carbone
Tracteur	3,37	13,1	0,5
Automotrice ¹²⁷	1	33,3	1,3
Outils	13,3	110,8	4,2
Total par hectare			6,0

Tableau 93 : facteurs d'émission pour la fabrication des outils nécessaires à la culture du blé

Il ressort des indications ci-dessus que les émissions à l'hectare se présentent comme suit :

CO ₂	363 kg équ. C par hectare
N ₂ O	263 kg équ. C par hectare
Equivalent carbone total	626 kg équ. C par hectare

Tableau 94 : calcul des facteurs d'émission à l'hectare de blé cultivé

Le rendement massique des cultures est approximativement de 9 tonnes de blé par hectare et par an¹²⁸. De ce fait, produire une tonne de blé engendre des émissions de 70 kg équivalent carbone par tonne. Compte tenu d'un taux d'humidité de 15% à la récolte, ces émissions sont de 82 kg équivalent carbone par tonne de matière sèche.

6.4.2 Maïs fourrage

La dépense énergétique liée à l'utilisation d'engins agricoles se présente comme suit :

Energie de culture	Valeur	Unité
consommation horaire tracteur	15,1	Litres de diesel/heure
nombre d'heures par hectare	5	h
consommation horaire automotrice	15,6	Litres de diesel/heure
nombre d'heures par hectare	1	h
consommation horaire outils tractés	5,3	Litres de diesel/heure
nombre d'heures par hectare	15	h
consommation de diesel totale par hectare	170,6	litres
émissions culture (kg équivalent carbone/ha)	92,0	

Tableau 95 : facteurs d'émission pour l'énergie de culture du maïs par hectare cultivé

En ce qui concerne les intrants les valeurs fournies dans l'étude Ecobilan/Ademe précitée¹²⁹ sont les suivantes :

¹²⁷ il s'agit ici de la moissonneuse-batteuse

¹²⁸ Source : Institut du Végétal

¹²⁹ Bilans énergétique et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants, ECOBILAN (pour l'ADEME), 2003

Intrants	Valeur	unité
Nitrate d'ammonium	60	kg de N par ha
Engrais P	40	kg P2O5 par ha
Engrais K	-	kg K2O par ha
Fongicides	0,1	kg de matières actives par ha
Herbicides	1	kg de matières actives par ha
Insecticides	0,1	kg de matières actives par ha
Substance de croissance	-	kg de matières actives par ha

Tableau 96 : émissions des produits utilisés à la culture du maïs.

Enfin pour la quote-part de la construction des engins agricoles les valeurs sont les suivantes :

Matériel	Heures par hectare	KWh par heure	kg équ carbone par hectare
Tracteur	5	0,9	0,9
Automotrice	1	1,5	1,5
Outils	15	5,5	5,5
Total			7,8

Tableau 97 : facteurs d'émission pour la fabrication des outils utilisés pour la culture de maïs.

Il ressort des indications ci-dessus que les émissions à l'hectare se présentent comme suit :

CO ₂	186	kg équ. C par hectare
N ₂ O	86	kg équ. C par hectare
Equivalent carbone total	272	kg équ. C par hectare

Tableau 98 : facteurs d'émission à l'hectare de maïs cultivé

Le rendement massique des cultures est approximativement de 37 tonnes de maïs fourrage par hectare et par an¹³⁰. De ce fait, produire une tonne de maïs fourrage engendre des émissions de 7 kg équivalent carbone par tonne. Compte tenu d'un taux d'humidité de 70% à la récolte¹³¹, ces émissions sont de 24 kg équivalent carbone par tonne de matière sèche.

Lorsque ce maïs fourrage sera ensilé, nous rajouterons forfaitairement 20% pour tenir compte du transport entre le lieu de récolte et le lieu d'ensilage, de l'énergie nécessaire au broyage et aux diverses manipulations nécessaires, de la construction et de l'entretien du silo, etc.

Nous arrivons donc aux valeurs suivantes :

- **82 kg équivalent carbone par tonne de matière sèche pour le blé** (taux d'humidité de 15% en général)
- **30 kg équivalent carbone par tonne de matière sèche pour le fourrage ensilé.**

¹³⁰ Source : Institut du Végétal

¹³¹ Source Arvalis - Institut du Végétal, échange informel, 2003

6.4.3 Farine

Il faut 1 tonne de blé pour faire 760 kg de farine. Nous supposons par ailleurs que cette fabrication requiert 300 km de transports intermédiaires en semi-remorque.

Equivalent carbone par tonne de blé	70
taux d'extraction	76%
Contribution du blé par tonne de farine	92
Contribution des transports ¹³²	7,8
Emissions de la meunerie ¹³³	5
Soit par tonne de farine	104,4

Tableau 99 : facteur d'émission de la farine de blé.

La farine sera donc prise avec **105 kg équivalent carbone par tonne (départ minoterie)**.

6.5 Fruits et légumes

La culture de légumes représente en France 1,6% des surfaces arables (0,3 million d'hectares sur 18,1) et 1% des terres agricoles tout confondu (voir annexe 3). Cette activité étant marginale pour l'agriculture, elle ne sera pas traitée dans cette édition ci.

De même, les fruits sont marginaux dans les surfaces cultivées.

Des bilans carbone de filière seraient néanmoins intéressants, surtout si l'on entend mettre sur pieds une méthode voisine de bilan "gaz à effet de serre" pour les individus.

6.6 Viande de bœuf et de veau

La production de viande bovine est une source d'émissions de gaz à effet de serre :

- directement, à cause des méthane (CH₄) dues à la digestion des ruminants, et à cause des émissions de méthane dues à la fermentation des déjections,
- indirectement, à cause de la culture de végétaux divers (fourrages, protéagineux, etc) pour l'alimentation.

L'abattage, ainsi que le transport des carcasses et des animaux n'est pas pris en compte. En première approximation les déjections seront assimilées à des fertilisants des prairies, et donc les émissions de N₂O afférentes sont déjà comprises dans les contenus en équivalent carbone des fourrages (pas celles de méthane).

¹³² 300 km à 26 grammes équivalent carbone par tonne.km ; cf. 4.2.2

¹³³ d'après CEREN ; il y a essentiellement de l'électricité.

Nous n'avons pas fait la différence entre les animaux élevés en liberté et ceux élevés hors sol, pour les raisons suivantes :

- en France, les animaux qui pâturent broutent en général des prairies qui ont été fertilisées, avec donc des émanations de N₂O à l'hectare identiques (voire supérieures) à ce qui se passe pour les fourrages,
- le rendement massique à l'hectare (en matière sèche) des fourrages et de l'herbe est à peu près le même,
- la dépense énergétique à l'hectare provient essentiellement des engrais, et du combustible des engins agricoles (les phytosanitaires ne font pas une énorme différence de ce point de vue), bref de sources qui existent à la fois dans le cas des fourrages et dans celui de l'herbe et du foin fertilisés.

Cette approximation ne convient toutefois pas dans le cas des pâturages extensifs non fertilisés :

- montagne,
- pampas argentines, steppes australiennes, etc (mais dans ce dernier cas il faut tenir compte du transport et de la chaîne du froid).

6.6.1 Emissions annuelles du bétail

Les postes d'émissions ci-dessous font l'objet de publications diverses, et leur agrégation permet d'aboutir à des émissions annuelles pour les divers bovins présents dans un cheptel national.

Nous avons supposé, faute de données plus précises, que la totalité des matières sèches ingérées par le bétail correspond à du fourrage (maïs fourrage ou herbe de prairies fertilisées). Il s'agit bien sûr d'une approximation, car le régime alimentaire réel du bétail comprend aussi des protéagineux (pois, fèves..), des tourteaux d'autres productions, etc.

Les émissions, ramenées à l'année pour la digestion, les déjections, et l'alimentation, sont synthétisées dans les tableaux ci-dessous :

Emissions annuelles par animal	Fermentation entérique : CH ₄ (kg) ¹³⁴	Déjections : CH ₄ (kg) ¹³⁵	Equivalent carbone (kg) du CH ₄
Vaches laitières	100,67	51,82	956,49
Vaches allaitantes	80,00	33,44	711,60
Taureaux	76,67	32,05	681,95
Génisses, taurillons	46,67	19,51	415,10
Broutards, veaux	15,33	6,41	136,39
Bœufs	53,33	22,30	474,40

Tableau 100 : émissions annuelles du bétail (digestion, déjections et alimentation).

Animaux	Fourrage par jour, (kg de matières sèches)	Kg équ. C par t de fourrages		Fourrage, kg équ. C par tête et par an		Rappel CH ₄ par an (kg équ. C)	Kg équ. C par tête et par an
		Part du CO ₂	Part du N ₂ O	Part du CO ₂	Part du N ₂ O		
Vaches laitières	20	17	8	152,97	70,48	956,49	1 179,94
Vaches allaitantes	20	17	8	152,97	70,48	711,60	935,05
Taureaux	15	17	8	114,73	52,86	681,95	849,53
Génisses, taurillons	15	17	8	114,73	52,86	415,10	582,69
Broutards, veaux	3	17	8	22,95	10,57	136,39	169,91
Bœuf	15	17	8	114,73	52,86	474,40	641,99

Tableau 101 : facteurs d'émission du bétail par tête et par an.

6.6.2 Affectation des vaches allaitantes

La vache allaitante est supposée suivre le parcours suivant :

- elle est un veau de lait pendant 6 mois,
- ensuite elle est un veau à l'herbe pendant 6 mois,
- ensuite elle est une génisse non encore sexuellement mature pendant 1 an,
- ensuite elle est une vache sexuellement mature mettant bas des veaux et les allaitant (produisant 4 veaux¹³⁶),
- chaque veau allaité est abattu lorsqu'il pèse 181 kg de poids vif¹³⁷
- enfin elle part à l'abattoir comme viande de bœuf¹³⁸, et pèse alors en moyenne 680 kg de poids vif, qui donneront 340 kg de carcasse (c'est-à-dire de "viande avec os").

Nous affecterons aux veaux les 4 années de vache sexuellement mature, et à la viande de la vache elle-même les 2 ans précédents.

Période de la vie de l'animal	Equivalent carbone par an			Durée en années	Equivalent carbone total			
	CO ₂ culture des fourrages	N ₂ O culture des fourrages	Méthane, fermentation et déjections		CO ₂	N ₂ O	CH ₄	TOTAL
6 mois de veau	23	11	136	0,5	11	5	68	85

¹³⁴ Bilan et gestion des Gaz à effet de serre dans l'espace rural, Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture, vol. 85, 1999

¹³⁵ Global Methane Emissions From Livestock and Poultry Manure, US Environment Protection Agency, 1992

¹³⁶ La gestation durant un peu moins d'un an, le premier veau est donc mis bas à 3 ans (2 ans à la saillie puis un peu moins d'un an de gestation)

¹³⁷ Global Methane Emissions From Livestock and Poultry Manure, US Environment Protection Agency, 1992

¹³⁸ le bœuf "premier prix" des grandes surfaces est généralement de la vache de réforme, c'est-à-dire de la viande de vache laitière ou de vache allaitante en fin de vie

6 mois de broutard	23	11	136	0,5	11	5	68	85
un an de génisse	115	53	415	1	115	53	415	583
4 ans de vache allaitante	153	70	712	4	612	282	2 846	3 740
Total de la vache allaitante sur sa vie	314	144	1 399		750	345	3 398	4 493
Quote-part par veau (4 veaux en tout)	38	18	178		153	70	712	935
Kg équivalent carbone par kg de carcasse de vache de réforme					0,40	0,19	1,62	2,21

Tableau 102 : facteurs d'émission des vaches allaitantes de réforme

Cela amène à **2,2 kg équivalent carbone** par tonne de carcasse de vache allaitante de réforme.

6.6.3 Veaux de lait

Compte tenu de ce qui précède, nous affecterons à un veau de lait :

- ce qu'émet la vache qui le nourrit pendant la gestation et l'allaitement (soit un an de vache allaitante),
- les émissions propres du veau sur cette même durée.

Le veau est abattu à 6 mois, à un poids vif supposé de 181 kg. Le poids de carcasse (c'est à dire de viande avec os) représente environ 50% du poids vif¹³⁹.

VEAU DE LAIT	Equivalent carbone
Emissions de la mère (quote part ci-dessus)	935
6 mois de veau	85
Total par veau	1 020
Poids vif	181
% de carcasse	50%
poids de carcasse	91
kg équ. C par kg de viande avec os	11,27

Tableau 103 : facteur d'émission du veau de lait

Cela amène à **11,3 kg équivalent carbone** par tonne de carcasse.

6.6.4 Vaches laitières et lait

Une vache laitière met 2 ans à devenir sexuellement mature, puis effectue sa première gestation pendant un an, puis produit du lait sur 3 ans, et enfin sert d'animal de boucherie. Une vache laitière produit 5.500 litres de lait par an en moyenne pendant sa période de lactation¹⁴⁰, soit 16.500 litres au total sur sa durée de vie.

¹³⁹ Source : site de référence des viandes rouges ; www.mhr-viandes.com

¹⁴⁰ Source : INRA

Nous utiliserons ici une affectation massique des émissions entre la viande et le lait qui sera la suivante :

- les 3 années de vache laitière sont affectés au lait,
- les années précédentes à la viande de la vache de réforme.

Une vache laitière produit aussi des veaux, toutefois, qui consomment une partie du lait produit. Une affectation des émissions entièrement au lait ne conduit toutefois pas à une erreur, puisque le lait effectivement disponible est celui que le veau ne boit pas, et le "contenu en gaz à effet de serre" du veau correspond, comme pour le § 6.5.3, au contenu en gaz à effet de serre du lait qu'il boit.

Avec ces hypothèses nous parvenons au tableau ci-dessous :

VACHE LAITIERE	Equivalent carbone			
	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	TOTAL
6 mois de veau	11	5	68	85
6 mois de broutard	11	5	68	85
un an de génisse	115	53	415	583
4 ans de vache laitière (dont 3 ans de lactation)	612	282	3 826	4 720
Total de la vache laitière sur sa vie	750	345	4 377	5 472
kg. equ. C par kg de lait	0,037	0,017	0,232	0,286
kg équ. C par kg de carcasse de vache de réforme	0,40	0,19	1,62	2,21

Tableau 104 : facteur d'émission du lait entier

Cela nous amène à 286 g équivalent carbone par litre de lait, ou encore, en première approximation, à **286 kg équivalent carbone par tonne de lait entier**.

Cela étant, le lait subit ensuite plusieurs traitements (stérilisation, écrémage), ce qui introduit des dépenses énergétiques et des sous-produits (beurre notamment).

Dans un souci de simplification on retiendra la valeur ci-dessus dans un premier temps, mais un bilan de filière serait utile (il nécessiterait une imputation d'émissions fongibles).

6.6.5 Bœufs

6.6.5.1 Races à viande

Un bœuf élevé pour sa viande, abattu à 36 mois, contiendra la somme des émissions du veau du § 6.6.3 ci-dessus, de 6 mois de broulard, et de 24 mois d'alimentation et d'émissions de méthane du jeune bœuf. Il est supposé peser 680 kg vif à l'abattage¹⁴¹.

De même que pour le veau, le bœuf donne environ 50% de poids net avec os par kg de poids vif¹⁴². Nous négligeons les co-produits (peau pour tannerie).

BŒUF	Equivalent carbone			
	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	TOTAL
24 mois de bœuf adulte	229	106	949	1 284
6 mois de broulard	11	5	68	85
Veau (cf. 9.5.3)	164	76	780	1 020
Total	405	187	1 797	2 389
Par kg de carcasse	1,19	0,55	5,28	7,03

Tableau 105 : facteur d'émission du bœuf (races à viande)

Cela amène à **7 kg équivalent carbone** par tonne de viande de bœuf avec os pour les races à viande élevées avec des fourrages. Ce chiffre ne s'applique pas aux pâturages extensifs.

6.6.5.2 Valeur moyenne

La viande rouge effectivement consommée en France provient, en première approximation :

- pour un tiers de races à viande,
- pour un tiers de vaches laitières de réforme,
- pour un tiers de vaches allaitantes de réforme.

De ce fait nous pouvons en déduire une valeur moyenne pour la viande de bœuf d'origine inconnue, qui est de 3,9 tonnes équivalent carbone par tonne de viande, ainsi qu'il suit :

Origine	tonnes commercialisées	équivalent carbone par kg			
		CO ₂	N ₂ O	CH ₄	TOTAL
Race à viande	478 624	1,19	0,55	5,28	7,03
Vache laitières de réforme	464 485	0,40	0,19	1,62	2,21
Vaches allaitantes de réforme	422 260	0,40	0,19	1,62	2,21
Total ou moyenne	1 365 369	0,68	0,31	2,91	3,90

Tableau 106 : facteurs d'émission moyens du bœuf.

6.7 Laitages

6.7.1 Fromage à pâte cuite

Il faut 11,5 litres de lait pour faire un kg de gruyère. En négligeant l'énergie de chauffe (très secondaire devant les émissions provenant du lait) cela nous amène aux valeurs suivantes :

¹⁴¹ Global Methane Emissions From Livestock and Poultry Manure, US Environment Protection Agency, 1992

¹⁴² Source : site de référence des viandes rouges ; www.mhr-viandes.com

Fromage	l de lait par kg de fromage	Kg équivalent carbone
Gruyère	11,43	3,27

Tableau 107 : facteur d'émission du fromage à pâte cuite

Nous retiendrons donc **3.270 kg équivalent carbone** par tonne de fromage à pâte cuite.

6.7.2 Fromages frais, yaourts

Il faut un peu plus d'un litre de lait pour faire un kg de yaourt. Avec l'énergie de chauffe (non négligeable ici), les transports et les emballages nous prendrons une approximation de 500 g équivalent carbone par kg de yaourt, ou encore **500 kg équivalent carbone par tonne de yaourt**.

6.7.3 Fromages au lait cru

Ces fromages nécessitent - par kg - une quantité de lait intermédiaire entre celle requise pour les fromages à pâte cuite et celle requise pour les yaourts. Compte tenu des données ci-dessus, nous prendrons une **approximation de 1.500 kg équivalent carbone par tonne de fromage à pâte crue**.

6.7.4 Beurre, crème

Le beurre est composé des lipides du lait. Ce dernier contient environ 40 g de lipides par litre. Il faudrait donc environ 25 litres de lait pour faire un kg de beurre. Mais dans la pratique l'essentiel du beurre est fabriqué avec écrémage partiel du lait.

Il faut donc une quantité supérieure de lait pour faire un kg de beurre, mais par contre il se pose le problème de l'affectation des émissions entre 2 co-produits du même procédé.

Si nous estimons qu'un kg de beurre correspond à l'usage exclusif de 10 litres de lait, cela nous amène une valeur de **2.700 kg équivalent carbone par tonne de beurre** que nous retiendrons faute de mieux.

6.8 Porc de batterie

Un cochon de lait est sevré à 28 jours; il pèse alors 7 kg¹⁴³. Il est ensuite engraisé, pendant 161 jours, de 7 à 105 kg en moyenne¹⁴⁴. Il faut 3,21 kg d'aliments (essentiellement des

¹⁴³ Source : INRA

¹⁴⁴ Source : INRA

céréales, que nous assimilerons à du blé pour le calcul) pour faire un kg de poids vif¹⁴⁵ ; ces aliments sont donc source de CO₂ fossile et de N₂O.

Les déjections du porc - le lisier - émettent du méthane et du N₂O. Les émissions de méthane liées aux déjections sont de 9,89 kg par animal et par an en moyenne¹⁴⁶, soit 62 kg équivalent carbone par animal et par an, ou encore 27,4 kg équivalent carbone par animal de sa naissance à sa mort, ce qui, ramené au kg de poids vif à l'abattage, représente 0,26 kg équivalent carbone par kg de poids vif.

Les émissions de N₂O sont estimées à 1 kg par animal et par an en moyenne, soit 0,45 kg équivalent carbone par kg de poids vif.

Enfin le ratio poids utile/poids vif de l'animal abattu est de 76%¹⁴⁷.

Nous ne tenons cependant pas compte, faute de disposer de données, des émissions de la mère pendant la période de grossesse et d'allaitement.

L'ensemble de ces éléments conduit au tableau suivant :

Emissions des porcs de batterie	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	TOTAL
Emissions des déjections par kg de poids vif	0,00	0,34	0,26	0,60
Contribution des aliments par kg de poids vif	0,15	0,11	0,00	0,26
Total par kg de poids vif	0,15	0,45	0,26	0,86
Total par kg de poids net	0,20	0,59	0,34	1,13

Tableau 108 : facteur d'émission du porc de batterie

Nous retiendrons donc la valeur de **1.130 kg équivalent carbone par tonne de carcasse**.

6.9 Volailles et produits dérivés

6.9.1 Poulets de batterie

Pour un poulet de batterie, dit "industriel", le poids d'aliment pour un kg de poids vif est de 1,9 kg environ (abattage à 42 jours, soit 6 semaines, au poids de 2 kg environ)¹⁴⁸.

¹⁴⁵ Source : INRA

¹⁴⁶ Global Methane Emissions From Livestock and Poultry Manure, US Environment Protection Agency, 1992

¹⁴⁷ Source : INRA

De même que ci-dessus, les déjections sont une source de méthane. Les chiffres de la publication précitée¹⁴⁹ sont de 0,15 kg de méthane par animal et par an pour ce poste.

Le ratio poids utile/poids vif est de 66%¹⁵⁰.

Emissions des poulets de batterie	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	TOTAL
Emissions des déjections par kg de poids vif	0,00	0,00	0,05	0,05
Contribution des aliments par kg de poids vif	0,09	0,07	0,00	0,16
Total par kg de poids vif	0,09	0,07	0,05	0,21
Total par kg de poids net	0,14	0,10	0,08	0,32

Tableau 109 : facteur d'émission des poulets de batterie

La dépense énergétique d'élevage (les bâtiments sont souvent chauffés et éclairés en permanence ; transport ; énergie utilisée pour l'abattage, etc) sont forfaitairement comptées pour 10% du total.

Nous retiendrons alors 350 kg équivalent carbone par tonne de poulet de batterie avec os.

Les autres volailles sont étudiées en annexe 4.

6.9.2 Œufs

Il faut 2,13 kg d'aliments pour produire 1 kg d'œufs (en batterie)¹⁵¹. Un œuf moyen pèse 63 grammes¹⁵². Nous avons supposé que la contribution des déjections par kg d'œuf est la même que par kg de viande de poulet de batterie.

Enfin nous intégrerons ici aussi 10% pour tenir compte des opérations "autres" : collecte, chauffage et entretien du bâtiment d'élevage, etc.

Cela amène aux valeurs contenues dans le tableau ci-dessous :

ŒUFS	Kg équivalent carbone par kg
Aliments	0,17
prise en compte des déjections	0,05
Sous-total	0,23
10% forfaitaires	0,02

¹⁴⁸ Source : INRA

¹⁴⁹ Global Methane Emissions From Livestock and Poultry Manure, US Environment Protection Agency, 1992

¹⁵⁰ Source : INRA

¹⁵¹ Source : INRA

¹⁵² Source : INRA

Equivalent carbone par kg	0,25
Equivalent carbone par œuf	0,016

Tableau 110 : facteur d'émission d'un œuf

Nous retiendrons donc 16 grammes équivalent carbone par œuf, ou encore **250 kg équivalent carbone par tonne d'œufs**.

