

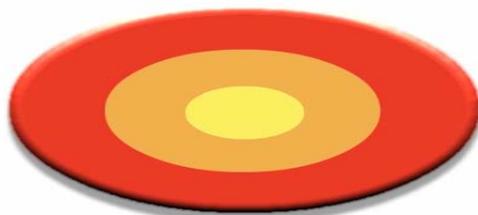
Bilan Carbone[®]
Entreprises et Collectivités

GUIDE DES FACTEURS D'EMISSIONS

Version 5.0

Calcul des facteurs d'émissions
et sources bibliographiques utilisées

JANVIER 2007



BILAN CARBONE

ADEME



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



Mission Interministérielle
de l'Effet de Serre



Le développement de la version Collectivités a reçu le soutien du Groupe **CAISSE D'EPARGNE**.

La méthode Bilan Carbone[®] a été initialement élaborée pour l'ADEME par Jean-Marc JANCOVICI, du bureau d'études MANICORE. Le développement de la version Collectivités a reçu le soutien du Groupe Caisse d'Epargne.
Bilan Carbone[®] est une marque déposée de l'ADEME.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	11
1 - INCERTITUDES PAR DEFAUT	12
1.1 Energie	12
1.1.1 Combustibles fossiles	12
1.1.2 Bioénergies	12
1.1.3 Electricité	12
1.2 Emissions de gaz à effet de serre autres que le CO2	13
1.3 Transports	13
1.4 Matériaux entrants et Services tertiaires	13
1.4.1 Matériaux entrants	13
1.4.2 Services tertiaires :	14
1.5 Déchets et eaux usées	14
1.6 Amortissements	14
2 - FACTEURS ASSOCIES A LA CONSOMMATION DIRECTE D'ENERGIE	15
2.1 Nature des émissions	15
2.2 Combustibles fossiles	15
2.2.1 Passage du PCS au PCI	16
2.2.2 Equivalences entre les unités de mesure de l'énergie	17
2.2.3 Combustibles liquides	18
2.2.3.1. Emissions liées à la combustion des combustibles liquides	18
2.2.3.2. Emissions amont des combustibles liquides	19
2.2.3.3. Incertitude	22
2.2.4 Gaz naturel	22
2.2.4.1. Emissions liées à la combustion du gaz naturel	22
2.2.4.2. Emissions amont du gaz naturel	22
2.2.4.3. Incertitude	23
2.2.5 Combustibles solides	24
2.2.6 Plastiques utilisés comme combustibles	26
2.3 Bioénergies	26
2.3.1 Biocombustibles	26
2.3.1.1 Définitions	26
2.3.1.2 Gaz pris en compte dans les facteurs d'émission	26
2.3.1.3 Facteurs d'émissions	27
2.3.1.3.1 Co-produits et sous-produits valorisés sur site	28
2.3.1.3.2 Coproduits ou sous-produits faisant l'objet d'une filière d'approvisionnement	28
2.3.1.3.3 Biocombustibles issus de cultures dédiées	28
2.3.2 Biocarburants	29
2.3.2.1 Définitions	29
2.3.2.1.1 La filière bioéthanol	29
2.3.2.1.2 La filière huiles végétales	29