6.10 Mouton

Le mouton est un ruminant, comme la vache. On doit donc comptabiliser aussi :

- les émanations de méthane (CH₄) dues à la digestion,
- l'émission de méthane dû à la fermentation des déjections,
- le contenu en gaz à effet de serre des fourrages utilisés pour la nutrition.

Le métabolisme de digestion du mouton étant le même que celui de la vache, et ses déjections étant également source de méthane, nous retiendrons provisoirement les mêmes chiffres d'émissions de méthane par unité de poids de viande avec os. Par contre les moutons étant souvent des animaux d'alpages, donc nourris sur des surfaces non fertilisées, nous compterons pour 0 la contribution de la nourriture.

Cela revient, en première approximation, à ne s'intéresser qu'au méthane, dont les chiffres sont les suivants¹⁵³ :

Animaux	Digestion : CH ₄ par an (m ³)	Digestion : CH ₄ par an (kg)	Déjections : CH ₄ par an (kg)	Total kg équivalent carbone par an
Brebis allaitantes	16,5	11,00	2,85	86,89
Brebis laitières	20	13,33	3,46	105,32
Agnelles	8,2	5,47	1,42	43,18
Béliers	21	14,00	3,63	110,59
Agneaux à l'herbe	2,6	1,73	0,45	13,69
Agneaux de lait	1	0,67	0,17	5,27

Tableau 111 : facteurs d'émission du mouton

La valorisation de la laine est ignorée ici en première approche. Cela est presque légitime en allocation massique des émissions, et, en France, le reste en allocation économique, cette activité étant assez marginale dans notre pays. Cela est probablement beaucoup moins vrai dans d'autres pays d'Europe.

6.10.1 Agneaux de lait

Nous prenons comme base qu'une brebis allaitante engendre 1,7 agneau par an¹⁵⁴. Dans le même esprit que ce qui est exposé pour les bovins, nous affectons à l'agneau la totalité des émissions de la mère pour la phase de gestation et d'allaitement, partant du principe que la brebis allaitante n'est conservée que pour avoir des agneaux.

¹⁵³ Bilan et gestion des Gaz à effet de serre dans l'espace rural, Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture, vol. 85, 1999

¹⁵⁴ source INRA

En outre les valeurs ci-après ne concernent que le méthane, comme expliqué ci-dessus.

AGNEAU DE LAIT	CH ₄
Kg équ. C pour les émissions de la mère (quote-part)	51
Kg équ. C de 2 mois d'agneau de lait	1
TOTAL	52
Poids vif	22
% de carcasse	50%
poids de carcasse	11
kg équ. C par kg de carcasse	4,73

Tableau 112 : facteurs d'émission de l'agneau de lait

6.10.2 Agneaux à l'herbe

Il s'agit des mêmes bêtes mais 2 mois plus tard.

AGNEAU A L'HERBE	CH ₄
Kg équ. C pour l'agneau ci-dessus	52
Kg équ. C pour 2 mois d'agneau à l'herbe	2
TOTAL	54
Poids vif	47
% de carcasse	50%
poids de carcasse	24
kg équ. C par kg de viande avec os	2,31

Tableau 113 : facteurs d'émission de l'agneau à l'herbe

6.11 Poisson

L'IFREMER indique que la pêche française consomme environ 250 millions de litres de diesel par an, pour environ 500.000 tonnes de poissons débarqués chaque année.

En première approximation, l'émission liée à la pêche d'une tonne de poisson sera donc de 407 kg équivalent carbone. En rajoutant forfaitairement 20% pour tenir compte du transport, de la manutention, de la chaîne du froid, etc, nous prendrons pour le poisson un facteur d'émission de 500 kg équivalent carbone par tonne.

Cette valeur sera doublée pour la pêche tropicale (thon) qui est 2 fois plus intensive en énergie de pêche, et qui suppose du transport longue distance par avion ou en cale frigorifique.

En ce qui concerne les crevettes, l'efficacité de la pêche n'est que de 20%, alors qu'elle est de 70% en règle général : les prises rejetées à la mer sont de l'ordre de 30% de ce qui est pêché pour le poisson "normal" (chalutage par exemple) alors que pour les crevettes c'est plutôt 80% (en poids) de ce qui est pêché qui est rejeté, les bateaux ne conservant que les crevettes et rejetant tout le reste¹⁵⁵.

De la sorte, la consommation de carburant par tonne débarquée peut être sommairement estimée, en ce qui concerne les crevettes, à 3,5 fois la normale (rapport des efficacités de 70%

¹⁵⁵ Source : conversation avec Loïc Antoine, IFREMER

et 20%), de telle sorte que les émissions directes liées à l'utilisation du carburant représentent 1,2 tonne équivalent carbone par tonne en ordre de grandeur. Cela ne concerne que les crevettes pêchées, et est exclusif des émissions liées au transport ensuite (une fraction significative des crevettes est expédiée par avion) ainsi que du raffinage du diesel. En rajoutant des émissions approximatives pour tenir compte de tous ces postes, nous prendrons comme valeur de référence 1,5 tonne équivalent carbone par tonne de crevettes.

6.12 Alcool, sucre

Des investigations préliminaires effectuées dans des entreprises du secteur des spiritueux ont permis d'obtenir des ordres de grandeur qui restent à confirmer :

- l'alcool pur engendre de l'ordre de $0,4 \pm 0,1$ tonne équivalent carbone par tonne (dépend fortement de l'énergie utilisée pour la distillation),
- le sucre engendre des émissions de l'ordre de $0,2 \pm 0,05$ équivalent carbone par tonne.

Toutes ces valeurs demandent à faire l'objet d'investigations plus approfondies qui sont en cours pour certaines.

6.13 Autres produits

Nous n'avons pas pu, dans les temps impartis, collecter des données pour réaliser les approximations pour d'autres produits courants ou semi-finis de l'industrie agroalimentaire :

- les matières grasses,
- le chocolat (ou le cacao),
- les légumes courants (pommes de terre, betteraves...),
- etc...

Pour l'activité industrielle, hors agroalimentaire, ce n'est pas très gênant, mais pour une extension à un indicateur "grand public" ce serait utile, l'alimentation représentant le premier poste d'émissions de gaz à effet de serre en France.

6.14 Facteurs d'émission agrégés pour les exploitations agricoles

6.14.1 Emissions à l'hectare pour les principales cultures

Lorsque la méthode Bilan Carbone sera appliquée à une collectivité locale, et que l'objectif sera d'estimer des émissions associées à des surfaces cultivées, il sera souvent plus facile d'obtenir un nombre d'hectares par type de culture que des poids par type de production. Nous pouvons alors utiliser des facteurs d'émission à l'hectare, basés sur des valeurs moyennes :

- d'utilisation d'engrais à l'hectare par type de culture (les engrais sont eux-mêmes différenciés entre engrais azotés et engrais potassiques), ce qui conditionne ensuite les

émissions de protoxyde d'azote ainsi que les émissions liées à la fabrication de ces engrais,

- d'utilisation d'heures de machines agricoles par hectare et par type de culture, ce qui conditionne les émissions directes de CO₂ liées à l'utilisation de diesel.

6.14.1.1 Emanations de protoxyde d'azote

A partir de diverses sources (Prolea¹⁵⁶, Institut du Végétal¹⁵⁷, Ecobilan¹⁵⁸¹⁵⁹, INRA notamment) les valeurs moyennes d'engrais azotés à l'hectare en agriculture conventionnelle sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Type de culture	Valeur moyenne des unités d'azote à l'hectare
Blé conventionnel	184
Mais grain conventionnel	175
Mais fourrage conventionnel	120
Sorgho	150
Betteraves conventionnelles	87
Vignes	200
Vignes non intensives ¹⁶⁰	50
Tournesol	40
Colza	170
Pâturages fertilisés	94
Pommes de terre	160

Tableau 114 : valeurs moyennes des unités d'azote à l'hectare cultivé en fonction du type de culture

Rappelons que les unités d'azote désignent, en kg, le poids de l'azote seul dans le total. Les agriculteurs ne comptabilisent que rarement les poids totaux d'engrais, préférant en général ne compter que le poids de l'azote seul dans ce qui est utilisé (de la sorte une éventuelle coupe de l'engrais avec un composé sans azote ne change pas les poids d'azote épandus).

Lorsque le type de culture n'est pas connu, la valeur par défaut sera de 100 unités d'azote à l'hectare. Les données sont malheureusement indisponibles pour les cultures maraîchères et fruitières.

Nous disposons par ailleurs d'un facteur conventionnel donnant les émissions de protoxyde d'azote en fonction de l'azote épandu sur le sol (voir § 3.2). Cela permet d'obtenir des émissions à l'hectare par type de culture, résumées sur le tableau suivant :

Type de culture	Emissions de N ₂ O moyennes, en kg équivalent carbone par hectare
Blé conventionnel	263
Mais grain conventionnel	250
Mais fourrage conventionnel	171

¹⁵⁶ échanges avec Benoît CARROUEE en 2003

¹⁵⁷ Référentiel pour le calcul des bilans énergétiques, ITCF/ADEME, 2003

¹⁵⁸ Analyse de cycle de vie de l'amidon de maïs, de maïs grain et de maïs ensilage, rapport Ecobilan pour AGPM, 1998

¹⁵⁹ Bilans énergétique et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants, ECOBILAN (pour l'ADEME), 2003

¹⁶⁰ Il s'agit de vignobles "de qualité" avec un quota de production (par exemple le vignoble champenois), de telle sorte que l'obtention de rendements élevés n'est pas un objectif.

Sorgho	214
Betteraves conventionnelles	124
Vignes	286
Vignes non intensives	71
Tournesol	57
Colza	243
Pâturages fertilisés	134
Pommes de terre	229

Tableau 115 : facteurs d'émission moyens du N2O en fonction du type de culture

6.14.1.2 Fabrication des engrais

Une fois connues les quantités d'azote épandues, il est possible d'en déduire les émissions liées à la fabrication des engrais azotés, grâce aux données du § 6.2. Les engrais potassiques, bien que nettement plus marginaux dans le total (la potasse est le produit d'une exploitation minière, bien moins intensive en énergie par tonne produite que la chimie), sont également pris en compte¹⁶¹.

Type de culture	Fabrication des engrais : valeurs moyennes, en kg équivalent carbone à l'hectare
Blé conventionnel	231
Mais grain conventionnel	220
Mais fourrage conventionnel	151
Sorgho	189
Betteraves conventionnelles	109
Vignes	252
Vignes non intensives	63
Tournesol	50
Colza	214
Pâturages fertilisés	118
Pommes de terre	201

Tableau 116 : facteurs d'émission de la fabrication d'engrais

La valeur par défaut est ici de 125 kg équivalent carbone par hectare (correspondant à la fabrication de 100 unités d'azote à l'hectare).

6.14.1.3 Mécanisation

Les mêmes références bibliographiques qu'au § 6.14.1.1 ci-dessus fournissent, pour chaque type de culture, des valeurs moyennes d'utilisation d'engins agricoles, en heures de fonctionnement, et les émissions liées à la consommation de carburant, ainsi que les émissions associées à la construction et à l'entretien des engins en question.

Bien que relativement marginales dans le total, les émissions correspondantes sont néanmoins prises en compte et ramenées à l'hectare cultivé, ce qui donne les valeurs suivantes (détail des calculs dans le tableur "ACV GES Alimentation.xls") :

Equivalent carbone par hectare

¹⁶¹ Indicateurs de développement durable, Jancovici pour IFEN, 2004.

Type de culture	Equivalent carbone par hectare	
	Consommation directe de carburant	Fabrication et entretien des machines
Blé conventionnel	87	6
Mais grain conventionnel	81	7
Mais fourrage conventionnel	92	8
Sorgho	63	5
Betteraves conventionnelles	159	7
Vignes	280	30
Tournesol	144	9
Colza	163	9
Pâturages fertilisés	6	0,1
Pommes de terre	131	6

Tableau 117 : facteurs d'émission des machines agricoles (consommation, entretien, fabrication) à l'hectare cultivé.

6.14.2 Emissions de méthane des animaux d'élevage

Tous les élevages conduisent à des émissions de méthane, qu'il s'agisse :

- de la fermentation entérique en ce qui concerne les ruminants
- de la fermentation intestinale pour les autres herbivores
- de la fermentation des produits organiques contenus dans les déjections (lisiers et purins notamment).

Si l'utilisateur de la méthode entend disposer des émissions directement engendrées par les animaux d'élevage, sans se préoccuper des émissions liées à la production de leur nourriture, il est alors souhaitable de comptabiliser séparément les émissions de méthane, qui sont les seules émissions dont il faut tenir compte dans le cadre de la perturbation anthropique du système climatique.

Les diverses investigations permettant de donner les émissions de méthane par animal sont détaillés aux § 6.6 à 6.10 ci-dessus, et sont rassemblées ci-dessous :

Animal	Kg de méthane par animal et par an
Vaches laitières	152
Vaches allaitantes	113
Taureaux	109
Génisses, taurillons	66
Broutards, veaux	22
Bœuf	76
Brebis allaitantes	14
Brebis laitières	17
Agnelles	6,9
béliers	17,5
agneaux à l'herbe	2,2
agneaux de boucherie	0,84
Chèvres	16
Boucs	19

Chevrettes	5,73
Hongres, juments vides	51
Juments reproductrices, étalons	54
Poulains	29
chevaux de trait	51
Cochons	9,9
Poulets	0,15
Pintades	0,15
Canards	0,20

Tableau 118 : facteurs d'émission en méthane des animaux d'élevage

Sur la base d'un PRG de 23 pour le méthane, cela conduit à des équivalent carbone par animal et par an qui sont les suivants :

Animal	Kg équivalent carbone par animal et par an
Vaches laitières	956
Vaches allaitantes	712
Taureaux	682
Génisses, taurillons	415
Broutards, veaux	136
Bœuf	474
Brebis allaitantes	87
Brebis laitières	105
Agnelles	43
béliers	111
Agneaux à l'herbe	14
agneaux de boucherie	5
Chèvres	102
Boucs	121
Chevrettes	36
Hongres, juments vides	322
Juments reproductrices, étalons	338
Poulains	184
chevaux de trait	322
Cochons	62
Poulets	0,9
Pintades	0,9
Canards	1,3

Tableau 119 : facteurs d'émission des animaux d'élevage. (en kg eqC)

Ces valeurs serviront à estimer les émissions annuelles lorsque les tailles de cheptel ou d'élevage sont connues.

7 - Prise en compte des déchets directs et des eaux usées

7.0 Remarque liminaire

Les éléments exposés ci-dessous visent à affecter un "contenu en gaz à effet de serre" aux processus permettant le traitement de fin de vie des déchets (mise en décharge, incinération, recyclage). Quel que soit le mode de traitement, nous avons supposé qu'une tonne de déchets engendrait 80 tonnes.km de transport en camion-poubelle, de 20 tonnes de PTAC environ, et rempli à moitié en moyenne sur l'ensemble du parcours (il part vide et finit plein), ce qui correspond à 4 kg équivalent carbone.

En ce qui concerne la valorisation énergétique des déchets qui ne sont pas recyclés comme matière première pour une fabrication de matériau neuf, on utilisera la méthode des impacts évités. La méthode de valorisation dépendra du type de déchet et des informations disponibles. D'une manière générale l'énergie récupérée lors de l'incinération peut être calculée à partir du pouvoir calorifique du déchet et du rendement chaudière de l'incinération (estimée à 86%). Les gaz à effet de serre économisés du fait de cette valorisation énergétique peuvent être évalués à partir des facteurs d'émission donnés au chapitre 2.

7.1 Matériaux inertes

On qualifie d'inerte tout matériau qui ne brûle pas ou ne fermente pas. Dans la pratique cette catégorie regroupe tout ce qui ne contient pas de composés organiques, c'est à dire :

- les métaux,
- les autres minéraux (verre, pierres, gravats, etc).

7.1.1 Matériaux inertes - décharge et incinération

Que ces matériaux soient mis en décharge ou dans un four, ils ne conduisent pas à des émissions de gaz à effet de serre.

En fait, il faut encore regarder un peu plus en détail :

- en décharge, ce sont des matériaux inertes, et la seule émission liée à leur statut de déchet a été le transport jusqu'à la décharge et la maintenance de celle-ci. Les quantités d'énergie en jeu sont négligeables en comparaison de l'énergie qu'il a fallu dépenser pour fabriquer le matériau¹⁶², toutefois pour ne pas mettre une valeur nulle, nous proposons de leur affecter 80 km de transport en camion-poubelle, soit 4 kg d'équivalent carbone par tonne.
- dans un four, on finit par récupérer une partie des matériaux après la combustion (on récupère de l'aluminium ou de l'acier dans le mâchefer, et ce dernier est quelques fois utilisé pour faire des revêtements routiers). Toutefois, comme il s'agit ici d'un recyclage en boucle fermée (on récupère la ferraille pour faire de l'acier neuf), il n'en est pas tenu compte lors de la fin de vie, pour les raisons exposées dans le document méthodologique.

De la sorte, pour les déchets directs de l'entité ou les emballages qu'elle utilise pour les produits vendus ou fournis, **la fin de vie des déchets minéraux est conventionnellement limitée à leur transport**, soit 4 kg équivalent carbone par tonne.

7.1.2 Matériaux inertes - valeur par défaut

Comme toutes les modalités de traitement des déchets sont équivalentes, et que toutes les fins de vie pour les déchets minéraux valent 4 kg équivalent carbone par tonne, la valeur moyenne du contenu en carbone de la fin de vie des déchets inertes est de 4 kg équivalent carbone par tonne.

Notons que ces valeurs sont très faibles par rapport au contenu en carbone lié à la fabrication des matériaux inertes.

7.2 Matériaux non fermentescibles mais combustibles

Il s'agit essentiellement du plastique (le papier étant lui fermentescible¹⁶³).

¹⁶² Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998

¹⁶³ Il s'agit en effet d'un composé organique qui se décompose en décharge

7.2.1 Cas du plastique mis en décharge

Si le plastique est mis en décharge il ne fait l'objet d'aucune réaction chimique particulière (en particulier il ne fermente pas). La seule émission liée à ce traitement est son transport, soit 4 kg équivalent carbone par tonne, toutefois ce poste est marginal au regard des émissions liées à la fabrication du matériau.

Lorsqu'un plastique est mis en décharge, les émissions afférentes seront donc comptabilisées à 4 kg équivalent carbone par tonne.

7.2.2 Cas du plastique incinéré sans valorisation

Si les plastiques sont destinés à être incinérés, alors le carbone fossile qu'ils contiennent (car les plastiques sont fabriqués à partir d'hydrocarbures fossiles, donc leur carbone est fossile) est libéré par la combustion et pris en compte.

Le contenu en carbone fossile d'une tonne de plastique est évalué forfaitairement à l'équivalent en carbone fossile d'une tonne de pétrole, c'est à dire 800 kg équivalent carbone, sauf pour le PET pour lequel on comptera uniquement 500 kg équivalent carbone, sur la base d'une étude déjà citée¹⁶⁴.

Il faut également transporter le matériau, ce qui est pris en compte à hauteur de 4 kg équivalent carbone par tonne.

De ce fait, on comptabilisera l'incinération sans valorisation à hauteur de

- **504 kg équivalent carbone par tonne pour le PET**
- **804 kg équivalent carbone par tonne pour tous les autres plastiques et la valeur par défaut.**

7.2.3 Cas du plastique incinéré avec valorisation

La valorisation consiste à utiliser l'énergie de combustion, soit pour faire de l'électricité, soit pour produire de la vapeur (utilisée ensuite pour du chauffage). La manière conventionnelle de prendre en compte cette valorisation est d'estimer les quantités de CO₂ que l'on aurait du émettre pour obtenir le même service (chaleur ou électricité) à partir de gaz naturel, puis de retrancher cette quantité de CO₂ du total dégagé par la combustion, pour obtenir une émission nette correspondant à la combustion avec valorisation.

Pour cela nous ferons les hypothèses suivantes :

- la majeure partie des installations de récupération sert à faire de l'électricité,
- les émissions de carbone fossile évitées sont celles de la moyenne annuelle et géographique du parc pour la production d'une même quantité d'électricité.

¹⁶⁴ Le document Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998, donne respectivement 750 kg et 500 kg équivalent carbone pour la combustion d'une tonne de plastique autre que le PET et une tonne de PET

Sur ces bases les valeurs sont les suivantes pour les USA¹⁶⁵ :

Nature du matériau incinéré	Economies de la valorisation (kg équivalent carbone par tonne de matériau incinéré)
Polyéthylène (haute ou basse densité)	-510
Polystyrène, PVC	-510
PET	-260
Plastique, valeur moyenne conventionnelle	-510 ⁽¹⁶⁶⁾

Tableau 120 : facteurs d'émission résultant de la valorisation thermique de l'incinération de différents plastiques aux Etats-Unis.

Si l'on raisonne de la même manière en France, les émissions évitées ont un contenu en carbone bien plus faible (23 g équivalent carbone par kWh en France contre 167 aux USA). Il semble par ailleurs logique de conserver une moyenne annuelle, et non une valeur restreinte à certains mois ou certaines heures, les incinérateurs fonctionnant toute l'année.

Il convient donc, pour adapter ce nombre à la France, et en supposant que les rendements énergétiques de la conversion de l'incinération en électricité sont à peu près les mêmes aux USA et en France (ce qui est une hypothèse raisonnable), de multiplier la valeur américaine des émissions évitées par une fraction qui vaut 23/167.

En effet, si l'on cherche à estimer l'impact évité pour la production d'électricité, il est évident que cet impact est plus élevé si l'alternative est le charbon, que si c'est le nucléaire ou l'hydraulique.

Sur ces bases, nous comptabiliserons les émissions évitées lors de la valorisation avec les économies suivantes :

Nature du matériau incinéré	Economie liée à la valorisation, en kg équivalent carbone par tonne de matériau incinéré
Polyéthylène (haute ou basse densité), Polystyrène, PVC	-70
PET	-36
Plastique, valeur moyenne conventionnelle	-70

Tableau 121 : facteurs d'émission résultant de la valorisation thermique de l'incinération de différents plastiques en Europe.

Il en résulte que les matériaux incinérés avec valorisation seront pris en compte avec les valeurs nettes suivantes :

Nature du matériau incinéré	kg équivalent carbone par tonne de matériau incinéré avec valorisation
Polyéthylène (haute ou basse densité), Polystyrène, PVC	735
PET	469
Plastique, valeur moyenne conventionnelle	735

Tableau 122 : calcul des facteurs d'émission de l'incinération de plastiques avec valorisation.

¹⁶⁵ Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998, p. 85

¹⁶⁶ la valeur par défaut sera celle de quasiment tous les plastiques

7.2.4 Cas du plastique recyclé

De même que ci-dessus, les économies liées au recyclage ne sont pas prises en compte dans la fin de vie, car nous avons, sauf exception, un recyclage en boucle fermée. Une tonne de plastique recyclé est donc comptée à hauteur de son transport jusqu'au centre de traitement des déchets, soit 4 kg équivalent carbone par tonne.

7.2.5 Répartition française et valeurs moyennes

En 1999, la répartition par filière de la fin de vie des plastiques se présentait comme suit (uniquement pour les emballages, mais comme il est dit plus haut ce sera le cas prépondérant lorsque l'on ne connaîtra pas la destination)¹⁶⁷ :

% de mise en décharge sans valorisation	% de mise en décharge avec valorisation	% d'incinération sans valorisation.	% d'incinération avec valorisation.	% de recyclage matière
60%	0%	7%	27%	5%

Tableau 123 : répartition française du traitement des déchets plastiques dans les différentes filières.

La valeur moyenne étant, par définition, la somme des valeurs unitaires multipliées par les occurrences des valeurs unitaires, on peut donc calculer ces valeurs moyennes des contenus en carbone de la fin de vie des plastiques en France.

Par exemple la valeur moyenne du PET sera $60\% * 4 + 7\% * 504 + 27\% * 468 + 5\% * 4 = 167$ ¹⁶⁸

Le calcul fait pour les autres plastiques donne alors le tableau suivant.

Matériau	Kg de C lié au traitement de fin de vie, par tonne de matériau jeté, en moyenne
PET	167
Autres plastiques	261

Tableau 124 : facteurs d'émission Français moyen du traitement des déchets plastiques

Ces valeurs seront retenues lorsque la destination n'est pas connue.

¹⁶⁷ La valorisation des emballages en France, Ademe, 1999

¹⁶⁸ Le calcul ci-dessus donnerait en fait un peu moins mais les pourcentages affichés sont des arrondis ; le calcul exact donnant bien 165.

7.3 Matériaux fermentescibles et combustibles

Cette rubrique concerne tout ce qui n'est pas inclus dans les autres catégories, à savoir essentiellement :

- les déchets alimentaires,
- les papiers et cartons.

7.3.1 Mise en décharge sans valorisation

7.3.1.1 Papiers et cartons

Si les papiers et cartons sont mis en décharge, ils fermentent, ce qui engendre des émissions de méthane et de CO₂. Par ailleurs, une partie du carbone - non fossile, puisque papiers et cartons sont faits avec du bois - est séquestré dans le sol.

Une étude de l'EPA¹⁶⁹, tenant compte des émissions de méthane et de la séquestration d'une partie du carbone dans les décharges, donne, pour le papier et le carton (jetés secs, mais qui se mouillent au contact d'autres déchets) les valeurs suivantes d'émission de méthane (en équivalent carbone) par tonne de déchets secs.

Matériau mis en décharge sans récupération du méthane	Equivalent carbone de la fin de vie selon le type de matériau (kg de C par tonne)
Papier jeté au bureau (moyenne)	400
Carton	280

Tableau 125 : facteurs d'émission des déchets papiers et cartons mis en décharge sans valorisation

De la sorte, le papier mis en décharge sera affecté d'un facteur d'émission de **400 kg équivalent carbone par tonne**.

La même source amène à prendre en compte **280 kg équivalent carbone par tonne** pour la mise en décharge du carton.

7.3.1.2 déchets alimentaires

La fermentation des déchets alimentaires mis en décharge engendre également des émissions de méthane, ainsi que des émissions de protoxyde d'azote (N₂O), ces dernières étant toutefois marginales dans l'ensemble.

De même que pour le papier, une partie du carbone - non fossile - contenu dans le déchet est cependant séquestré dans le sol de la décharge.

¹⁶⁹ Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998, p. 108

Le bilan du méthane émis moins le carbone séquestré conduit à comptabiliser environ **290 kg équivalent carbone par tonne de déchets alimentaires mis en décharge**¹⁷⁰.

7.3.2 Mise en décharge avec valorisation

La valorisation consiste à récupérer le méthane émis par la fermentation des déchets et en faire le même usage que du gaz naturel.

Dans ce cas, il y a deux sources d'économies par rapport à la situation précédente :

- le méthane n'est plus libéré dans l'atmosphère,
- sa combustion peut être utilisée pour fournir de l'énergie.

7.3.2.1 déchets alimentaires

Le méthane produit par une tonne de déchets alimentaires représente donc 290 kg équivalent carbone (cf. 7.3.1.2 ci-dessus), ce qui correspond à l'émission de 50 kg de méthane environ¹⁷¹. Lorsqu'il sera converti en électricité, ce méthane conduira à l'émission de 37 kg de CO₂, mais qui n'est pas du CO₂ fossile. Ce CO₂ non fossile se substitue néanmoins au CO₂ fossile qui aurait été émis avec du méthane d'origine fossile utilisé dans la centrale de référence, et il faut donc également comptabiliser une économie pour le CO₂ fossile évité en utilisant ce méthane pour produire de l'électricité.

Par rapport à la mise en décharge sans valorisation, la récupération du méthane permet l'économie suivante :

- 290 kg équivalent carbone pour ne pas avoir émis de méthane dans l'atmosphère,
- 37 kg équivalent carbone de CO₂.

L'équivalent carbone attaché au fait de mettre une tonne de déchets alimentaires dans une décharge avec valorisation du méthane est donc de **- 37 kg équivalent carbone par tonne** (c'est donc une économie).

7.3.2.2 papiers et cartons

L'équivalent carbone du méthane net (méthane brut moins séquestration du carbone) produit par une tonne de papier est de 400 kg équivalent carbone, selon les données du 7.3.1.1. Cela correspond à 69 kg de méthane environ, et suivant le même raisonnement que précédemment (puisque le papier et le carton sont issus de la biomasse) cela permet d'éviter le rejet de CO₂ fossile pour 52 kg équivalent carbone.

¹⁷⁰ Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998, p. 108

¹⁷¹ ce calcul a été fait à une époque où le PRG du méthane était de 21. La quantité de méthane est donc donnée par la division $(290/21)*44/12$

Par rapport à la mise en décharge sans valorisation, l'économie est donc :

- de 400 kg de C par tonne au titre de la combustion du méthane,
- de 52 kg de C par tonne au titre du CO₂ évité pour faire de l'électricité au gaz.

L'équivalent carbone attaché au fait de mettre une tonne de papier dans une décharge avec valorisation du méthane est donc de **- 52 kg équivalent carbone par tonne**.

En ce qui concerne le carton l'économie est, en suivant le même raisonnement, de **- 36 kg équivalent carbone par tonne**.

7.3.3 Incinération sans valorisation

7.3.3.1 déchets alimentaires

L'incinération des déchets alimentaires conduit à des émissions de carbone non fossile, et qui plus est à rotation rapide (la production de végétaux pour l'alimentation absorbe du carbone qui est recyclé dans l'atmosphère dans l'année ou à peu près ; avec la viande le cycle est un peu plus long mais pas beaucoup plus¹⁷²).

La seule contribution des déchets alimentaires incinérés sera donc leur transport jusqu'à l'incinérateur, à raison de 4 kg équivalent carbone par tonne de déchets.

7.3.3.2 Papiers et cartons

L'incinération des papiers conduit aussi à des émissions de gaz carbonique. Toutefois la combustion du papier restitue au milieu ambiant du carbone organique, puisque le papier est fait à partir d'arbres (conifères notamment) et de vieux tissus, eux-mêmes en coton.

Par ailleurs, la combustion de bois provenant de forêts dont la superficie reste constante est considérée comme neutre sur le plan climatique, puisque les émissions provenant du bois brûlé ne font que compenser la séquestration de CO₂ par les arbres non coupés et la parcelle replantée¹⁷³. Dès lors, la combustion du papier - ou du carton - sera aussi considérée comme neutre sur le plan climatique, puisqu'il s'agit, en quelque sorte, de brûler du bois préalablement transformé en papier. L'incinération du papier sera donc neutre, seul son transport jusqu'à l'incinérateur étant pris en compte, à raison de 4 kg équivalent carbone par tonne de papier ou de carton.

¹⁷² La volaille et les porcs sont abattus au bout de quelques mois, et seuls les bovins "survivent" quelques années, durée qui est faible au regard des constantes de temps du changement climatique.

¹⁷³ Pour être très précis, ce qui est neutre sur le plan climatique est de brûler chaque année ce que les forestiers appellent les accrus, c'est à dire la quantité de bois qui a poussé dans l'année.

7.3.4 Incinération avec valorisation

7.3.4.1 Déchets alimentaires

L'EPA propose une valeur de 60 kg équivalent carbone évités par tonne incinérée lorsque l'on récupère l'énergie de combustion des déchets alimentaires¹⁷⁴. Mais, comme nous l'avons vu plus haut, cette économie est basée sur un "contenu en équivalent carbone" du kWh (car cette énergie sert à produire de l'électricité) qui est de 167 g équivalent carbone par kWh, alors qu'en France nous sommes à 23 g équivalent carbone par kWh.

Nous aboutissons alors à une économie conventionnelle de $60 \times 23 / 167 = \mathbf{8 \text{ kg équivalent carbone par tonne}}$ de déchets alimentaires incinérés avec récupération de l'énergie.

Comme il faut retrancher de cette économie le transport jusqu'à l'incinérateur, une tonne de déchets alimentaires incinérés avec valorisation sera comptabilisée à hauteur de **- 4 kg équivalent carbone par tonne**.

7.3.4.2 Papiers et cartons

Là encore, notre seule référence est le document précité de l'EPA. En suivant le même raisonnement qu'au § 7.2.3, nous aboutissons à tenir compte d'un crédit d'émissions qui est de :

Nature du matériau	Kg équivalent carbone par tonne économisés par la valorisation aux USA	Kg équivalent carbone par tonne économisés par la valorisation en France
Papier	-180	-24
Carton	-190	-26

Tableau 126 : facteurs d'émission résultant de la valorisation thermique de l'incinération depapiers et cartons aux Etats-Unis et en France.

De la sorte, les facteurs d'émission pour l'incinération avec valorisation des papiers et cartons seront la somme de cette valeur négative, et d'un montant de 4 kg équivalent carbone par tonne correspondant au transport.

7.3.5 Recyclage

De même que ci-dessus le recyclage est conventionnellement pris en compte pour zéro, aux émissions de transport près.

¹⁷⁴ Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998, p. 91

7.3.6 Moyenne française

En ce qui concerne les déchets alimentaires nous tiendrons pour négligeable la proportion de décharges récupérant le méthane, ce qui donne la répartition par filière suivante¹⁷⁵.

% de mise en décharge sans valorisation	% de mise en décharge avec valorisation	% d'incinération sans valorisation.	% d'incinération avec valorisation.
60%	0%	7%	33%

Tableau 127 : répartition française du traitement des déchets alimentaires dans les différentes filières.

Sur cette base, la valeur moyenne d'émission de gaz à effet de serre engendrée par la fin de vie des déchets alimentaires est de 173 kg équivalent par tonne. C'est cette valeur qui sera retenue lorsque la destination n'est pas connue.

Pour les papiers et cartons la répartition par type de filière est la suivante¹⁷⁶:

% de mise en décharge sans valorisation	% de mise en décharge avec valorisation	% d'incinération sans valorisation.	% d'incinération avec valorisation.	% de recyclage matière
29%	4%	5%	18%	44%

Tableau 128 : répartition française du traitement des papiers et cartons dans les différentes filières.

Cela amène à des valeurs moyennes de :

- * **112 kg équivalent carbone par tonne pour le papier.**
- * **78 kg équivalent carbone par tonne pour le carton,**

Ces valeurs seront celles retenues lorsque la destination du déchet n'est pas connue.

7.4 Eaux usées

Nous ne traitons pas ici le cas de figure des lisiers, et autres déchets agricoles liquides. Pour les activités agricoles, l'intervention d'un spécialiste est indispensable, tant les cas de figure sont nombreux, complexes, et l'état de l'art encore embryonnaire.

Les émissions des eaux usées proviennent de deux sources :

- la fermentation en milieu anaérobie de molécules contenant du carbone, ce qui conduit à des émissions de méthane,
- la dégradation de composés azotés, ce qui donne des émissions de N₂O.

¹⁷⁵ La valorisation des emballages en France, Ademe, 1999

¹⁷⁶ La valorisation des emballages en France, Ademe, 1999

Nous ne traitons ci-après que le cas du méthane : le N₂O, qui provient de la dégradation des composés azotés est en effet mineur dans le cas des eaux usées, et concerne surtout les déjections porcines en agriculture.

Le principe est le suivant : selon le système de traitement (qui conditionne le caractère aérobie ou pas) et les conditions climatiques (qui conditionnent la rapidité de fermentation) une part plus ou moins grande du carbone disponible pour être transformé en méthane est effectivement converti en méthane.

Pour la méthodologie pour laquelle les facteurs d'émission sont utilisés, nous nous bornerons à donner la valeur supérieure des émissions possibles, qui sont de 0,25 kg de méthane par kg de carbone organique dégradable contenu dans les déchets¹⁷⁷.

Le poids de carbone organique est aussi le poids de ce que l'on appelle classiquement la demande biochimique en oxygène (DBO), qui est un indicateur classique de la teneur des eaux usées en produits fermentescibles.

Faute de disposer de données précises sur site (mesures directes, existence d'une méthode couvrant précisément le cas de figure concerné, etc) la formule retenue par défaut sera :

$$\text{kg NH}_4 \text{ produit} = 0,25 * \text{kg DBO}$$

Il en résulte que l'équivalent carbone sera alors de

$$\text{kg équivalent carbone provenant des eaux usées} = 0,25 * \text{kg DBO} * 6,27^{178}$$

Si ce poste est majeur dans le total (il le sera probablement rarement), il faudra alors effectuer des investigations détaillées, voire des mesures directes.

En outre, pour certaines activités rejetant des eaux usées très chargées en matière organique, il existe des valeurs moyennes applicables si la mesure directe n'est pas possible. Attention ; ces valeurs moyennes ne s'appliquent que pour les eaux usées rejetées **sans traitement** dans l'environnement. On ne peut en aucun cas les appliquer à une industrie qui épure ses eaux avant de les rejeter, ou à une industrie qui envoie ses eaux usées dans une station collective qui les épure très peu de temps après leur rejet.

¹⁷⁷ A Quick Reference Guide, Estimating Potential Methane Production, Recovery and Use from Waste, Ministère australien de l'environnement (www.environment.gov.au), 1997

¹⁷⁸ 6,27 est la valeur approchée de $(23 * 12 \div 44)$, c'est à dire l'équivalent carbone d'un kg de méthane

Par la force des choses, ces valeurs ne sont pas plus applicables à une activité tertiaire.

Nature d'eaux usées	Kg équivalent carbone par m ³ d'eau usées
Eaux usées de la production de sucre	140
Eaux usées de la production de boissons alcoolisées	57
Eaux usées de la brasserie	14
Eaux usées de la chimie organique	43
Eaux usées de l'amidon	14
Eaux usées des produits laitiers	3
Eaux usées de l'industrie agroalimentaires, légumes	6
Eaux usées de la fabrication d'huiles alimentaires	72
Eaux usées de la papeterie	6
Eaux usées de la tannerie	7
Eaux usées de l'agroalimentaire, valeur par défaut	4

Tableau 129 : facteur d'émissions du traitement des eaux usées.

8 - Traitement de fin de vie des emballages

Les emballages des produits vendus sont discriminés par rapport à d'autres types de déchets dans la méthode pour les raisons suivantes :

- à la différence des autres matériaux entrants pris en compte, ce sont des déchets par nature : après utilisation ils seront nécessairement jetés,
- contrairement aux déchets directement jetés par l'entreprise, pour lesquels il est possible de savoir grosso modo de quel type de traitement ils feront l'objet (mise en décharge, incinération...), il est difficile de savoir exactement, pour un emballage donné, où cet emballage finira sa vie,
- compte tenu du grand nombre d'emballages produits, et de la répartition géographique souvent large de la zone où ils seront jetés, il est sensé d'avoir une approche statistique pour la fin de vie de ces objets particuliers,
- enfin la gestion des emballages relève souvent de quelques personnes bien identifiées dans une entreprise.

Comme on l'a expliqué ci-dessus, il est impossible de savoir où un emballage donné finira sa vie. Par contre, comme une entreprise emballe généralement une grande quantité de produits, qui seront vendus un peu partout, l'approche qui a été retenue ici est statistique : on suppose que le traitement de fin de vie des emballages reflètera la répartition en France des divers systèmes de traitement de déchets :

- incinération avec valorisation,
- incinération sans valorisation,
- mise en décharge avec valorisation du méthane,
- mise en décharge sans valorisation du méthane,
- recyclage.

Dit autrement, cela revient à utiliser, pour la fin de vie des emballages, la valeur moyenne des émissions présentée aux § 7.1.2, 7.2.5 et 7.3.5 ci-dessus.

Matériau	Emissions de fin de vie en kg équivalent carbone par tonne
Métaux	4
PET	167
Autres plastiques	261
Verre	4
Carton	78
Papier	112

Tableau 130 : facteurs d'émission du traitement des déchets d'emballage.

La fabrication des emballages se traite quant à elle comme un poste particulier dans les "Matériaux entrants", et il est alors possible d'agréger les émissions de fabrication et les émissions de fin de vie de ces emballages (le tableur fourni avec la méthode propose cette agrégation de manière automatique).

Le tableur fournit, sous forme de graphique, un graphique "Total émissions emballages", en utilisant les valeurs précédentes sommées avec celles de la fabrication (§5). Le tableau suivant récapitule cette sommation.

Matériau	Kg équivalent carbone fabrication et fin de vie "moyenne"
Acier ou fer blanc issu de minéral	874
Acier ou fer blanc issu à 100% de recyclé	304
Aluminium issu de minéral	2 894
Aluminium issu à 100% de recyclé	674
Polyéthylène haute densité neuf	761
Polyéthylène haute densité issu à 100% de recyclé	511
Polyéthylène basse densité neuf	811
Polyéthylène basse densité issu à 100% de recyclé	491
PET neuf	1 367
PET issu à 100% de recyclé	567
Polystyrène neuf	1 031
PVC neuf	781
Plastique - moyenne	911
Composite - polyuréthane	1 461
Films plastiques polyéthylène	1 861
Verre plat	418
Verre bouteille	124
Verre flacons	404
Verre issu à 100% de recyclé	169
Verre technique	1 004
Fibre de verre	584
Ciment	239
Béton	104
Cuivre	804
Zinc	804
Nickel	2 504
Plomb	574
Autres métaux courants	1 004
Carton (non imprimé)	578
Papier (non imprimé)	662

Tableau 131 : facteurs d'émission de la production de matériaux d'emballage

Ce sont ces valeurs qui servent à établir un graphique explicatif dans le tableur, pour individualiser l'impact "de bout en bout" des emballages.

9 - Prise en compte de l'amortissements des immobilisations

9.0 Remarque liminaire

Le point essentiel de cette rubrique est d'obtenir les facteurs d'émission permettant une estimation des émissions de gaz à effet de serre associées à la construction des immobilisations (immeubles, outillage). En effet, pour construire un bâtiment ou une machine, il faut produire des matériaux de base, puis les transporter et les assembler, et tout cela engendre des émissions, dont le présent chapitre propose une prise en compte approximative à partir de la surface, normalement relativement facile à obtenir.

La particularité méthodologique de ce poste est de proposer de procéder avec des amortissements, exactement comme pour un bilan comptable. L'amortissement proposé est linéaire, et pratiqué sur la même durée que l'amortissement comptable : il s'agit alors d'affecter sur plusieurs années les émissions qui ont correspondu à la fabrication de la machine ou de l'immeuble utilisé.

Les facteurs d'émission seront affinés par itérations successives lorsque quelques calculs précis auront été faits chez des constructeurs de bâtiments et des fabricants de biens d'équipement.

9.1 Bâtiments

NB : Les valeurs proposées ci-dessous découlent des dépenses énergétiques requises pour construire divers types de bâtiments, et ne concernent donc que le CO₂ fossile.

Une étude a été réalisée par le CNRS (programme ECODEV) en 1998 qui donne la répartition des bâtiments mis en chantier en 1990 par nature d'utilisation et qui donne aussi les dépenses énergétiques globales par nature de bâtiment. Les consommations intermédiaires (transports, fabrication des matériaux, etc) sont prises en compte.

Les bâtiments sont censés être soit à structure béton (par exemple un immeuble de bureaux), soit à structure métallique (par exemple un hangar ou un bâtiment d'exploitation). Une estimation de la répartition entre les 2 a été faite par le CNRS.

Enfin un bâtiment à structure métallique est *grosso modo* 3 fois plus économe en énergie à la construction qu'un bâtiment béton.

Type de bâtiment	M ² totaux	Milliers de tonnes équivalent pétrole correspondant à la construction	% en structure métallique
Logements	25 080 000	4 050	0%
Bâtiments agricoles	12 733 000	2 056	50%
Bâtiments industriels	17 495 000	2 825	70%
Garages	1 854 000	299	50%
Commerces	5 553 000	897	30%
Bureaux	6 981 000	1 127	10%
Enseignement	2 536 000	410	0%
Santé	2 599 000	420	0%
Loisirs	2 213 000	357	20%

Tableau 132 : dépenses énergétiques pour la construction de bâtiment selon leur activité.

Sur la base de ces données, on peut reconstituer la dépense énergétique au m² des bâtiments construits (tableau ci-dessous).

Type de bâtiment	M ² totaux	M ² métalliques	M ² béton	kep ¹⁷⁹ /M ² métal	Kep/M ² béton
Logements	25 080 000	0	25 080 000	54	161
Bâtiments agricoles	12 733 000	6 366 500	6 366 500	81	242
Bâtiments industriels	17 495 000	12 246 500	5 248 500	101	303
Garages	1 854 000	927 000	927 000	81	242
Commerces	5 553 000	1 665 900	3 887 100	67	202
Bureaux	6 981 000	698 100	6 282 900	58	173
Enseignement	2 536 000	0	2 536 000	54	162
Santé	2 599 000	0	2 599 000	54	162
Loisirs	2 213 000	442 600	1 770 400	62	186

Tableau 133 : dépense énergétique pour la construction des bâtiments par matériaux

Il reste à déterminer le facteur d'émission d'une kep (kilo d'équivalent pétrole) dans la construction, si possible en tenant compte des gaz mineurs.

Pour cela, la méthode qui a été suivie est décrite ci-dessous :

- le CNRS donne des consommations énergétiques en tep par secteur d'activité,
- le CEREN donne, pour chaque code NAF, la proportion d'électricité dans l'énergie totale utilisée,
- en rapprochant les données CEREN et CNRS, nous obtenons une valeur de la proportion d'électricité dans chaque branche (ci-dessous),
- nous supposons que l'électricité est sans CO₂ (ce qui est acceptable face au reste),
- le solde, qui consiste en des combustibles fossiles, se voit affecter la valeur standard de 0,76 tonne équivalent carbone par tep, ce qui permet d'obtenir les émissions énergétiques,
- des émissions non énergétiques sont rajoutées dans le ciment (ratio de 1,35 pour un), et dans les métaux non ferreux (ratio 1 pour 1, pour l'aluminium).