2.3.2.2 Facteurs d'émission -----	30
2.3.2.2.1 Principe-----	30
2.3.2.2.2 Valeurs -----	30
2.3.2.3 Incorporation systématique dans l'essence et le gazole-----	31
2.4 Electricité-----	32
2.4.1 Quelques considérations préliminaires-----	32
2.4.2 Cas de l'électricité de réseau -----	33
2.4.3 Facteurs d'émission par producteur pour les électriciens européens -----	35
2.4.4 Cas des sources renouvelables intermittentes et fatales-----	36
2.4.4.1 Généralités-----	36
2.4.4.2 Eolien-----	37
2.4.4.3 Photovoltaïque -----	37
2.4.5 Saisonnalité de l'électricité EDF (producteur) -----	37
2.4.6 Facteurs différenciés selon les usages pour l'électricité de réseau française -----	38
2.4.7 Consommations standard des principaux équipements électriques résidentiels -----	39
2.4.8 Consommations spécifiques d'électricité pour le tertiaire -----	41
2.4.9 Pertes en ligne de l'électricité -----	42
2.4.10 Précautions à prendre dans le cadre des plans d'action -----	42
2.5 Achats de vapeur-----	43
2.5.1 Généralités-----	43
2.5.2 CPCU -----	43
2.5.3 Pertes en ligne de la vapeur -----	44
2.6 Cas du chauffage des locaux sans compteur propre -----	44
2.6.1 Activités tertiaires, chauffage non électrique -----	44
2.6.1.1 Chauffage au fioul -----	44
2.6.1.2 Chauffage au gaz naturel-----	45
2.6.1.3. Prise en compte de la localisation et de la rigueur climatique-----	46
2.6.2 Consommations moyennes du résidentiel -----	46
2.6.2.1 Facteurs d'émission par résidence principale pour le chauffage -----	47
2.6.2.2 Facteurs d'émission par résidence principale pour l'eau chaude sanitaire -----	48
2.6.2.3 Proportion de chaque énergie dans le chauffage des résidences principales -----	49
2.6.2.4 Proportion de chaque énergie dans l'eau chaude sanitaire des résidences principales -----	50
3 - PRISE EN COMPTE DES EMISSIONS NE PROVENANT PAS DE L'USAGE DE L'ENERGIE-----	51
3.1 - PRG des principaux gaz considérés -----	51
3.2 - Emanations de protoxyde d'azote des engrais azotés -----	53
3.3 - Fuites de fluides frigorigènes-----	54
3.3.1 Froid commercial -----	54
3.3.2 Froid industriel-----	55
3.3.2.1 Industrie agroalimentaire -----	55
3.3.2.2 Autres industries -----	56
3.3.2.3 Moyenne toutes industries -----	57
3.3.3 Froid tertiaire (climatisation)-----	57
3.4 - Autres cas-----	58
4- PRISE EN COMPTE DES TRANSPORTS -----	59
4.1 Transport routier de personnes -----	60
4.1.1 Voitures particulières -----	60

4.1.1.1 Amortissement des voitures particulières-----	60
4.1.1.2 Calcul de la consommation de référence des voitures particulières -----	63
4.1.1.2.1 Emissions approchées par type de carburant et zone de résidence -----	63
4.1.1.2.2 Emissions approchées par type de carburant et date de mise en circulation-----	65
4.1.1.2.3 Emissions approchées par type de carburant et puissance administrative -----	65
4.1.1.3 Déplacements entre domicile et travail -----	68
4.1.1.3.1 Facteurs d'émission par personne venant en voiture-----	68
4.1.1.3.2 Facteurs d'émission par personne venant en voiture, kilométrage connu -----	70
4.1.1.4 Déplacements en voiture pour motifs professionnels dans la journée-----	71
4.1.1.5 Déplacements en voiture au titre de la mobilité quotidienne des résidents d'un territoire -----	71
4.1.1.6 Déplacements en voiture au titre de la mobilité longue distance des résidents d'un territoire-----	73
4.1.2 Bus et cars -----	74
4.1.2.1 Amortissement des bus et autocars -----	74
4.1.2.2 Emissions par véhicule.km -----	74
4.1.2.3 Emissions par passager.km -----	75
4.1.2.3.1 Cas général-----	75
4.1.2.3.2 Valeur globale pour les déplacements domicile-travail -----	76
4.1.2.4 Déplacements en bus au titre de la mobilité quotidienne des résidents d'un territoire-----	77
4.1.2.4 Déplacements en bus au titre de la mobilité longue distance des résidents d'un territoire -----	79
4.1.3 Deux-roues -----	79
4.1.3.1 Amortissement et émissions amont des deux-roues -----	79
4.1.3.2 Emissions par véhicule.km liées à la combustion -----	80
4.1.4 RER, métro et tramways-----	81
4.1.4.1 Facteur d'émission-----	81
4.1.4.2 Kilométrages effectués au titre de la mobilité quotidienne -----	81
4.2 Transport routier de marchandises -----	82
4.2.1 Amortissement des camions et camionnettes -----	82
4.2.2 Consommations moyennes par véhicule.km par classe de PTAC-----	86
4.2.3 Facteurs d'émission par véhicule.km tenant compte du taux de remplissage et de parcours à vide-----	89
4.2.3.1 Raisonnement -----	89
4.2.3.2 Détermination des consommations à vide et à pleine charge -----	91
4.2.3.3 Réintégration des émissions de fabrication-----	92
4.2.4 Facteurs d'émission par tonne.km tenant compte du taux de remplissage et de parcours à vide -----	93
4.2.4.1 Typologie des transports de marchandises -----	93
4.2.4.2 Formulation des émissions par tonne.km dans le Bilan Carbone®-----	94
4.2.5 Incertitudes des méthodes exposées au 4.2.3 et 4.2.4-----	95
4.2.6 Calculs exacts des distances routières -----	96
4.2.7 Tonnes.km par habitant et par région -----	96
4.2.7.1 Tonnes.km expédiées par habitant et par région-----	96
4.2.7.1 Tonnes.km réceptionnées par habitant et par région -----	97
4.3 Transport aérien -----	97
4.3.1 Consommations par passager.km-----	97
4.3.2 Consommations par tonne.km pour les marchandises -----	101
4.3.3 Détermination des distances parcourues par trajet -----	103
4.3.3.1 Cas général -----	103
4.3.3.2 kilométrages effectués au titre de la mobilité longue distance-----	103
4.3.4 Gain ultérieur en précision -----	104
4.4 Transport ferroviaire -----	105
4.4.1 Généralités-----	105
4.4.2 Personnes -----	105
4.4.2.1 Train de voyageurs en France-----	105
4.4.2.2 Train de voyageurs en Europe -----	106
4.4.2.3 kilométrages effectués au titre de la mobilité longue distance-----	107
4.4.3 Fret -----	107
4.4.3.1 Train de fret en France -----	107
4.4.3.2 Train de fret en Europe-----	108