¹⁷⁹ kep signifie kilo équivalent pétrole, tep tonne équivalent pétrole

Cela donne le tableau ci-dessous :

Produits	Consommation amont en tep	part de l'électricité	tep combustible	tonnes de C/TEP pour le solde	Tonnes de C énergie	t C non énergie	total tonnes de C
Métaux non ferreux	330 000	50%	165 000	0,76	125 400	125 400	250 800
Métaux ferreux	1 427 000	20%	1 141 600	0,76	867 616		867 616
Matériaux de construction	3 020 000	15%	2 567 000	0,76	1 950 920	2 633 742	4 584 662
Verre	358 000	40%	214 800	0,76	163 248		163 248
Travail des métaux	1 088 000	50%	544 000	0,76	413 440		413 440
Plastiques	206 000	25%	154 500	0,76	117 420		117 420
Matériel électrique	992 000	50%	496 000	0,76	376 960	376 960	753 920
Machines	3 864 000	50%	1 932 000	0,76	1 468 320		1 468 320
Biens ménagers	131 000	50%	65 500	0,76	49 780		49 780
Parachimie	140 000	50%	70 000	0,76	53 200		53 200
Bois	263 000	80%	52 600	0,76	39 976		39 976
TOTAL	11 819 000		7 403 000		5 626 280	3 136 102	8 762 382

Tableau 134 : émissions totales engendrées par la construction des bâtiments en France par activité.

On voit donc que les émissions sont de 8.800.000 tonnes d'équivalent carbone (incluant une partie des gaz mineurs) pour une consommation de 11.819.000 tep, donc en première approximation cela nous amène, pour la suite du raisonnement, à 0,74 tonne équivalent carbone par tep utilisée dans le bâtiment.

On peut alors assez facilement obtenir des facteurs d'émission par m² à partir des données ci-dessus, en affectant aux "contenus en énergie" du tableau 134 le facteur d'émission de 0,74 tonne équivalent carbone par tep utilisée dans le bâtiment

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

Tableau 135 : calcul des facteurs d'émission pour la construction des bâtiment en fonction de leur type et de leur activité.

Par exemple, les émissions liées à la construction d'une maison de 150 m² en béton seront de l'ordre de 150*119 = 17.850 kg équivalent carbone, ou encore 17,8 tonnes équivalent carbone. Quand on voit que le chauffage de 150 m² représente de 0,5 à 2 tonnes équivalent carbone par an, ce montant n'est pas tout à fait négligeable, même amorti sur quelques dizaines d'années.

Cette méthode, rudimentaire, permettra cependant de modéliser, en ordres de grandeur, les émissions liées à la construction d'une nouvelle infrastructure et celles liées à l'amortissement. Le facteur d'incertitude par défaut est estimé égal à 50%.

Si l'on connaît les poids de matière utilisés dans le bâtiment (cas de la construction) on pourra aussi tenter une approche par les poids en les convertissant en équivalent carbone et en ajoutant conventionnellement 50% au total obtenu pour tenir compte des consommations intermédiaires (transport, déplacement des salariés du chantier, etc). Cela est surtout recommandé pour les bâtiments restant à construire, afin de déterminer l'impact du choix des matériaux.

9.2 Routes et parkings

La construction des routes, comme celle de toute infrastructure, requiert d'avoir au préalable fabriqué les matériaux qui entreront dans sa réalisation (acier, béton, enrobés, bitume, etc).

La seule publication actuellement disponible en France est une étude réalisée par Colas en septembre 2003¹⁸⁰, d'où sont tirés les chiffres ci-dessous.

9.2.1 Constituants primaires

Tout comme un bâtiment est réalisé à partir de constituants primaires tels que briques, plaques de ciment, armatures de béton et béton liquide, tuiles, etc, une voie routière est réalisée à partir de composants primaires qui sont mis en jeu de manière variable selon le type de voie qui est construite. En fait les véritables constituants primaires rentrent dans 3 catégories :

- des granulats, c'est-à-dire des constituants provenant de carrières et plus ou moins finement concassés,
- du liant, qui est l'équivalent routier du ciment,
- enfin du métal, pour faire des glissières ou des équivalents routiers du béton armé.

Ces composants sont alors mélangés en parts variables et fournissent des "produits" qui sont directement utilisés lors de la construction, et qui portent des noms usuels pour les sociétés de travaux routiers.

Seuls sont mentionnés ci-dessous les produits dont les équivalent carbone ne sont pas abordés au chapitre 5 (donc pas l'acier). Ils s'agit pour l'essentiel de constituants propres à la construction de voies routières. La publication discrimine les émissions des phases de fabrication, de transport et de mise en œuvre. Le cas échéant, il sera donc possible de "réduire" les facteurs d'émission si l'une de ces phases est absente du cas considéré. Il s'agit bien entendu de valeurs moyennes.

¹⁸⁰ La route écologique du futur, analyse du cycle de vie, Colas, 2003

Produit	Kg équivalent carbone par tonne					Total
	Liants	Granulats	Fabrication	Transport	Mise en œuvre	
Béton bitumineux	16	9,4	22	5,3	0,6	53
Grave bitume 3	11	7,6	22	5,3	0,6	47
Enrobé à module élevé	17	9,4	23,1	5	0,6	55
Enrobé tiède	17	9,4	20,5	5,3	0,6	53
Grave émulsion	14	9,4	1	5,4	0,4	30
Béton bitumineux à froid	20	9,1	1	5,7	0,4	36
Grave ciment	39	5,7	1	4,5	0,4	51
Grave ciment préfissurée	40	5,7	1	4,5	0,4	52
Grave liant hydraulique	10	5,1	1	4,1	0,4	21
Grave liant routier préfissurée	10	5,7	1	4,5	0,4	22
Béton de ciment	118	9,6	1	5,6	0,2	134
Béton armé continu	188	5,1	1	5,6	0,2	200
Grave non traitée		9,6		4,5	0,4	15
Sol traité liant routier	12			0,5	1,1	14
Recyclage en place à chaud	6	1		0,8	34,2	42
Béton bitumineux avec 10% REC	15	8,6	22	4,9	0,6	51
Béton bitumineux avec 20% REC	9	7,8	22	4,3	0,6	44
Béton bitumineux avec 30% REC	8	7	22	3,9	0,6	42
Béton bitumineux avec 50% REC	6	5,2	22	3,1	0,6	37
Recyclage en place à l'émulsion	7	1	1,1	1	0,4	11

Tableau 136 : facteurs d'émission des matériaux de construction des routes et parking

Dans la mesure où ces valeurs incluent la mise en œuvre, il n'y a pas lieu de tenir compte d'un quelconque supplément à ce titre (à ceci près que l'étude ne précise pas si les déplacements des salariés et les émissions du siège sont réintégrées au prorata, ce qui semble peu probable).

Incidentement notons que le pourcentage du "supplément d'émissions" lié au transport et à la mise en œuvre oscille entre 10 et 30% (le gravier non traité sortant du lot avec 50%) et que la moyenne s'établit à un peu plus de 15% (tableau ci-dessous).

Produit	Supplément transport & mise en œuvre
Béton bitumineux	12%
Grave bitume 3	15%
Enrobé à module élevé	11%
Enrobé tiède	13%
Grave émulsion	24%
Béton bitumineux à froid	20%
Grave ciment	11%
Grave ciment préfissurée	10%
Grave liant hydraulique	28%
Grave liant routier préfissurée	29%
Béton de ciment	5%
Béton armé continu	3%
Grave non traitée	51%
Sol traité liant routier	13%
Béton bitumineux avec 10% REC	12%
Béton bitumineux avec 20% REC	13%
Béton bitumineux avec 30% REC	12%
Béton bitumineux avec 50% REC	11%
Recyclage en place à l'émulsion	15%
Moyenne	16%

Tableau 137 : pourcentage supplémentaire engendré par le transport et la mise en œuvre des matériaux de construction des routes et parkings.

Cela incite à prendre comme référence cette valeur de 15% pour les émissions liées à la phase de construction. En d'autres termes, lorsque les émissions de construction d'un bâtiment seront déduites des poids de matériaux mis en œuvre, on rajoutera un supplément de 15% aux émissions de fabrication des matériaux utilisés pour tenir compte de cette étape.

9.2.2 Facteurs d'émission au m² de surface construite (routes et parkings)

Il ne sera pas toujours facile de disposer des poids de matériaux mis en œuvre, aussi il est également possible de travailler à partir de données plus faciles à obtenir, notamment les catégories de voies routières ainsi que leurs dimensions (longueur et largeur).

9.2.2.1 Catégories de voies routières

Les voies routières neuves sont aujourd'hui dimensionnées en fonction du trafic prévu qu'elles devront subir. Ce trafic se subdivise en deux composantes, l'une concernant les véhicules légers (PTAC < 3,5 tonnes), et les poids lourds (PTAC > 3,5 tonnes).

La nomenclature sur laquelle s'appuie l'étude de Colas précitée est celle du LCPC¹⁸¹-SETRA¹⁸². Elle comporte 8 classes de voies, dont les intitulés vont de TC1 à TC8.

Catégorie de voie	Trafic journalier prévu en poids lourds (dans chaque sens)	Trafic journalier prévu en véhicules particuliers
TC1	< 25	< 380
TC2	25 à 50	400 à 750
TC3	50 à 150	750 à 2 300
TC4	150 à 300	2 300 à 4 600
TC5	300 à 750	4 600 à 11 500
TC6	750 à 2 000	11 500 à 31 000
TC7	2 000 à 5000	31 000 à 77 000
TC8	Plus de 5000	Plus de 77 000

Tableau 138 : trafic des différentes catégories de voies routières.

9.2.2.2 Emissions au m² construit

Outre sa classe, qui conditionne en fait la pression maximale qu'elle peut subir, et donc l'épaisseur ou la rigidité des matériaux mis en œuvre, une voie routière est également déterminée par sa structure, qui peut appartenir à l'une des trois familles suivantes :

- une structure ciment ou béton, rigide,
- une structure semi-rigide,
- une structure bitumineuse.

La publication précitée fournit alors des valeurs pour les émissions ramenées au m² de voie construite, pour chaque classe de voie, en fonction du type de structure. Ces valeurs ont été reprises sur un graphique (elles ne figurent pas sous forme de tableau dans la publication), donc sont susceptible d'être incertaines de quelques % de ce fait, mais compte tenu des

¹⁸¹ LCPC signifie Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

¹⁸² SETRA signifie Service d'Etudes techniques des Routes et Autoroutes (Service du Ministère des Transports)

dispersions très souvent supérieures des valeurs réelles autour des valeurs moyennes fournies par les analyses de cycle de vie, cela n'est pas gênant.

Type de voie	kg équivalent carbone par m ² selon la structure		
	Ciment	Semi-rigide	Bitume
TC1	85	40	15
TC2	87	45	20
TC3	92	45	25
TC4	100	54	28
TC5	105	57	32
TC6	115	60	37
TC7	125	65	40

Tableau 139 : facteurs d'émission de la construction de routes en fonction du type de voie

Les valeurs concernant les voies classées TC8 ne figurent pas dans l'étude, mais une interpolation linéaire des valeurs obtenues pour les classes précédentes (en fonction de la classe) donne probablement un ordre de grandeur correct.

9.2.2.3 Emissions liées aux glissières de sécurité

Pour les voies routières à fort trafic, ou comportant 2 voies dans chaque sens, il est fréquent de trouver des glissières. Comme il s'avère que les émissions au mètre linéaire de voie ne sont pas loin d'être égales à celles liées à la construction de la chaussée, il est impératif d'en tenir compte le cas échéant.

Classe de route	Kg équivalent carbone par mètre de glissière
TC5	88
TC6	280
TC7	280

Tableau 140 : facteurs d'émission des glissières de sécurité en fonction du type de voie

9.2.2.4 Parkings

Les techniques de construction sont les mêmes pour les parkings que pour les chaussées. En première approximation, la structure de chaussée d'un parking de supermarché correspond à une classe de trafic TC2. Celle d'une aire de repos moyenne sur une autoroute correspond à un trafic de classe TC3¹⁸³.

9.3 Machines & véhicules

9.3.1 Véhicules

¹⁸³ Echanges avec Julien BILAL, Colas, Mai 2004

Sur la base des calculs effectués au § 4.1.1.1 nous proposons un facteur d'émission de 1,5 tonne équivalent carbone par tonne de véhicule pour la prise en compte de la fabrication des véhicules terrestres.

Cette estimation tient compte de tous les gaz à effet de serre retenus.

Il est évident qu'un Bilan Carbone de filière serait ici du plus haut intérêt.

9.3.2 Machines de production

Pour les machines (et les lignes de production), nous proposons, jusqu'à plus ample information, de prendre le même facteur d'émission, soit **1,5 tonne équivalent carbone par tonne de machine**.

Cette estimation tient compte de tous les gaz à effet de serre retenus.

Il s'agit bien sûr d'une approximation grossière, toutefois les entreprises disposant de lignes de production consomment généralement de grosses quantités d'énergie pour la fabrication, et cette énergie sera souvent prépondérante devant les amortissements.

9.3.3 Informatique

9.3.3.1 Fabrication des puces

Un chercheur de l'Université des Nations Unies, Eric Williams, a publié dans un rapport intitulé "Computers and the Environment ; understanding and managing their impacts"¹⁸⁴ un article détaillant les consommations d'énergie fossile liées à la production des divers sous-ensembles intervenant dans un ordinateur personnel.

On y trouve tout d'abord les chiffres suivants relatifs à la fabrication des composants (micro-processeur, par exemple) à partir des "galettes" de silicium. La fabrication de la galette n'est pas prise en compte ; il s'agit donc de la consommation d'énergie liée à la seule production des puces à partir des galettes. L'année de référence est 2002 et il s'agit de calculs personnels de l'auteur de cette publication.

Fabrication des puces	Par puce	Total Monde	Par ordinateur
Consommation d'électricité (kWh)	2,9	52 000 000 000	281

¹⁸⁴ publié par Kluwers Academic Publishers, 2004

Consommation directe de combustibles fossiles (GJ)	0,0016	28 000 000	0,155
Consommation globale de combustibles fossiles ¹⁸⁵ (kg)	0,97	17 000 000 000	94

Tableau 141 : type et consommation d'énergie pour la fabrication de puce.

En supposant que le charbon représente 70% de la génération d'électricité, que la consommation directe de combustibles est uniquement du gaz, et enfin que le rendement des centrales est de 50%, nous arrivons à un pourcentage de 90% pour le charbon et 10% pour le gaz dans la répartition entre combustibles fossiles primaires (les 94 kg de combustibles fossiles "contenus" dans les puces d'un ordinateur se répartissent donc en 9,4 kg de gaz et le reste de charbon).

Dans la mesure où les combustibles fossiles utilisés sont donnés en unités de poids et non en unités d'énergie, il faut noter que plus la part du gaz est importante, et plus les émissions sont élevées. Cela est normal : par unité de poids les émissions de CO₂ du gaz sont supérieures à celles du charbon (car une tonne de charbon contient moins d'énergie qu'une tonne de gaz). Ainsi les hypothèses ci-dessus conduisent à surestimer le poids du charbon dans le total (car une partie de l'électricité est faite au gaz, une autre - plus modeste - au pétrole, et enfin il y a peut-être un peu de pétrole dans les consommations directes).

Il y a donc peu de chances que le mix retenu conduise à surestimer les émissions de CO₂ si les poids de combustibles "contenus" dans cette fabrication sont correctement calculés par l'auteur.

9.3.3.2 Circuits imprimés

La même référence bibliographique que ci-dessus donne ensuite des valeurs pour la fabrication des circuits imprimés qui accueilleront les composants (source EIAJ, année de référence 1997).

Fabrication des circuits imprimés	Total Monde	Par ordinateur
Consommation d'électricité (kWh)	4 670 000 000	27
Consommation directe de combustibles fossiles (litres de pétrole)	975 000 000	5,6
Consommation globale de combustibles fossiles (kg)	2 380 000 000	14

Tableau 142 : type et consommation d'énergie pour la fabrication de circuits imprimés.

Avec les mêmes hypothèses qu'au paragraphe précédent, le charbon représente 50% de l'énergie fossile primaire.

¹⁸⁵ inclut la production de l'électricité ; les fabricants de puces sont au Japon et aux USA, où l'électricité issue de combustibles fossiles représente environ les deux tiers du total, ainsi qu'en Europe, où le fossile représente environ 50% du total

9.3.3.3 Ecrans

La même référence bibliographique que ci-dessus donne ensuite des valeurs correspondant respectivement à la fabrication des tubes cathodiques (source EIAJ, année de référence 1997), et des écrans plats (source EPA, année de référence 2002).

Pour les tubes cathodiques, ce sont les données de l'industrie japonaise qui ont servi de référence.

Fabrication des tubes cathodiques	Japon 1995	Par tube
Consommation d'électricité (kWh)	914 200 000	21
Consommation directe de combustibles fossiles (litres de pétrole)	1 330 000	3
Consommation globale de combustibles fossiles (kg)	414 000	9,5

Tableau 143 : consommation d'énergie pour la fabrication de tubes cathodiques.

Pour les écrans plats, les données sont les suivantes :

Fabrication des écrans plats	Par écran plat (kg)
Consommation d'électricité (kWh)	87
Consommation directe de combustibles fossiles (98% de gaz)	198
Consommation globale de combustibles fossiles (kg)	226

Tableau 144 : consommation d'énergie pour la fabrication d'écrans plats.

Avec les mêmes hypothèses qu'au paragraphe précédent, le charbon représente respectivement 58% (tubes) et 47% (écrans plats) de l'énergie fossile primaire.

9.3.3.4 Autres constituants et total

Il reste encore à préciser les consommations de combustibles fossiles liées à la production :

- des matériaux servant à faire les boîtiers des ordinateurs et des écrans à tubes,
- des galettes de silicium pour les fondeurs de composants,
- des produits chimiques et matériaux de base (acier, plastique, verre...) utilisés pour la production des ordinateurs.

Sans précisions sur la part de l'électricité, les valeurs contenues dans la publication exploitée sont les suivantes :

Fabrication des matériaux	Kg de combustibles fossiles par ordinateur
Matériaux pour le boîtier de l'unité centrale	21
Matériaux pour le boîtier de l'écran	22
Production des galettes de silicium	17
Production des produits chimiques nécessaires	64

Tableau 145 : Kg de combustibles fossiles utilisés pour la fabrication des matériaux annexes d'un ordinateur.

La proportion de charbon dans l'énergie primaire sera supposée être de 40% pour la production des matériaux de base (qui est surtout gourmande en chaleur, donc en

consommation directe de gaz). En tout état de cause la variation de ce pourcentage ne joue qu'à la marge.

Avec ces diverses données nous aboutissons au total suivant pour un ordinateur de bureau à écran cathodique

Ordinateur de bureau à tube cathodique	kg combustibles	% charbon	% gaz	kg. équ. C
Composants électroniques	94	90%	10%	68,6
Circuit imprimé	14	49%	51%	11,4
Tube cathodique	9,5	58%	42%	7,5
Matériaux pour le boîtier de l'unité centrale	21	40%	60%	17,4
Matériaux pour le boîtier de l'écran	22	40%	60%	18,2
Production des produits chimiques	64	80%	20%	48,0
Production des galettes de silicium	17	20%	80%	14,8
Total	241,5			185,8

Tableau 146 : calcul du facteur d'émission d'un ordinateur à tube cathodique

En première approximation, et avec un facteur d'incertitude de 30%, un ordinateur de bureau à écran cathodique se verra affecté d'un facteur d'émission de 185 kg équivalent carbone. Notons que cette valeur ne tient pas compte des émissions d'halocarbures intervenant à l'occasion de la fabrication des composants (et qui peuvent représenter un équivalent carbone, pour certains sites, proche de ce qui est lié à la consommation directe de combustibles fossiles), des émissions liées à la chaîne de commercialisation (transport, chauffage des magasins, publicité, etc).

Une unité centrale seule pourra être créditée d'un facteur d'émission de 140 kg équivalent carbone (on déduit le tube, les matériaux pour le boîtier de l'écran, et la moitié des émissions pour les produits chimiques amont).

Pour un ordinateur à écran plat, les données deviennent alors les suivantes :

Ordinateur de bureau à écran plat	kg combustibles	% charbon	% gaz	kg. équ. C
Composants électroniques	94	90%	10%	68,6
Circuit imprimé	14	49%	51%	11,4
Ecran plat	226	47%	53%	184,3
Matériaux pour le boîtier de l'unité centrale	21	40%	60%	17,4
Production des produits chimiques	64	80%	20%	48,0
Production des galettes de silicium	17	20%	80%	14,8
Total	436			350,6

Tableau 147 : calcul du facteur d'émission d'un ordinateur à écran plat

En première approximation, et avec un facteur d'incertitude de 30% également, un ordinateur de bureau à écran plat se verra affecté d'un facteur d'émission de 350 kg équivalent carbone.

9.3.3.5 Imprimantes et serveurs

Il ressort d'une étude de 1998 portant sur la fin de vie des produits bruns¹⁸⁶ que la composition moyenne d'un ordinateur ou d'une imprimante en fin de vie est la suivante :

matériau	Nb moyen de kg par unité	
	Ordinateur	Imprimante
ferreux	10,3	2,8
autres métaux	4,4	0,5
plastiques	4,3	1,3
tubes cathodiques	6,5	-
cartes électroniques	2,5	0,4
Poids total	28	5

Tableau 148 : poids moyen des différents matériaux d'un ordinateur et d'une imprimante.

Le "contenu en électronique" étant 5 à 6 fois inférieur, et l'essentiel de la consommation d'énergie "résidant" dans l'électronique, nous prendrons, à titre conservatoire, un facteur d'émission 5 à 6 fois moindre pour les imprimantes, à savoir 30 kg équivalent carbone par imprimante.

Pour les serveurs et grosses unités, nous proposons, à titre conservatoire, d'affecter les valeurs d'émission au prorata du prix de vente, comparé au prix d'une unité centrale (voir ci-dessus). Ainsi si un serveur fait l'équivalent de 5 UC d'ordinateur personnel, on pourra lui affecter un facteur d'émission de $5 * 140 = 700$ kg équivalent carbone.

¹⁸⁶ Collecte et traitement des produits électriques et électroniques "grand public" en fin de vie, étude GIRUS pour la Région Nord Pas de Calais et pour l'ADEME, octobre 1998

10 - Sources, Bibliographie

10.1 - Sources

10.1.1 - Personnes mises à contribution pour la mise au point des facteurs d'émission

Par ordre alphabétique :

M. AUBERT - INRA

Carine BARBIER - CNRS ECODEV

Stéphane BARBUSSE - ADEME

Sébastien BARNEOUD-ROUSSET - Armateurs de France

René BEAUMONT - INRA

Jean-Jacques BECKER - Ministère de l'Environnement

Sébastien BEGUIER - CITEPA

Sylvie BENARD - LVMH

Julien BILAL - COLAS

Jean-Pierre BIRAT - ARCELOR

Félix BOCQUET - Veuve Clicquot Ponsardin

Jean-Pierre BOURDIER - EDF

Bernard BRESSE - ADEME

Martin BUSSENSCHUTT - EAWAG (équivalent suisse de l'IFEN)

Bernard CARPENTIER - Institut du Végétal

Benoît CARROUEE - PROLEA

Marc CASAMASSIMA - ADEME

Sandrine CATANIA - ADEME

Pierre CELLIER - INRA

Michel CHAPPAT - Colas France

Jean-Marie CHARLES - DGEMP, Ministère de l'Industrie

Jean-Luc CHEVALLIER - CSTB

Sébastien CIBICK - ASPA Alsace

Jean COIFFARD - CEREN

Alain CORFDIR - ENPC

Marc COTTIGNIES - ADEME

Myriam CRON - ADEME

Roland CURTET - Ministère de l'Équipement, des Logements et des Transports
Jean-Pierre DECURE - Ministère de l'Équipement, des Logements et des Transports
Benjamin DESSUS - CNRS ECODEV
Philippe DESVIGNES - Institut du Végétal
Jean-Marc DOMANGE - Ciments Calcia
Jean-Yves DOURMAD - INRA
Dominique DRON - MIES
Jean-Pierre DULPHY - INRA
Yves EGAL - ORBANIS
Laurine FEINBERG - ADEME
Jean-Pierre FONTELLE - CITEPA
Guillaume GABORIT - CITEPA
Elisabeth GAILLARDE - ADEME
Virginie GARCIA - ADEME
André GASTAUD - MIES
M. GERMON - INRA
Bernard GROS - ARCELOR
Olivier GUYADER - IFREMER
Julia HAAKE - O2 France
Stéphane HIS - Institut Français du Pétrole
Nicolas HOUDANT - Energies Demain
Catherine JONDREVILLE - INRA
M. JUMEL - CEMAGREF
Jospeh KLEINPETER - ASPA Alsace
Pierre-Yves KOEHRER - O2 France
Richard LAVERGNE - Observatoire de l'Energie, Ministère chargé de l'Energie.
Nicolas LE BIGOT - Comité des Constructeurs Français d'Automobiles
Afsaneh LELLAHI, Institut du Végétal
Benoît LESAFFRE - Ministère de l'Agriculture
Philippe LEVAVASSEUR - ST Microelectronics
François LHOPITEAU, président, Institut Technique de l'Agriculture Biologique
Daniel MADET - EDF
Pierre MALAVAL - Ingénieur du GREF retraité
Sarah MARTIN - ADEME
Valérie MARTIN - ADEME
José MARTINEZ - CEMAGREF
Nathalie MARTINEZ - ADEME
Yves MERILLOT - ADEME
Louis MEURIC - Observatoire de l'Energie, Ministère de l'Industrie

Martine MICHAU - Ministère de l'Équipement, des Logements et des Transports

Jean-Marie MILLOUR - Armateurs de France

Luc MOLINARI - Hays Argon

Jean-Eudes MONCOMBLE - EDF

François MUDRY - Arcelor

Jane NOPPE - ADEME

Pierre PALAT - MIES

Jean-Michel PAPLEUX - Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne

Marc PEIGNE - Hays Argon

Jean PELIN - Union des Industries Chimiques

André POUGET - Pouget Consultants

Jean-Pierre PRADAYROL - SNCF

Michael PRATHER - University of California, Irvine

Alain RICAUD - Cythelia

Arthur RIEDACKER - MIES

Emmanuel RIVIERE - ASPA Alsace

Olivier SIDLER - Enertech

Jean-François SOUSSANA - INRA

Jean-Patrick SUTEAU - ADEME

Jean-Pierre TABET - ADEME

Arnoudeth TRAIMANY - ADEME

Jean-Pierre TRAISNEL - Université de Paris 8

François TROCHERIE - IFEN

Sandrine WENISCH - ADEME

Frédérique WILLARD - ADEME

10.1.2 - Ouvrages consultés pour l'élaboration des facteurs d'émission

A Quick Reference Guide, Estimating Potential Methane Production, Recovery and Use from Waste, Ministère australien de l'environnement, 1997

Analyse de cycle de vie de l'amidon de maïs, de maïs grain et de maïs ensilage, rapport Ecobilan pour AGPM, 1998

Aviation and the Global Atmosphere, IPCC, 1999

Bilan Carbone d'une entreprise : Amélioration de la prise en compte du transport de marchandises hors compte propre - Hays Argon et ADEME – Juin 2003

Bilans énergétique et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants, ECOBILAN (pour l'ADEME), 2003

Bilan et gestion des Gaz à effet de serre dans l'espace rural, Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture, vol. 85, 1999

Cahiers de l'environnement, 250/I, Office Fédéral Suisse de l'Environnement, des Forêts et du Paysage, 1998

Choix logistiques des entreprises et consommation d'énergie, Christophe RIZET, INRETS et Basile KEÏTA, B2K, novembre 2002

Climate Change 2001, The Scientific Basis, IPCC, 2001

Climate Change and the Power Industry, european carbon factors, a benchmarking of CO2 emissions by the largest european power producers, PriceWaterHouseCoopers & Enerpresse, 2002

Climate Change, The science of climate change, IPCC, 1995

Collecte et traitement des produits électriques et électroniques "grand public" en fin de vie, étude GIRUS pour la Région Nord Pas de Calais et pour l'ADEME, octobre 1998

Computers and the environment, R. Kuehr and E. Williams, Kluwers Academic Press, 2004

Corporate Greenhouse Gas Inventories : Proposed Reporting Standard, Guidance and Estimation Tool

Emissions de polluants et consommation liées à la circulation routière, ADEME, 1998

Energie, un défi planétaire, Benjamin DESSUS, Belin 1999

Energies par produits, une étude du CEREN pour l'ADEME, 1999

Environmental Reporting : Guidelines for Company Reporting on Greenhouse Gas Emissions, Department of the Environment, Transport and the Regions, Royaume-Uni, 1999

Etude sur les pollutions de l'air par les moteurs des bateaux de la navigation intérieure, Beguier, Durif, Fontelle, Oudart, CITEPA, septembre 2000.

Evaluation des efficacités énergétiques et environnementales du secteur des transports, Ademe, décembre 2002.

Evaluation des émissions de CO₂ des filières énergétiques conventionnelles et non conventionnelles de production de carburants à partir de ressources fossiles, Georgia PLOUCHARD, IFP rapport 55 949, avril 2001

Flotte de Commerce sous pavillon français, Ministère de l'Équipement, des transports et du logement, SES, juillet 2002

Global Methane Emissions From Livestock and Poultry Manure, US Environment Protection Agency, 1992

Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998

I. Boustead, Eco-profiles in the european industry, Association of Plastic Manufacturers in Europe, april 1997 ; ibid May 1998, ibid 1999

Indicateurs de développement durable, Jancovici pour IFEN, 2004 (à paraître)

INSEE Première N° 767 - avril 2001

Inventaire 1999 et prévisions à 15 ans de l'ensemble des fluides frigorigènes, Palandre, Nacif, Mercier, Clodic, 1999

Inventaire environnemental des intrants agricoles en production végétale, Gaillard Gérard, Crettaz Pierre, Heusheer Judith, comptes rendus de la FAT, 1997

Inventaire national des émissions de gaz à effet de serre, CITEPA, format SECTEN, 2001

IPCC Manual for National Greenhouse Gas Inventories, 1996

L'effet de serre, La Jaune et La Rouge, mai 2000

L'utilisation des véhicules de transport routier de marchandises en 2001, Ministère de l'Équipement, des transports et du logement, SES, juillet 2002

La route écologique du futur, analyse du cycle de vie, Colas, 2003

La valorisation des emballages en France, ADEME, 1999

Les déterminants de la demande énergétique et du développement, CNRS ECODEV, 1998

Les transports par autocars en 2002, Novembre 2003, Ministère des Transports DAEI-SES

Maîtrise de la Demande d'Electricité : Campagne de mesures par usages dans le secteur domestique, Olivier Sidler/Enertech, juin 1996

Maîtrise de la Demande d'Electricité : Etude expérimentale des appareils de cuisson, de froid ménager et de lavage/séchage du linge dans 100 logements, Olivier Sidler/Enertech, juin 1999

Maîtrise de la Demande d'Electricité : campagne de mesures sur le fonctionnement en veille des appareils domestiques, Olivier Sidler/Enertech, Janvier 2000

Mémento des décideurs, MIES, 1998

Note de cadrage sur le contenu CO2 du kWh par usage en France, Ademe, janvier 2005

Rapport environnement d'Air France, 1999

Référentiel pour le calcul des bilans énergétiques, ITCF/ADEME, 2003

Suivi du parc et des consommations de l'année 2002, CEREN, 2003

Tableaux des consommations d'énergie en France, Direction Générale de l'Énergie et des matières premières, Observatoire de l'Énergie, édition 2001.

The GHG Indicator : UNEP Guidelines for calculating greenhouse gas emissions for business and non-commercial organisations, Nations Unies, 2000

Transports, Énergie, Environnement, Quels enjeux ? ADEME, 2000

Update 30E, CSIRO Sustainability Network, août 2003

10.1.3 - Principaux sites Internet consultés pour la mise au point de la méthodologie

Airbus (www.airbus.com)

Agence Européenne de l'Environnement (www.eea.eu.int).

Association européenne des producteurs de plastique (analyses de cycle de vie) : lca.apme.org

CITEPA (www.citepa.org)

EPA (USA) (www.epa.gov)

International Panel on Climate Change (www.ipcc.ch)

Ministère Anglais de l'Environnement (www.environment.detr.gov.uk/envrp/gas/index.htm)

Greenhouse Gas Initiative : www.ghgprotocol.org

Site de référence des viandes rouges : www.mhr-viandes.com

INRA (www.inra.fr)

Enerdata (www.enerdata.grenet.fr)

Informations sur les fromages à pâtes cuites : www.gruyère.com

Informations sur les moutons : lebulletin.com/archives/0005/0005i.cfm

Informations sur les cochons : rechamakayajo.qc.ca/crois/croisem.htm

EDF (www.edf.fr)

Distance entre deux villes/Pays (www.dataloy.com)

BOEING (www.boeing.com)

INFOTRAFIC (www.infotrafic.com/itineraires/itiselvilles.php)

ADEME (www.ademe.fr/auto-diag/transports/car_lab/carlabelling/ListeMarque.asp)

Emissions de voitures (www.vcarfueldata.org.uk)

AMADEUS (www.amadeus.net)

Distance entre deux villes/Pays (www.wcrl.ars.usda.gov/cec/java/lat-long.htm)

Distance entre deux aéroports (www.landings.com/_landings/pages/search/rel-calc.html)

10.2 Bibliographie générale

10.2.1 - Documents édités par le GIEC

Le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a réalisé, entre autres choses, des documents méthodologiques destinés à permettre la comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre, et notamment le IPCC Manual for National Greenhouse Gas Inventories (1996).

Il s'agit en fait de méthodes destinées à la comptabilisation des émissions nationales de gaz à effet de serre, mais ces documents comprennent aussi des indications utiles pour une utilisation "privée". Ils peuvent se télécharger à l'adresse : www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.htm

Ces documents ne sont pas très accessibles et nous vous conseillons de vous y référer uniquement lorsque vous aurez pris vos marques avec la démarche que nous proposons. De nombreuses valeurs qui y figurent sont reprises dans le présent document.

Le GIEC édite surtout des documents donnant une idée du consensus scientifique du moment sur le changement climatique, ses causes et ses conséquences. On peut consulter en ligne les rapports complets du GIEC sur le site www.ipcc.ch, et les acheter sous forme papier auprès de l'éditeur Cambridge University Press¹⁸⁷. Ils s'agit toutefois de documents très techniques, en Anglais, qu'il vaut mieux réserver aux universitaires, chercheurs et ingénieurs des bureaux d'études.

Les résumés de ces rapports du GIEC sont disponibles en téléchargement sur le site Internet du GIEC (www.ipcc.ch) dans de nombreuses langues, dont le Français (par contre les rapports complets ne sont édités qu'en Anglais).

10.2.2 - Documents édités par le CITEPA

Le CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique) est chargé de réaliser, pour la France, les inventaires d'émission de gaz à effet de serre.

Divers documents de synthèse sont téléchargeables en libre accès sur son site Internet (www.citepa.org), les rapports complets étant généralement vendus.

10.2.3 - Documents édités par l'ADEME

- Emissions de polluants et consommation liées à la circulation routière, ADEME, 1998
- Transports, Energie, Environnement, Quels enjeux ? ADEME, 2000

¹⁸⁷ <http://uk.cambridge.org>

10.2.4 - Documents édités par d'autres organismes français

Un document utile pour ceux qui veulent étudier de près le cas de l'agriculture : Bilan et gestion des Gaz à effet de serre dans l'espace rural, Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture, vol. 85, 1999

Un document utile pour les collectivités locales : Mémento des décideurs, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES), 1998

Annexe 1 : Production d'électricité en Europe

Le diagramme ci-dessous, communiqué par l'Observatoire de l'Energie, Ministère de l'Industrie, (l'année de référence est 2001) donne une idée de la répartition par type d'énergie primaire de la production d'électricité en Europe.

Par exemple, la France produit l'essentiel de son électricité avec du nucléaire, quand l'Islande produit l'essentiel de son électricité avec de l'hydraulique. La Pologne recourt essentiellement au charbon, comme, à moindre titre, la Grèce, la République Tchèque, l'Allemagne, et le Danemark, alors que la Suède et la Suisse ont une électricité provenant à peu près pour moitié du nucléaire et pour moitié de l'hydraulique.

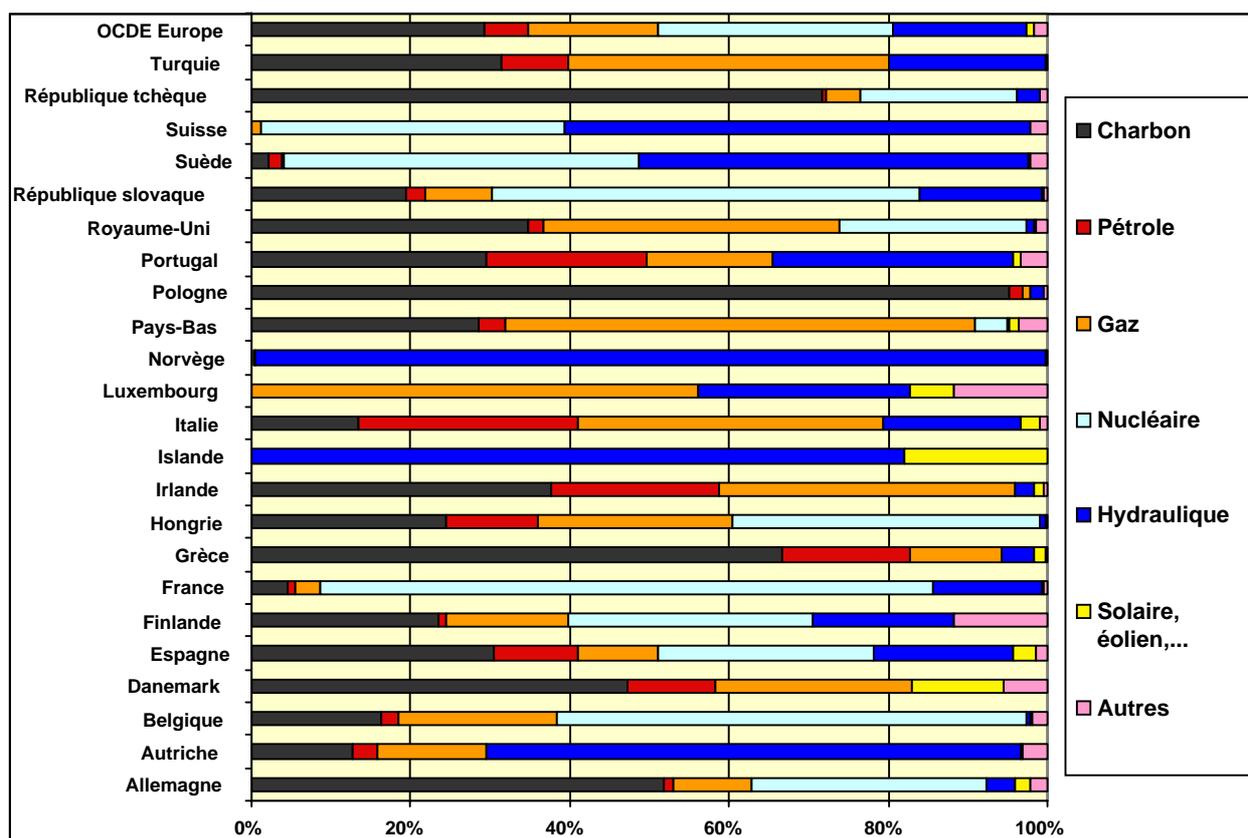


Figure 6 : répartition par type d'énergie primaire de la production d'électricité en Europe (Observatoire de l'Energie)

Il en découle des "contenus en gaz à effet de serre" par kWh fort différents d'un pays à l'autre, et plus particulièrement d'un producteur à l'autre.

A titre informatif nous reproduisons ci-dessous les facteurs d'émission pour un certain nombre de producteurs européens, pour l'année 2001 (en kg équivalent carbone par kWh).

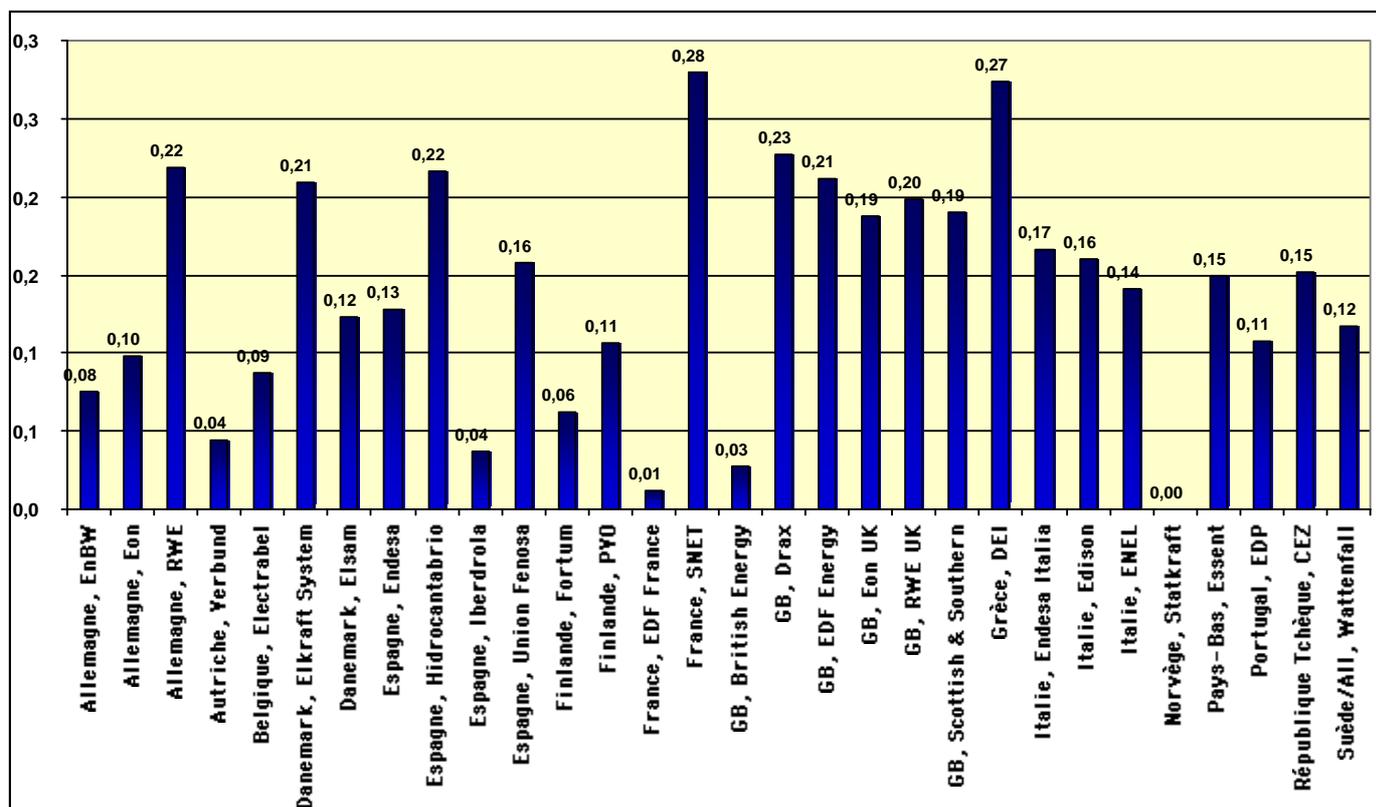


Figure 7 : facteur d'émissions de certains producteurs d'électricité européens (2003)

Annexe 2 - Contenu en équivalent carbone de l'électricité EDF

Les chiffres indiqués résultent des études ACV (Analyse de Cycle de Vie, norme ISO 14040) ; ils prennent en compte les émissions de gaz contribuant à l'effet de serre (principalement CO₂, CH₄ et N₂O) pendant l'exploitation des centrales (combustion du charbon par exemple), mais aussi celles entraînées par les autres étapes du cycle de vie (construction, fabrication et transport des combustibles, démantèlement...).

La procédure complète d'élaboration de cet indicateur a été validée par PriceWaterhouseCoopers/Ecobilan.

Les émissions par type de production sont regroupées dans le tableau suivant :

Filières	Exploitation	Reste du cycle	Total (g équivalent CO ₂ /kWh)
Nucléaire	0	5	5
Charbon 600 MW	887	114	1001
Charbon 250 MW	945	117	1062
Fioul	839	149	988
Turbines à combustibles	844	68	912
Gaz (haut-fourneau)	1682	0	1682
Hydraulique (stockage)	127	5	132
Hydraulique (fil de l'eau)	0	5	5
Hydraulique (retenues)	0	5	5
Diesels	646	175	821
Eoliennes	0	3 à 24	3 à 2
Photovoltaïque	0	60 à 250	60 à 250

Tableau 149 : facteurs d'émission de la production électrique par type de filière.

Remarques :

- * Les évaluations sur les installations d'utilisation de gaz de haut-fourneau sont complexes. Elles résultent de la comparaison entre deux situations : avec et sans.
- * Dans l'hydraulique de stockage, on utilise de l'électricité du réseau pour remplir d'eau, en heures creuses, un réservoir. Cette eau sera turbinée ensuite en heures pleines.
- * Pour les éoliennes et le photovoltaïque, une grande partie de l'incertitude provient des différentes origines possibles des kWh ayant servi à la fabrication.