4.4.4	Calculs exacts des distances ferroviaires -----	108
4.5	Transport Maritime -----	108
4.5.1	Emissions liées à la fabrication des bateaux -----	109
4.5.2	Emissions spécifiques liées au carburant consommé -----	109
4.5.2.1	Cas des porte-conteneurs -----	110
4.5.2.2	Cas des vraquiers -----	112
4.5.2.3	Cas des cargos -----	113
4.5.3	Calcul des routes maritimes -----	113
4.6.	Transport fluvial de marchandises -----	113
5	- PRISE EN COMPTE DES MATERIAUX DE BASE ENTRANTS ET DES	
	SERVICES TERTIAIRES ACHETES -----	116
5.0	Remarque liminaire pour les matériaux entrants -----	116
5.1	Acier & métaux ferreux -----	116
5.2	Aluminium -----	118
5.3	Autres métaux -----	119
5.4	Plastiques -----	122
5.4.1.1	Polystyrène -----	122
5.4.1.2	Polychlorure de Vinyle -----	123
5.4.1.3	Polyéthylène haute densité -----	123
5.4.1.4	Polyéthylène basse densité -----	124
5.4.1.5	Polyéthylène terephthalate -----	124
5.4.1.6	Nylon -----	126
5.4.1.7	valeurs moyennes -----	126
5.5	Verre -----	126
5.6	Matériaux de construction -----	128
5.6.1	Ciment, béton -----	128
5.6.1.1	Eléments de définition -----	128
5.6.1.2	Facteurs d'émissions -----	128
5.6.2	Autres matériaux -----	129
5.6.2.1	Pierres de carrière -----	129
5.6.2.2	Bois -----	130
5.6.2.3	Autres matériaux de construction -----	131
5.7	Papiers et cartons -----	131
5.8	Achats divers et petites fournitures, facteur par défaut -----	132
5.8.1.	Cas des petites fournitures -----	132
5.8.2.	Cas des consommables bureautiques -----	132
5.9	Services tertiaires -----	132
5.9.1	Remarque liminaire -----	132
5.9.2	Ratio proposé -----	133
5.9.3	Dépense informatique, services divers -----	133