Pour les principaux moyens de production du parc EDF, les chiffres correspondants en grammes équivalent CO₂ par kWh sont :

- 5 pour le nucléaire,
- 5 pour l'hydroélectricité hors pompage,
- 132 pour l'hydroélectricité de pompage,
- 1003 pour le charbon 250 MW,
- 1085 pour le charbon 600 MW,
- 912 pour les Turbines à gaz (fonctionnement intermittent).

Compte tenu de l'appel aux différents moyens de production, il en résulte les chiffres suivants pour 2001 :

mois	g équ. CO ₂ /kWh	g équ. C/kWh
janvier 2001	41	11,2
février 2001	42	11,5
mars 2001	32	8,7
avril 2001	42	11,5
mai 2001	36	9,8
juin 2001	44	12,0
juillet 2001	28	7,6
août 2001	18	4,9
septembre 2001	23	6,3
octobre 2001	34	9,3
novembre 2001	66	18,0
décembre 2001	88	24,0

Tableau 150 : facteurs d'émission mensuels de la production d'électricité d'edf en 2001

Annexe 3 : Répartition des terres agricoles en France

Pour l'année de référence 1996 nous avons la décomposition suivante (sources diverses).

SURFACE AGRICOLE UTILISEE		29,9
Terres arables		18,1
dont céréales (sauf maïs fourrage)	8,3	
oléagineux	1,9	
protéagineux	0,6	
betteraves, pommes de terre, divers	0,8	
cultures légumières	0,3	
plantes fourragères annuelles (dt maïs fourrage 1,5)	1,7	
prairies artificielles et temporaires	2,8	
jachères	1,7	
Surface toujours en herbe		10,5
dont prairies permanentes productives	8,4	
alpages et estives	0,7	
surfaces en herbe peu productives	1,4	
Autres cultures permanentes		1,3
dont vergers	0,3	
vignes	0,9	
cultures diverses	0,1	

Tableau 151 : répartition des surfaces agricoles nationales cultivées

Annexe 4 : Contenu en carbone des volailles

1 - Dindes industrielles

Le poids d'aliment pour un kg de poids vif est ici de 2,2 kg environ. La contribution des déchets par kg de poids est supposée être celle des poulets de batterie. Le ratio poids utile/poids vif est supposé être de 66%.

DINDES	Kg équivalent carbone par kg de poids vif
aliments	0,18
déjections	0,05
total	0,23
Kg équ. C par kg de viande avec os	0,35

Tableau 152 : facteur d'émission de la dinde industrielle

Nous réintégrerons forfaitairement 10% pour tenir compte de l'énergie pour l'élevage, pour aboutir à la valeur de **390 kg de C par tonne de dinde avec os**.

2 - Canards & pintades de batterie

Le poids d'aliment pour un kg de poids vif est ici de 2,8 kg environ. La "méthanogène" des déchets est par ailleurs 2,5 fois plus forte¹⁸⁸.

Le ratio poids utile/poids vif est supposé être de 66%.

CANARDS ET PINTADES	Kg équivalent carbone par kg de poids vif
aliments	0,23
déjections	0,14
total	0,37
Kg équ. C par kg de viande avec os	0,55

Tableau 153 : facteur d'émission du canard et de la pintade de batterie

Nous réintégrerons forfaitairement 10% pour tenir compte de l'énergie pour l'élevage, pour aboutir à la valeur de **610 kg équivalent carbone par tonne de canard avec os**.

¹⁸⁸ Bilan et gestion des Gaz à effet de serre dans l'espace rural, Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture, vol. 85, 1999

3 - Volailles fermières

Pour les poulets et pintades fermiers, le poids d'aliment pour un kg de poids vif est respectivement de 3,1 et 3,7 kg environ. Comme l'abattage intervient 2 fois plus tard, la contribution des déchets est doublée.

Le ratio poids utile/poids vif est supposé être de 66%.

POULETS FERMIERS	Kg équivalent carbone par kg de poids vif
aliments	0,25
déjections	0,11
total	0,36
Kg équ. C par kg de viande avec os	0,55

Tableau 154 : facteur d'émission des poulets fermiers

Nous réintégrerons forfaitairement 10% pour tenir compte de l'énergie pour l'élevage, pour aboutir à la valeur de **600 kg équivalent carbone par tonne de poulet fermier avec os**.

PINTADES FERMIÈRES	Kg équivalent carbone par kg de poids vif
aliments	0,30
déjections	0,11
total	0,41
Kg équ. C par kg de viande avec os	0,62

Tableau 155 : facteur d'émission des pintades fermières

Nous réintégrerons forfaitairement 10% pour tenir compte de l'énergie pour l'élevage, pour aboutir à la valeur de **680 kg équivalent carbone par tonne de pintade fermière avec os**.

Annexe 5 - Répartition des véhicules 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 Logement¹⁸⁹. 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 (cf. § 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 (§ 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 kg, 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 de 3,5 t précisément en les assimilant à des véhicules "moyens".

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".

¹⁸⁹ Communication personnelle avec M. Roland Curtet en novembre 2002

1 - Camionnettes de PTAC < à 1,5 t

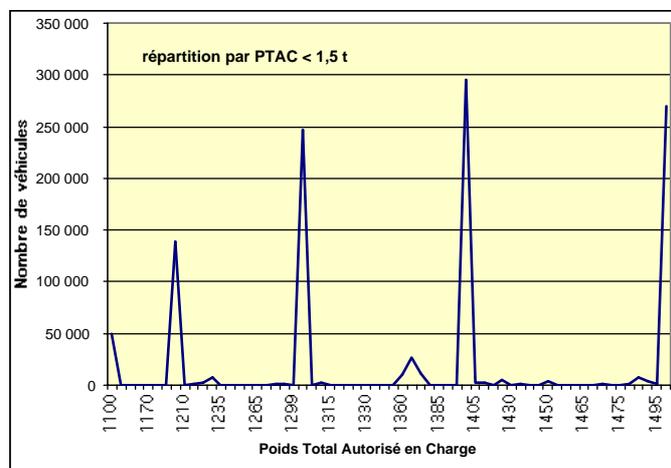


Figure 8 : répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de moins de 1.5 t de PTAC

Valeur moyenne retenue : 1360 kg. Ecart à la moyenne des principaux points d'accumulation :
 - 20% pour 1100 kg,
 - <10% pour les autres.

2 - Camionnettes de PTAC compris entre 1,5 et 2,5 t

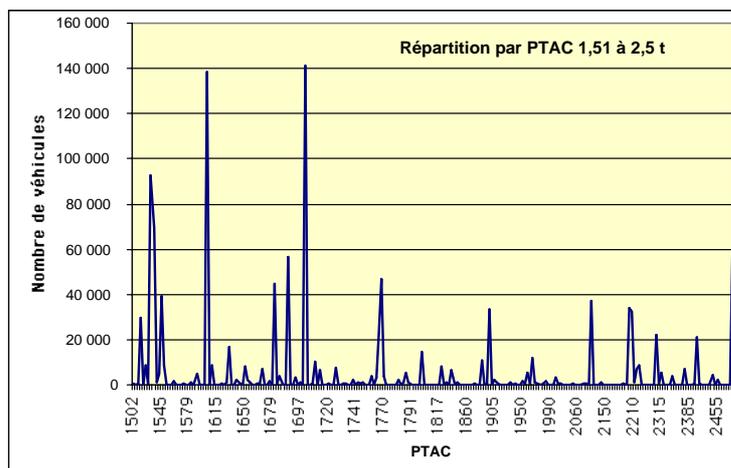


Figure 9 : répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 1.5 t à 2.5 t de PTAC

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%.

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

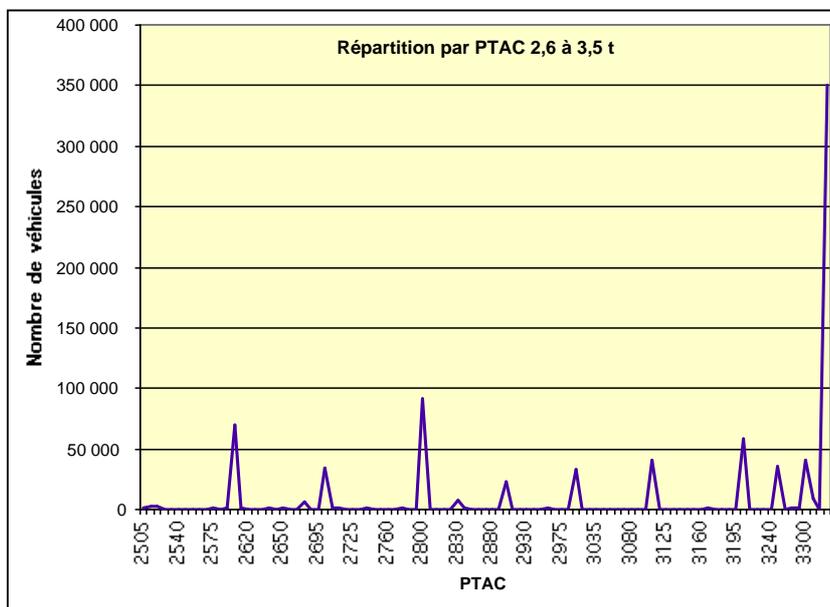


Figure 10 : répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 2.5 t à 3.5 t de PTAC

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.

4 - Camionnettes de PTAC compris entre 3,51 et 5 t

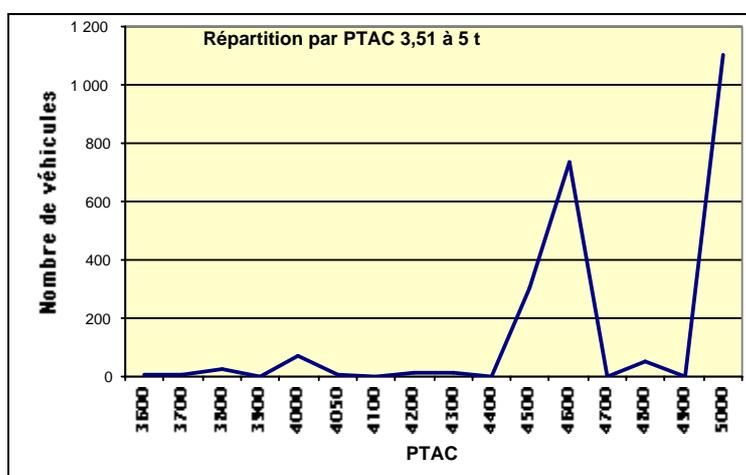


Figure 11 : répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 3.5 t à 5 t de PTAC

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

5 - Camions de PTAC compris entre 5,1 et 6 t

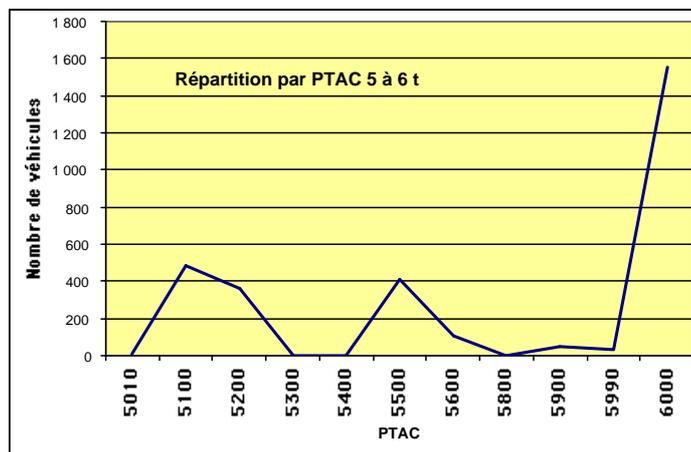


Figure 12 : répartition du nombre de véhicules pour les camions de 5.1 t à 6 t de PTAC

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

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

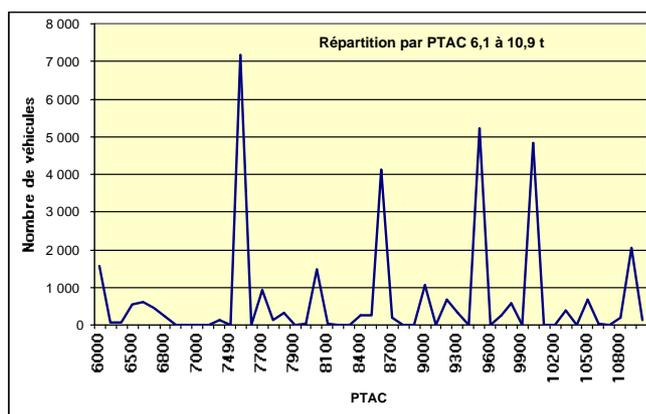


Figure 13 : répartition du nombre de véhicules pour les camions de 6.1 t à 10.9 t de PTAC

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

7 - Camions de PTAC compris entre 11 et 19 t

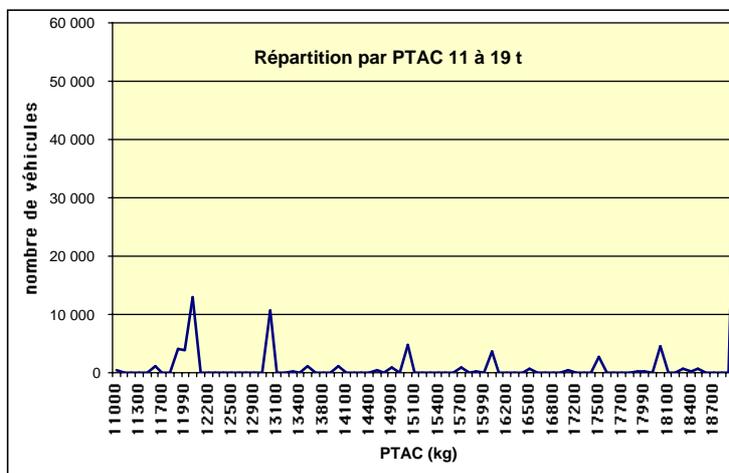


Figure 14 : répartition du nombre de véhicules pour les camions de 11 t à 19 t de PTAC

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).

8 - Camions de PTAC compris entre 19,1 et 21 t

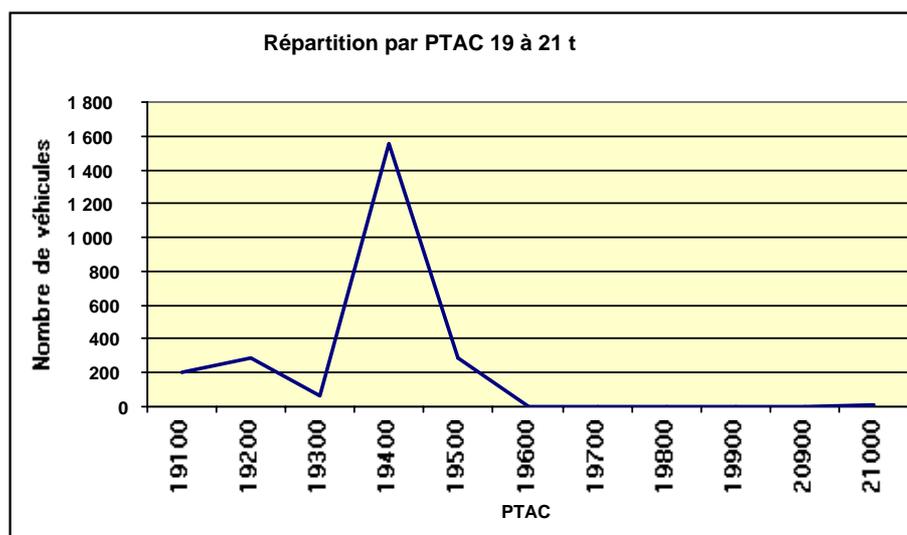


Figure 15 : répartition du nombre de véhicules pour les camions de 19.1 t à 21 t de PTAC

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

9 - Camions de PTAC compris entre 21,1 et 32 t

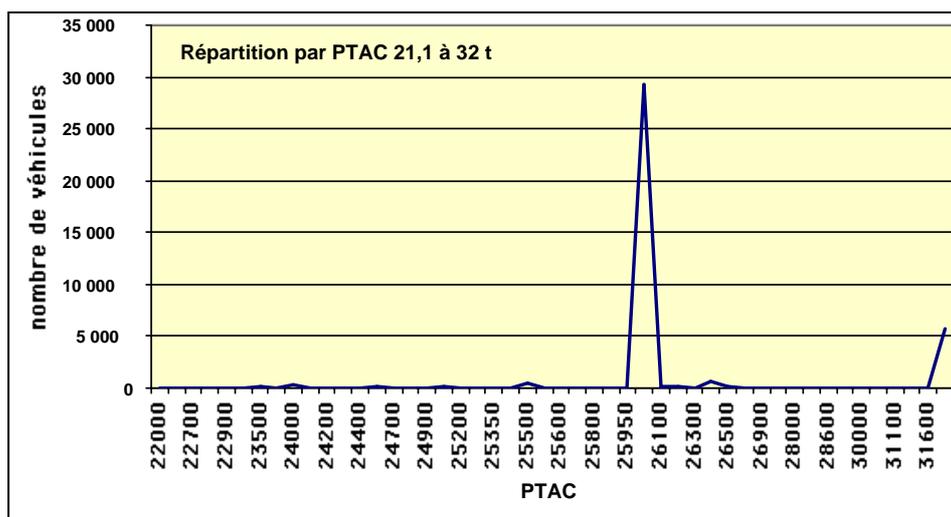


Figure 16 : répartition du nombre de véhicules pour les camions de 21.1 t à 32 t de PTAC

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)

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 6 - Consommations des véhicules 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 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 - 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) ¹⁹⁰	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	10,8	37,2	42,7	52,5	48,0	53,5	63,3
4	881	4 563 806	5,8	6,8	8,7	120 000	11,0	42,8	50,5	64,4	53,8	61,5	75,4
5	1 011	3 342 309	6,3	7,7	10,1	140 000	10,8	46,7	57,0	75,0	57,5	67,8	85,8
Moyenne catégorie	935	7 942 787	6,0	7,2	9,3	128 324	10,9	44,4	53,2	68,8	55,3	64,1	79,7

Tableau 156 : facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué.

Enfin 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 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.

¹⁹⁰ estimation personnelle de l'auteur

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 constructeur pour 160 g de CO₂ par km en parcours mixte, alors 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.

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) ¹⁹¹	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	10,8	47,0	58,0	77,3	57,8	68,8	88,1
7	1 212	4 293 265	6,7	8,4	11,4	160 000	11,4	49,2	61,9	84,1	60,6	73,3	95,5
8	1 258	455 023	7,1	9,1	12,6	180 000	10,5	52,7	67,4	93,1	63,1	77,9	103,6
9	1 379	996 779	7,6	9,7	13,3	200 000	10,3	56,1	71,5	98,2	66,4	81,8	108,5
10	1 442	416 864	8,1	10,3	14,1	200 000	10,8	59,6	75,9	104,4	70,4	86,7	115,2
Moyenne catégorie	1 205	8 726 583	6,8	8,5	11,5	164 584	11,0	50,0	62,8	85,1	61,0	73,8	96,1

Tableau 157 : facteurs d'émission des véhicules de 6 à 10 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué.

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*.

¹⁹¹ estimation personnelle de l'auteur

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.

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) ¹⁹²	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	9,5	61,7	80,6	113,5	71,1	90,0	122,9

Tableau 158 : facteurs d'émission des véhicules de plus de 11 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué.

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.

¹⁹² estimation personnelle de l'auteur

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) ¹⁹³	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	9,2	29,5	32,4	37,1	38,7	41,5	46,3
4	1 069	1 045 341	4,6	5,6	7,2	140 000	11,5	37,9	45,3	58,4	49,3	56,7	69,9
5	1 198	3 687 275	5,4	6,5	8,5	160 000	11,2	43,7	53,0	69,3	54,9	64,2	80,5
Moyenne catégorie	1 169	4 734 239	5,2	6,3	8,2	155 570	11,3	42,4	51,3	66,9	53,7	62,6	78,2

Tableau 159 : facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué.

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) ¹⁹⁴	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	11,1	45,1	54,5	71,1	56,2	65,6	82,3
7	1 502	1 624 164	5,9	7,2	9,4	200 000	11,3	48,2	58,5	76,7	59,5	69,8	88,0
8	1 599	331 791	6,8	8,3	10,9	220 000	10,9	55,3	67,5	88,8	66,2	78,4	99,7
9	1 737	140 662	7,8	9,4	12,3	240 000	10,9	63,2	76,7	100,3	74,1	87,6	111,1
10	1 793	201 789	8,2	9,9	12,9	260 000	10,3	66,9	80,8	104,8	77,3	91,2	115,1
Moyenne catégorie	1 399	7 831 505	5,8	7,0	9,1	188 981	11,1	47,1	57,0	74,4	58,2	68,1	85,5

Tableau 160 : facteurs d'émission des véhicules de 6 à 10 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué.

¹⁹³ estimation personnelle de l'auteur

¹⁹⁴ Estimation personnelle de l'auteur

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) ¹⁹⁵	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	9,1	73,9	90,4	118,9	83,0	99,4	128,0

Tableau 161 : facteurs d'émission des véhicules de plus de 11 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué.

¹⁹⁵ Estimation personnelle de l'auteur

Annexe 7 - Rayon d'action et aménagements intérieurs des avions Airbus

1 - Rayons d'action

Le site www.airbus.com propose les graphiques permettant de visualiser les rayons d'action des avions de la gamme 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 paragraphe 4.3.

1.1 A300 version fret

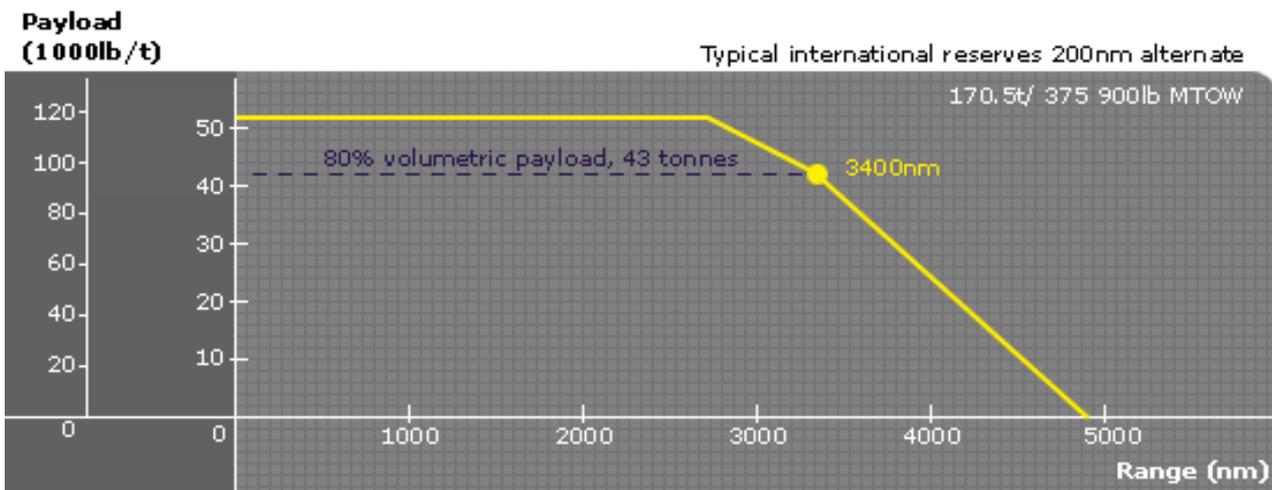


Figure 17 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A300 version fret

1.2 A310

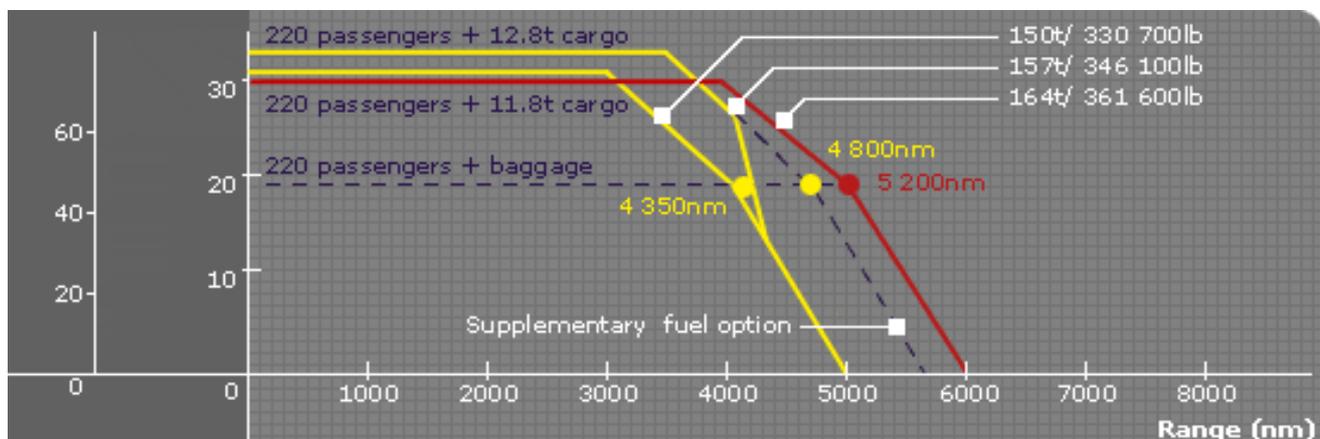


Figure 18 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A310

1.3 A318

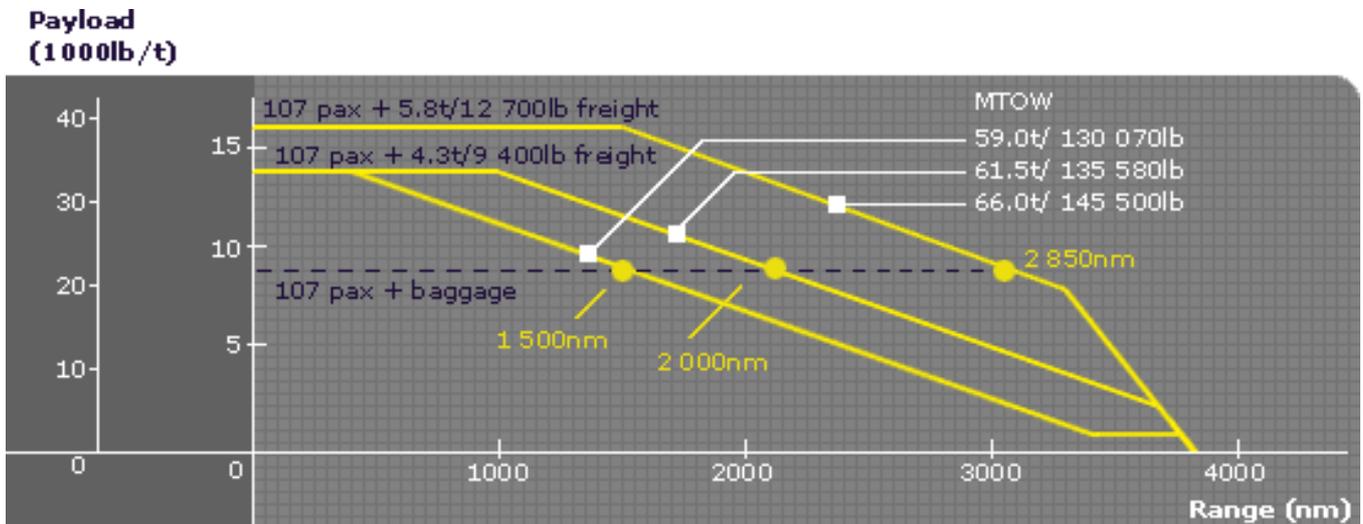


Figure 19 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A318

1.4 A319

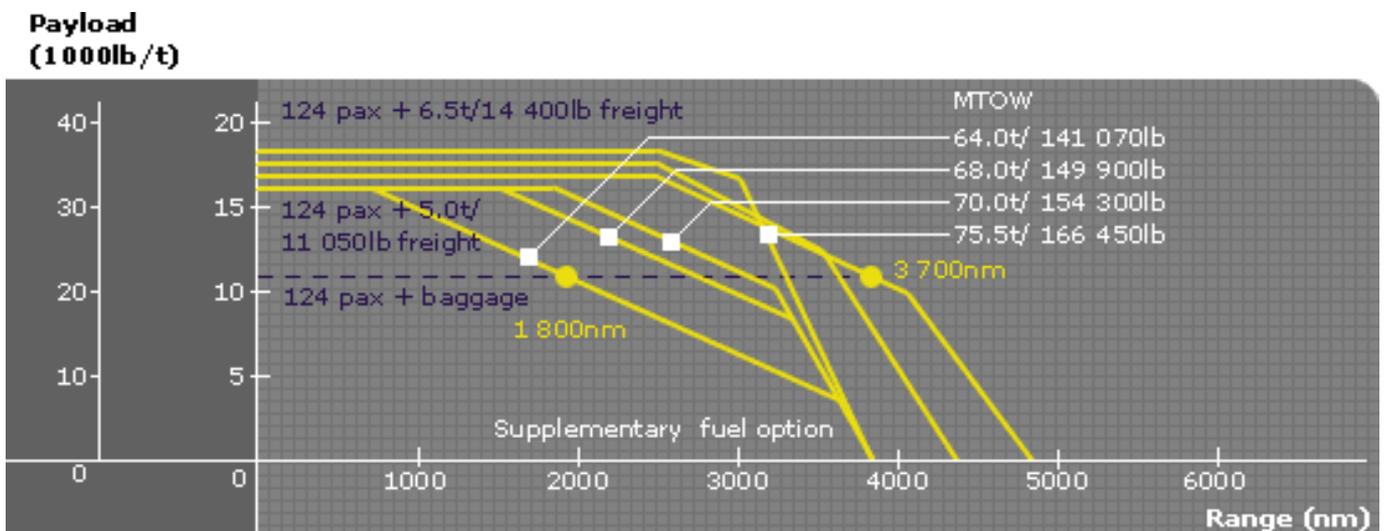


Figure 20 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A319

1.5 A320

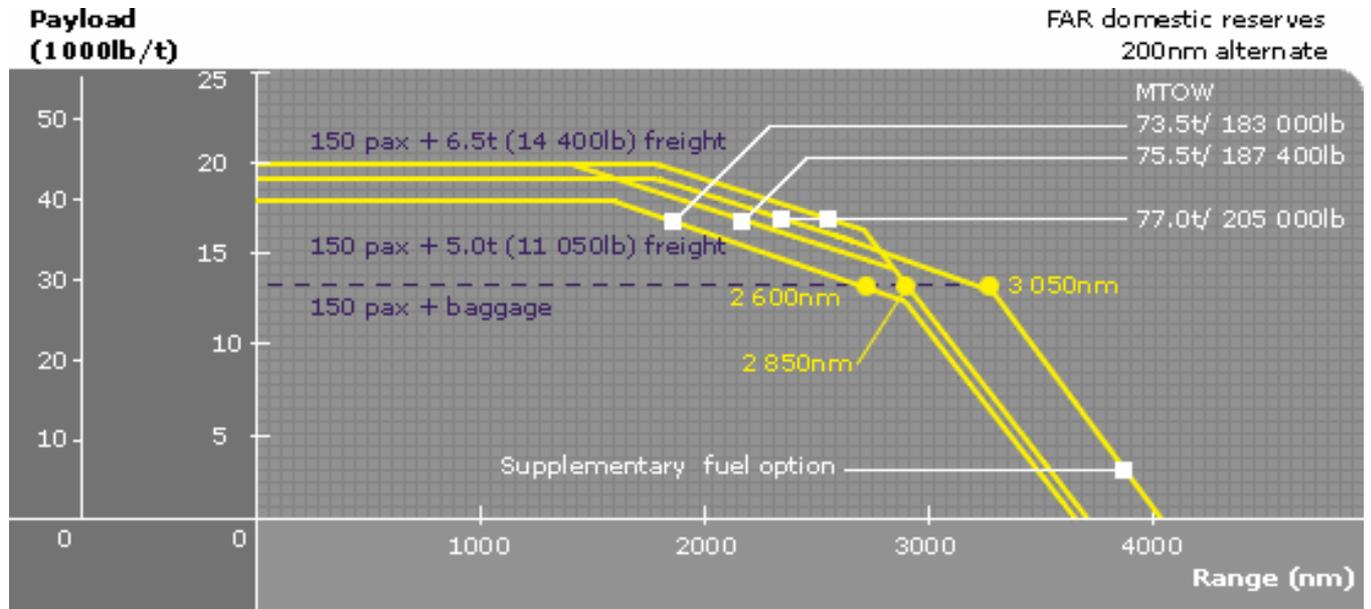


Figure 21 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A320

1.6 A330-200

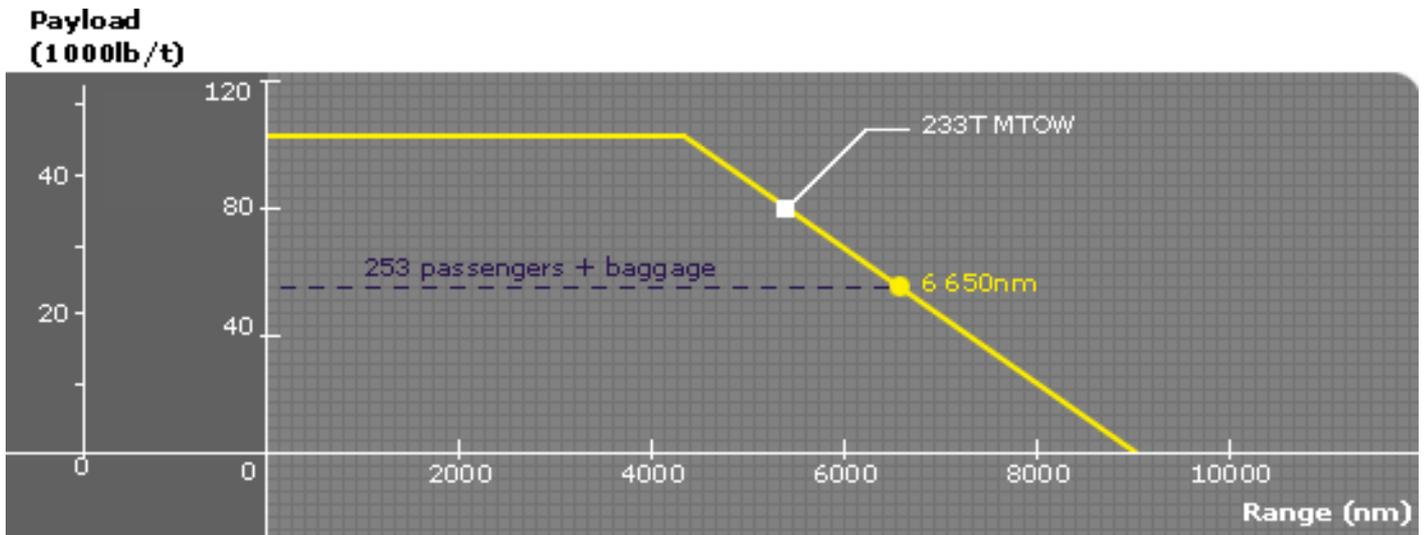


Figure 22 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A330-200

1.7 A330-300

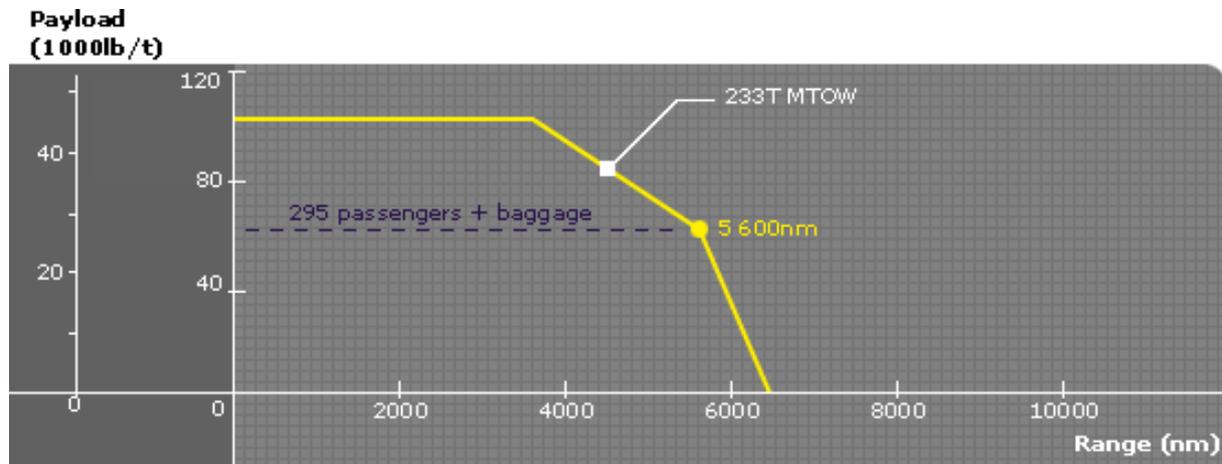


Figure 23 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A330-300

1.8 A340-200

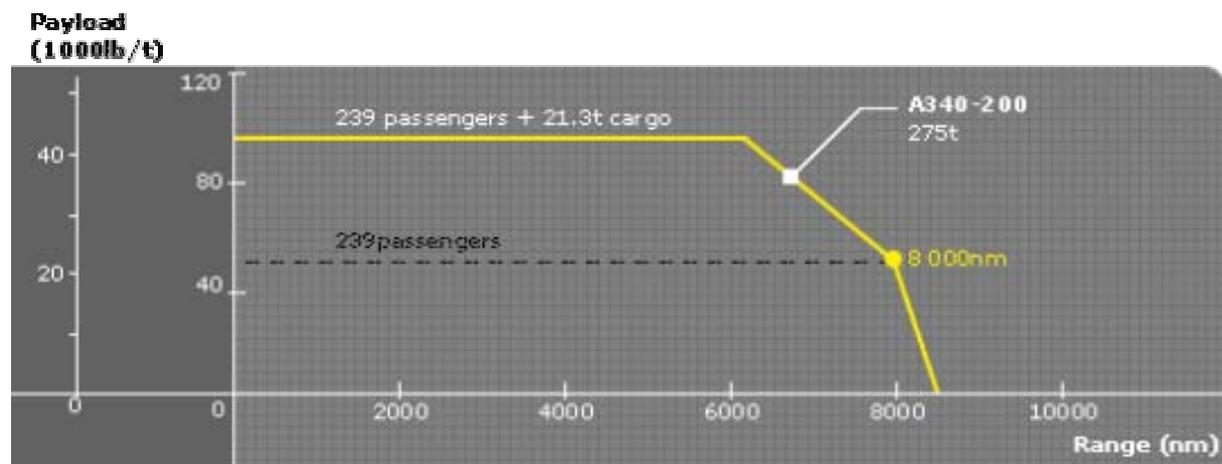


Figure 24 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-200

1.9 A340-300

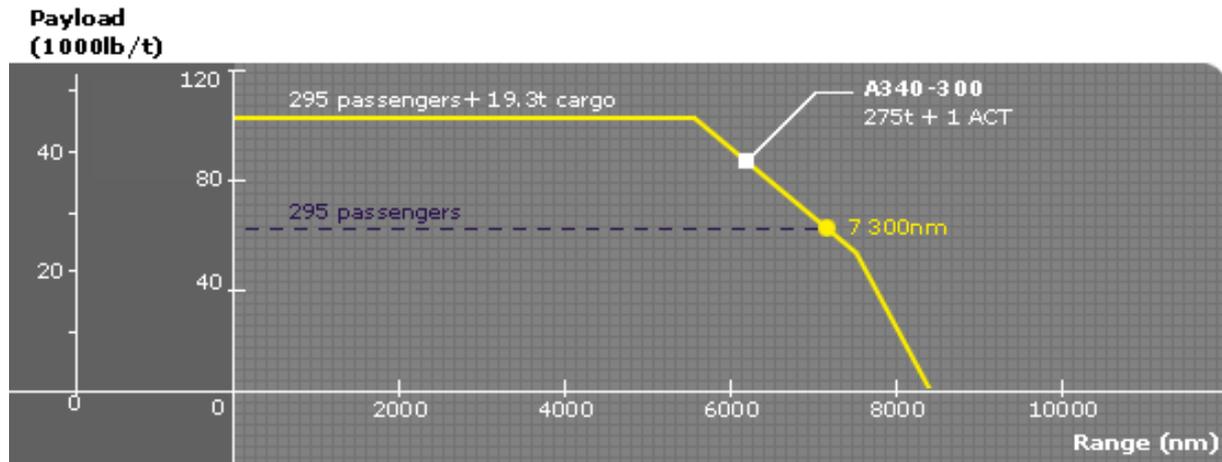


Figure 25 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-300

1.10 A340-500

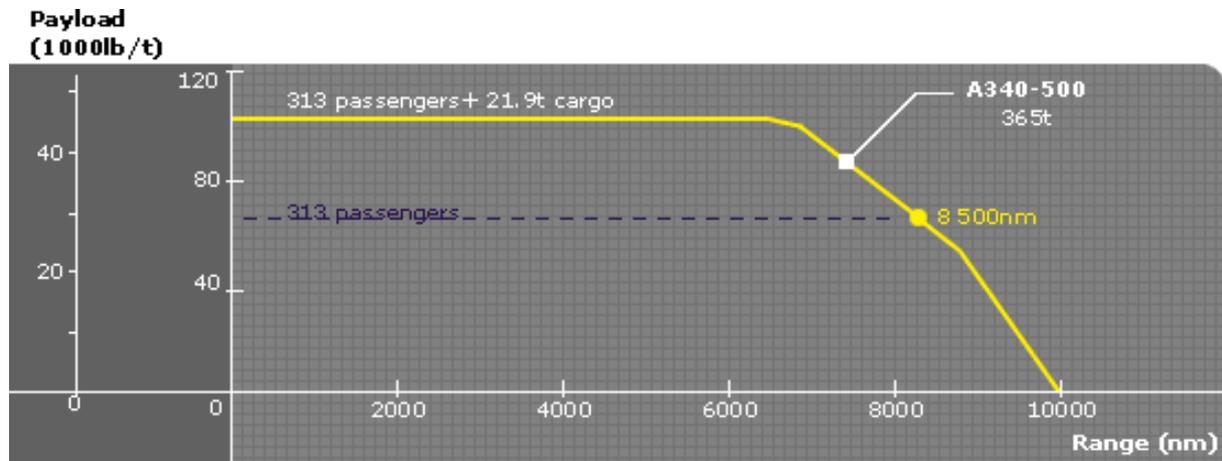


Figure 26 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-500

1.11 A340-600

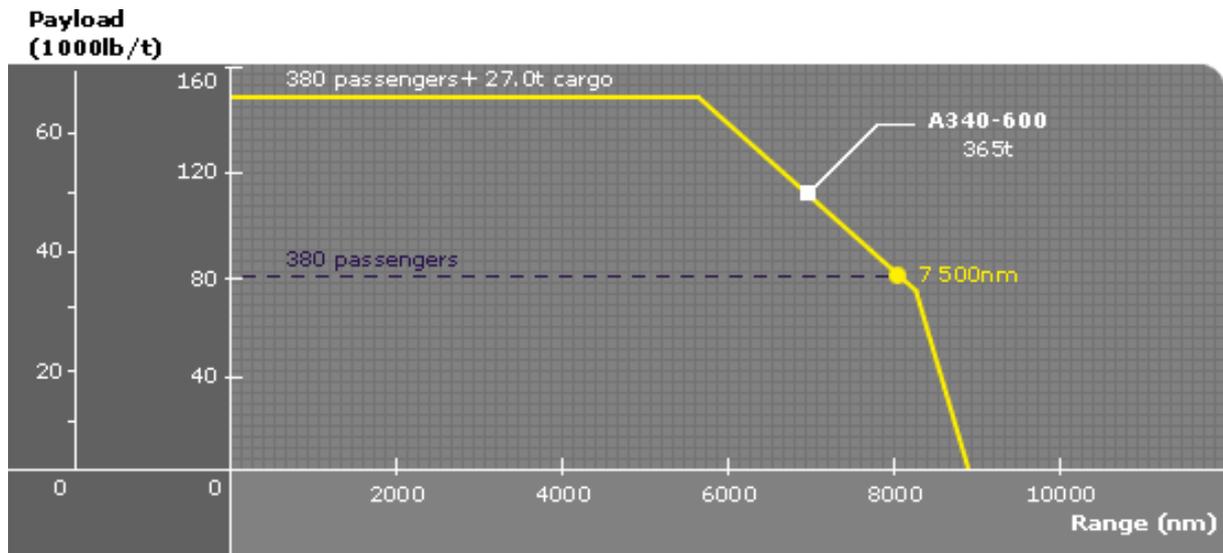


Figure 27 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-600

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.

2.1 A320

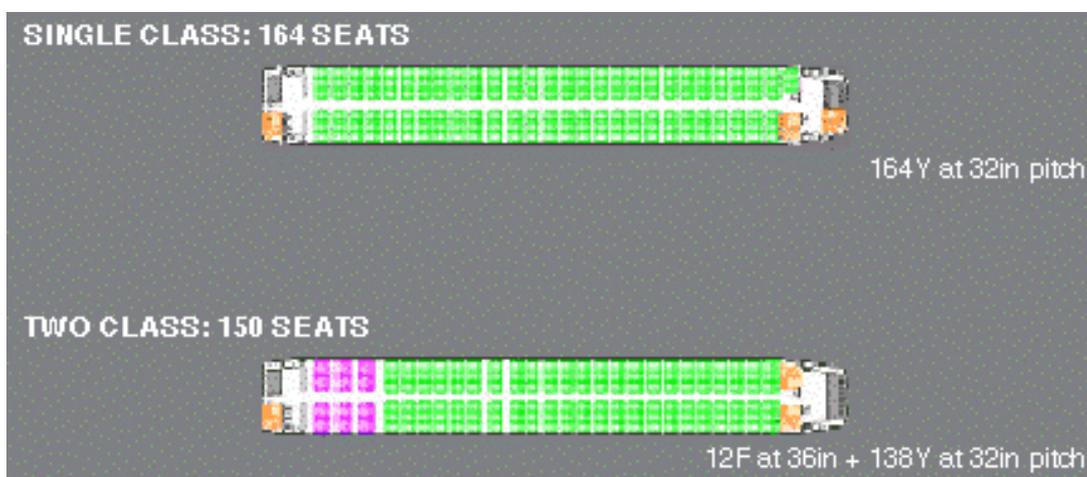


Figure 28 : plan d'occupation d'espace de l'A320 en fonction du nombre de classe

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

2.2 A330-200

version 2 cabines



Figure 29 : plan d'occupation de l'espace de l'A330-200, version deux cabines

version 3 cabines

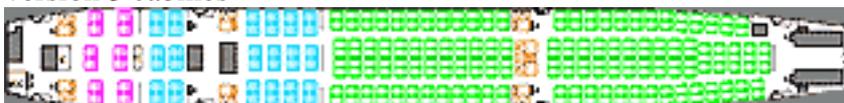


Figure 30 : plan d'occupation de l'espace de l'A330-200, version trois cabines

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 sièges "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.

2.3 A340-200

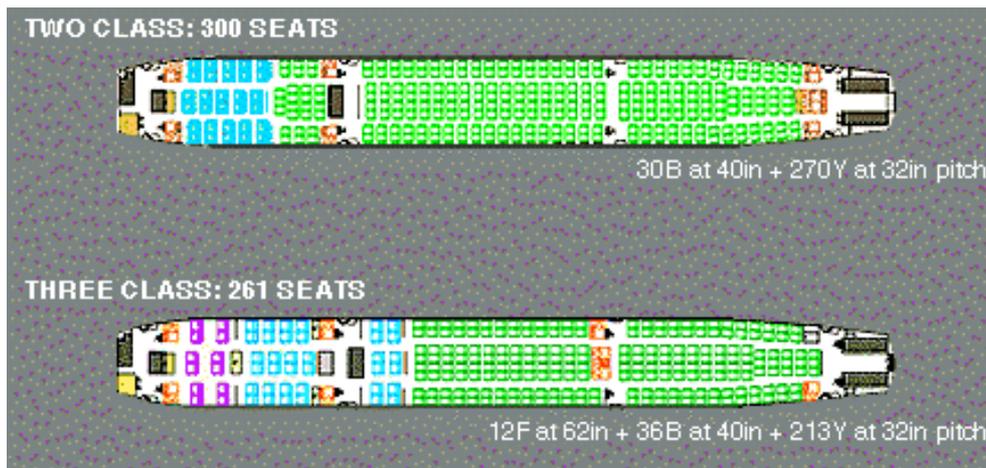


Figure 31 : plan d'occupation de l'espace de l'A340-200 en fonction du nombre de classe
 Les ratios utilisés pour l'A330-200 permettent, avec cet avion, d'obtenir le même nombre "d'équivalent seconde" avec 2 et 3 cabines, à quelques sièges près.

2.4 A340-600

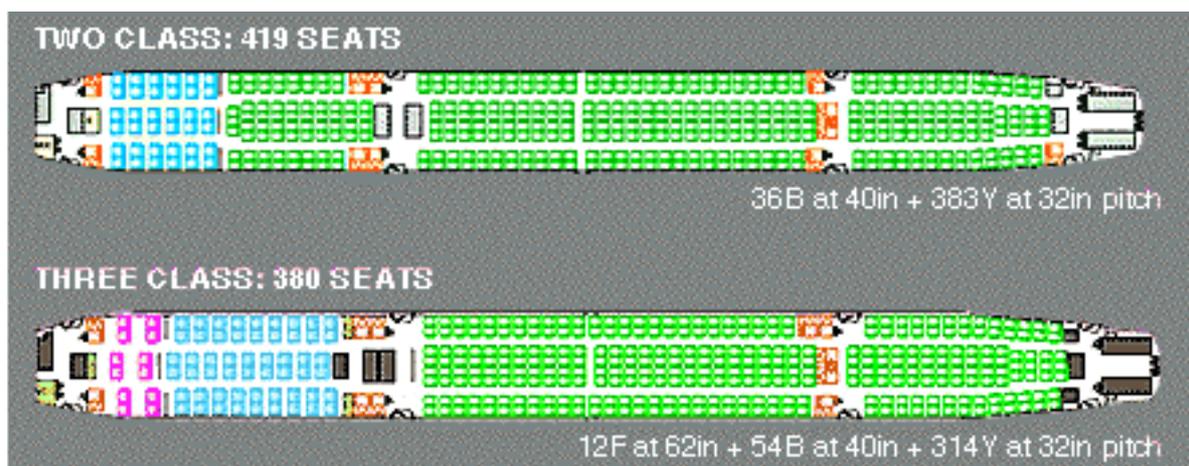


Figure 32 : plan d'occupation de l'espace de l'A340-600 en fonction du nombre de classe
 Conclusion identique à ci-dessus.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : rapport PCS/PCI pour les combustibles liquides ou gazeux.....	15
Tableau 2 : facteurs d'émission des combustibles liquides	16
Tableau 3 : facteurs d'émission de l'ensemble extraction + raffinage des carburants à partir de brut conventionnel (IFP 2001)	16
Tableau 4 : facteurs d'émission liés aux consommations d'énergie du raffinage (DGEMP – 2002).....	17
Tableau 5 : facteurs d'émission de l'extraction et du transport du pétrole.....	17
Tableau 6 : calcul des facteurs d'émission (amont + combustion) en kg / tonne PCI à partir de la décomposition des facteurs d'émission amont et de la combustion en fonction de différents carburants.....	18
Tableau 7 : conversion des facteurs d'émission globaux (amont + combustion) en fonction de différents carburants.....	18
Tableau 8 : facteurs d'émission de la combustion du gaz naturel (PNUE – 1998)	19
Tableau 9 : facteurs d'émission des processus amont du gaz naturel (IFP-2001)	19
Tableau 10 : calcul du facteur d'émission global (amont + combustion) du gaz naturel	20
Tableau 11 : facteurs d'émission de la combustion de combustibles solides	20
Tableau 12 : facteurs d'émission amont de combustibles solides.....	20
Tableau 13 : facteurs d'émission globaux (amonts + combustion) de combustibles solides...	21
Tableau 14 : facteurs d'émission de la production d'électricité par pays en 1997 (PNUE – 1997).....	24
Tableau 15 : facteurs d'émission CO ₂ /kWh par fournisseur d'électricité européens en 2003	25
Tableau 16 : facteurs émission mensuels d'EDF en 2002	26
Tableau 17 : facteurs d'émission des différents modes de production d'électricité du mix Français	27
Tableau 18 : facteurs d'émission électriques français en fonction des usages	28
Tableau 19 : consommation standard des différents équipements électriques résidentiels	29
Tableau 20 : facteurs d'émission des différents équipements électriques résidentiels	30
Tableau 21 : consommations électriques totales pour des activités chauffées à l'électricité... ..	30
Tableau 22 : consommation d'électricité spécifique par nature d'activité	31
Tableau 23 : décomposition des émissions de la combustion d'une tonne d'ordure ménagère en fonction des matériaux incinérés	33
Tableau 24 : décomposition des émissions de la mise en décharge d'une tonne d'ordure ménagère en fonction des matériaux traités	33
Tableau 25 : calcul du facteur d'émission global de la vapeur CPCU.....	34
Tableau 26 : consommation de chauffage (non électrique) par m ² occupé selon la nature d'activité.....	34
Tableau 27 : facteurs d'émission pour le chauffage par type d'énergie pour des logements ..	35
Tableau 28 : Mix énergétique français pour le chauffage des logements	37
Tableau 29 : Mix énergétique français pour l'eau chaude sanitaire des logements.....	37
Tableau 30 : facteur d'émissions non énergétiques (procédés et fuites).....	39
Tableau 31 : pourcentage de fuite dans les systèmes frigorifiques de l'industrie agro-alimentaire	41
Tableau 32 : consommations énergétiques en France pour l'activité de construction des véhicules terrestres	43
Tableau 33 : facteurs d'émissions pour l'activité de construction des véhicules terrestres.....	43

Tableau 34 : facteurs d'émission de la production des différents matériaux nécessaires à la construction d'un véhicule d'une tonne	45
Tableau 35 : émissions, au km parcouru, des véhicules essences en fonction de la zone habitée.	47
Tableau 36 : émissions, au km parcouru, des véhicules diesels en fonction de la zone habitée	47
Tableau 37 : consommations moyennes des véhicules en fonction de leur date de mise en circulation.....	48
Tableau 38 : consommation moyenne des véhicules essence et diesel en fonction de leur puissance administrative	49
Tableau 39 : consommation UTAC des véhicules essence pour des puissances administratives de 3 à 5 CV fiscaux.	50
Tableau 40 : distance moyenne domicile-travail en fonction du parcours.....	51
Tableau 41 : facteurs d'émission par voiture des déplacements domicile travail en fonction du parcours	52
Tableau 42 : facteurs d'émission domicile travail en fonction du type de parcours effectué par km.....	53
Tableau 43 : facteurs d'émission de la fabrication des minibus, autobus urbains et autocars interurbains.....	54
Tableau 44 : facteurs d'émission par voyageur.km pour différents types d'autobus.....	55
Tableau 45 : facteurs émission par véhicule.km pour différents types d'autobus	55
Tableau 46 : facteurs émission par passager.km pour différents types d'autobus	56
Tableau 47 : classes de PTAC pour les camionnettes et les camions.	58
Tableau 48 : caractéristiques PTAC.....	59
Tableau 49 : durée de vie moyenne des véhicules en km en fonction de la classe de PTAC ..	60
Tableau 50 : facteurs d'émission de la fabrication des véhicules en fonction de leur classe de PTAC.....	61
Tableau 51 : facteurs d'émission de la consommation des véhicules par km et par classe de PTAC.....	62
Tableau 52 : facteurs d'émission moyens par véhicule.km par classe de PTAC.....	63
Tableau 53 : caractéristique du transport de marchandises en fonction de la classe de PTAC.	67
Tableau 54 : facteurs d'émission à vide et à pleine charge du transport de marchandises.	68
Tableau 55 : facteurs d'émission moyens nationaux du transport de marchandise selon la classe de PTAC	71
Tableau 56 : caractéristiques de références des principaux avions.....	73
Tableau 57 : facteurs d'émission par passager.km pour les transports de personnes en avion	75
Tableau 58 : facteurs d'émission théoriques par tonne.km pour les transports de marchandises en avion	76
Tableau 59 : facteurs d'émission « réels » par tonne.km pour les transports de marchandises en avion	77
Tableau 60 : facteur d'émission pour le transport de marchandises en avion pour les vols court-courriers	77
Tableau 61 : facteur d'émission pour le transport de marchandises en avion pour les vols moyens-courriers.....	78
Tableau 62 : facteur d'émission pour le transport de marchandises en avion pour les vols long-courriers	78
Tableau 63 : facteurs d'émission par passager.km pour les déplacements en train à l'étranger	80

Tableau 64 : facteurs d'émission par tonne.km pour le fret en train à l'étranger	81
Tableau 65 : poids à vide des principaux bateaux.....	82
Tableau 66 : facteurs d'émission des porte-conteneurs	83
Tableau 67 : facteurs d'émission des vraquiers	85
Tableau 68 : facteurs d'émission pour différents types de métaux produits en Australie.	91
Tableau 69 : facteurs d'émission pour différentes activités métallurgique.(CEREN – 1999). 91	
Tableau 70 : calcul des facteurs d'émission pour différents métaux sans tenir compte de la part minière	92
Tableau 71 : récapitulatif des facteurs d'émission de la production de différents types de métaux.....	92
Tableau 72 : synthèse des facteurs d'émission retenues pour la production de différents types de métaux	93
Tableau 73 : facteur d'émission de la production de Polystyrène.	93
Tableau 74 : facteur d'émission de la production de Polychlorure de vinyle.....	94
Tableau 75 : facteur d'émission de la production de Polystyrène haute densité. (APME – 1998).....	94
Tableau 76 : facteur d'émission de la production de Polystyrène basse densité.	95
Tableau 77 : facteur d'émission de la production de Polyéthylène terephtalate amorphe.....	96
Tableau 78 : facteur d'émission de la production de Polyéthylène terephtalate (bouteille). ...	96
Tableau 79 : facteur d'émission de la production de Polyéthylène terephtalate (film).	96
Tableau 80 : facteur d'émission de la production de Nylon 66.	97
Tableau 81 : facteur d'émission de la production de différents produits verriers.(CEREN 95)	98
Tableau 82 : facteur d'émission de la production de différents types de verres(OFEFP)	98
Tableau 83 : facteur d'émission de la production de verre plat et de laine de verre – valeurs MIES 1999	99
Tableau 84 : facteurs d'émission de la production d'engrais en fonction des différents GES	105
Tableau 85 : facteurs d'émission de la production d'engrais en fonction des différents GES en kg eqC.	105
Tableau 86 : facteurs d'émission de différents herbicides	106
Tableau 87 : facteurs d'émission de différents fongicides.....	107
Tableau 88 : facteurs d'émission de différents insecticides.....	107
Tableau 89 : facteurs d'émission de molluscides.....	107
Tableau 90 : facteurs d'émission de différents régulateurs de croissance	108
Tableau 91 : facteurs d'émission pour l'énergie de culture de blé par hectare cultivé.....	109
Tableau 92 : émissions des produits utilisés pour la culture du blé.....	109
Tableau 93 : facteurs d'émission pour la fabrication des outils nécessaires à la culture du blé	110
Tableau 94 : calcul des facteurs d'émission à l'hectare de blé cultivé	110
Tableau 95 : facteurs d'émission pour l'énergie de culture du maïs par hectare cultivé.....	110
Tableau 96 : émissions des produits utilisés à la culture du maïs.....	111
Tableau 97 : facteurs d'émission pour la fabrication des outils utilisés pour la culture de maïs.	111
Tableau 98 : facteurs d'émission à l'hectare de maïs cultivé.....	111
Tableau 99 : facteur d'émission de la farine de blé.	112
Tableau 100 : émissions annuelles du bétail (digestion, déjections et alimentation).	114
Tableau 101 : facteurs d'émission du bétail par tête et par an.	114
Tableau 102 : facteurs d'émission des vaches allaitantes de réforme.....	115

Tableau 103 : facteur d'émission du veau de lait.....	115
Tableau 104 : facteur d'émission du lait entier.....	116
Tableau 105 : facteur d'émission du bœuf (races à viande).....	117
Tableau 106 : facteurs d'émission moyens du bœuf.....	117
Tableau 107 : facteur d'émission du fromage à pâte cuite.....	118
Tableau 108 : facteur d'émission du porc de batterie.....	119
Tableau 109 : facteur d'émission des poulets de batterie.....	120
Tableau 110 : facteur d'émission d'un oeuf.....	121
Tableau 111 : facteurs d'émission du mouton.....	121
Tableau 112 : facteurs d'émission de l'agneau de lait.....	122
Tableau 113 : facteurs d'émission de l'agneau à l'herbe.....	122
Tableau 114 : valeurs moyennes des unités d'azote à l'hectare cultivé en fonction du type de culture.....	124
Tableau 115 : facteurs d'émission moyens du N ₂ O en fonction du type de culture.....	125
Tableau 116 : facteurs d'émission de la fabrication d'engrais.....	125
Tableau 117 : facteurs d'émission des machines agricoles (consommation, entretien, fabrication) à l'hectare cultivé.....	126
Tableau 118 : facteurs d'émission en méthane des animaux d'élevage.....	127
Tableau 119 : facteurs d'émission des animaux d'élevage. (en kg eqC).....	127
Tableau 120 : facteurs d'émission résultant de la valorisation thermique de l'incinération de différents plastiques aux Etats-Unis.....	131
Tableau 121 : facteurs d'émission résultant de la valorisation thermique de l'incinération de différents plastiques en Europe.....	131
Tableau 122 : calcul des facteurs d'émission de l'incinération de plastiques avec valorisation.....	131
Tableau 123 : répartition française du traitement des déchets plastiques dans les différentes filières.....	132
Tableau 124 : facteurs d'émission Français moyen du traitement des déchets plastiques.....	132
Tableau 125 : facteurs d'émission des déchets papiers et cartons mis en décharge sans valorisation.....	133
Tableau 126 : facteurs d'émission résultant de la valorisation thermique de l'incinération depapiers et cartons aux Etats-Unis et en France.....	136
Tableau 127 : répartition française du traitement des déchets alimentaires dans les différentes filières.....	137
Tableau 128 : répartition française du traitement des papiers et cartons dans les différentes filières.....	137
Tableau 129 : facteur d'émissions du traitement des eaux usées.....	139
Tableau 130 : facteurs d'émission du traitement des déchets d'emballage.....	140
Tableau 131 : facteurs d'émission de la production de matériaux d'emballage.....	141
Tableau 132 : dépenses énergétiques pour la construction de bâtiment selon leur activité..	143
Tableau 133 : dépense énergétique pour la construction des bâtiments par matériaux.....	143
Tableau 134 : émissions totales engendrées par la construction des bâtiments en France par activité.....	144
Tableau 135 : calcul des facteurs d'émission pour la construction des bâtiment en fonction de leur type et de leur activité.....	144
Tableau 136 : facteurs d'émission des matériaux de construction des routes et parking.....	146
Tableau 137 : pourcentage supplémentaire engendré par le transport et la mise en œuvre des matériaux de construction des routes et parkings.....	146
Tableau 138 : trafic des différentes catégories de voies routières.....	147

Tableau 139 : facteurs d'émission de la construction de routes en fonction du type de voie	148
Tableau 140 : facteurs d'émission des glissières de sécurité en fonction du type de voie	148
Tableau 141 : type et consommation d'énergie pour la fabrication de puce.	150
Tableau 142 : type et consommation d'énergie pour la fabrication de circuits imprimés.	150
Tableau 143 : consommation d'énergie pour la fabrication de tubes cathodiques.	151
Tableau 144 : consommation d'énergie pour la fabrication d'écrans plats.	151
Tableau 145 : Kg de combustibles fossiles utilisés pour la fabrication des matériaux annexes d'un ordinateur.	151
Tableau 146 : calcul du facteur d'émission d'un ordinateur à tube cathodique.....	152
Tableau 147 : calcul du facteur d'émission d'un ordinateur à écran plat	152
Tableau 148 : poids moyen des différents matériaux d'un ordinateur et d'une imprimante.	153
Tableau 150 : facteurs d'émission de la production électrique par type de filière.	164
Tableau 151 : facteurs d'émission mensuels de la production d'électricité d'edf en 2001 ...	165
Tableau 152 : répartition des surfaces agricoles nationales cultivées.....	166
Tableau 153 : facteur d'émission de la dinde industrielle.....	167
Tableau 154 : facteur d'émission du canard et de la pintade de batterie	167
Tableau 155 : facteur d'émission des poulets fermiers	168
Tableau 156 : facteur d'émission des pintades fermières	168
Tableau 157 : facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué.....	175
Tableau 158 : facteurs d'émission des véhicules de 6 à 10 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué.....	176
Tableau 159 : facteurs d'émission des véhicules de plus de 11 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué.....	177
Tableau 160 : facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué.....	178
Tableau 161 : facteurs d'émission des véhicules de 6 à 10 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué.....	178
Tableau 162 : facteurs d'émission des véhicules de plus de 11 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué.....	179

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : corrélation entre la durée de vie et le PTAC des camions et camionnettes.....	60
Figure 2 : corrélation entre le PTAC et les émissions par véhicule.km.....	64
Figure 3 : corrélation entre le PTAC et les émissions moyennes par véhicule.km pour les véhicules particuliers.....	64
Figure 4 : forçage radiatif par aéronefs en 1992.	74
Figure 5 : corrélation entre les émissions quotidiennes d'un porte conteneurs en mer et sa capacité d'emport.	84
Figure 6 : répartition par type d'énergie primaire de la production d'électricité en Europe (Observatoire de l'Energie).....	162
Figure 7 : facteur d'émissions de certains producteurs d'électricité européens (2001).....	163
Figure 8 : répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de moins de 1.5 t de PTAC.....	170
Figure 9 : répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 1.5 t à 2.5 t de PTAC.....	170
Figure 10 : répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 2.5 t à 3.5 t de PTAC.....	171
Figure 11 : répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 3.5 t à 5 t de PTAC.....	171
Figure 12 : répartition du nombre de véhicules pour les camions de 5.1 t à 6 t de PTAC.....	172
Figure 13 : répartition du nombre de véhicules pour les camions de 6.1 t à 10.9 t de PTAC.....	172
Figure 14 : répartition du nombre de véhicules pour les camions de 11 t à 19 t de PTAC.....	173
Figure 15 : répartition du nombre de véhicules pour les camions de 19.1 t à 21 t de PTAC.....	173
Figure 16 : répartition du nombre de véhicules pour les camions de 21.1 t à 32 t de PTAC.....	174
Figure 17 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A300 version fret.....	180
Figure 18 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A310.....	180
Figure 19 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A318.....	181
Figure 20 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A3109.....	181
Figure 21 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A320.....	182
Figure 22 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A330-200.....	182
Figure 23 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A330-300.....	183
Figure 24 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-200.....	183
Figure 25 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-300.....	184
Figure 26 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-500.....	184
Figure 27 : rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-600.....	185
Figure 28 : plan d'occupation d l'espace de l'A320 en fonction du nombre de classe.....	186
Figure 29 : plan d'occupation de l'espace de l'A330-200, version deux cabines.....	186

Figure 30 : plan d'occupation de l'espace de l'A330-200, version trois cabines	186
Figure 31 : plan d'occupation de l'espace de l'A340-200 en fonction du nombre de classe	187
Figure 32 : plan d'occupation de l'espace de l'A340-600 en fonction du nombre de classe	187
Figure 33 : Succession de camions employés pour transporter des marchandises d'un point A vers un point B	Erreur ! Signet non défini.
Figure 34 : étapes de la modélisation qui permettent de passer de la taille du lot expédié à la description du trajet parcouru par lot. (fret routier)	Erreur ! Signet non défini.
Figure 35 : exemple 1 de circuit de transport pour le fret routier ...	Erreur ! Signet non défini.
Figure 36 : exemple 2 de circuit de transport pour le fret routier ...	Erreur ! Signet non défini.
Figure 37 : organisation la plus courante de distribution des colis (fret routier)	Erreur ! Signet non défini.