6 - PRISE EN COMPTE DES AUTRES PRODUITS ENTRANTS : PRODUITS SERVANT AUX ACTIVITES AGRICOLES, D'ELEVAGE, ET AGRO-ALIMENTAIRES	134
6.1 Remarque liminaire	134
6.2 Engrais	135
6.3 Phytosanitaires	136
6.3.1 Herbicides	136
6.3.2 Fongicides	137
6.3.3 Insecticides	137
6.3.4 Molluscides	138
6.3.5 Régulateurs de croissance	138
6.3.6 Valeur par défaut	138
6.4 Céréales, farine	138
6.4.1 Blé	139
6.4.2 Maïs fourrage	140
6.4.3 Farine	142
6.5 Fruits et légumes	142
6.6 Viande de bœuf et de veau	142
6.6.1 Emissions annuelles du bétail	143
6.6.2 Affectation des vaches allaitantes	144
6.6.3 Veaux de lait	145
6.6.4 Vaches laitières et lait	145
6.6.5 Bœufs	146
6.6.5.1 Races à viande	146
6.6.5.2 Valeur moyenne	147
6.7 Laitages	147
6.7.1 Fromage à pâte cuite	147
6.7.2 Fromages frais, yaourts	147
6.7.3 Fromages au lait cru	147
6.7.4 Beurre, crème	148
6.8 Porc de batterie	148
6.9 Volailles et produits dérivés	149
6.9.1 Poulets de batterie	149
6.9.2 Œufs	150
6.10 Mouton	150
6.10.1 Agneaux de lait	151
6.10.2 Agneaux à l'herbe	151
6.11 Poisson	152
6.12 Alcool, sucre	152
6.13 Autres produits	153
6.14 Facteurs d'émission agrégés pour les exploitations agricoles	153
6.14.1 Emissions à l'hectare pour les principales cultures	153
6.14.1.1 Emanations de protoxyde d'azote	153
6.14.1.2 Fabrication des engrais	154

6.14.1.3 Mécanisation	155
6.14.2 Emissions de méthane des animaux d'élevage	155
7 - PRISE EN COMPTE DES DECHETS DIRECTS ET DES EAUX USEES	158
7.0 Remarque liminaire	158
7.1 Déchets inertes	158
7.1.1 Déchets inertes – mise en décharge et incinération	159
7.1.2 Déchets inertes - valeur par défaut	159
7.2 Déchets non fermentescibles mais combustibles	160
7.2.1 Cas du plastique mis en décharge	160
7.2.2 Cas du plastique incinéré sans valorisation	160
7.2.3 Cas du plastique incinéré avec valorisation	160
7.2.4 Cas du plastique recyclé	162
7.2.5 Répartition française et valeurs moyennes	162
7.3 Déchets fermentescibles et combustibles	162
7.3.1 Mise en décharge sans valorisation	163
7.3.1.1 Papiers et cartons	163
7.3.1.2 Déchets alimentaires	163
7.3.2 Mise en décharge avec valorisation	163
7.3.2.1 Déchets alimentaires	164
7.3.2.2 Papiers et cartons	164
7.3.3 Incinération sans valorisation	165
7.3.3.1 Déchets alimentaires	165
7.3.3.2 Papiers et cartons	165
7.3.4 Incinération avec valorisation	165
7.3.4.1 Déchets alimentaires	165
7.3.4.2 Papiers et cartons	166
7.3.5 Recyclage	166
7.3.6 Moyenne française	166
7.4 Déchets Industriels spéciaux	167
7.5 Fuites ou émissions non énergétiques de fin de vie	169
7.6 Eaux usées	169
8 - TRAITEMENT DE FIN DE VIE DES EMBALLAGES	171
9 - PRISE EN COMPTE DE L'AMORTISSEMENT DES IMMOBILISATIONS	173
9.0 Remarque liminaire	173
9.1 Bâtiments	173
9.1.1 approche rudimentaire par les surfaces construites	173
9.1.2 Approche globale, par la consommation énergétique	176
9.1.3 Approche plus détaillée, par quantité de matériaux mis en oeuvre	176
9.2 Routes et parkings	177
9.2.1 Constituants primaires	177
9.2.2 Facteurs d'émission au m ² de surface construite (routes et parkings)	179
9.2.2.1 Catégories de voies routières	179
9.2.2.2 Emissions au m ² construit	179

9.2.2.3 Emissions liées aux glissières de sécurité -----	180
9.2.2.4 Parkings-----	180
9.3 Machines & véhicules -----	181
9.3.1 Véhicules -----	181
9.3.2 Machines de production -----	181
9.3.3 Informatique-----	181
9.3.3.1 Fabrication des puces-----	181
9.3.3.2 Circuits imprimés-----	182
9.3.3.3 Ecrans -----	183
9.3.3.4 Autres constituants et total-----	183
9.3.3.5 Imprimantes et serveurs-----	185
9.3.3.6 Méthode à partir des valeurs d'achat-----	185
9.3.3.7 Matériel de reprographie-----	185
10 - SOURCES, BIBLIOGRAPHIE -----	186
10.1 - Sources-----	186
10.1.1 - Personnes mises à contribution pour la mise au point des facteurs d'émission-----	186
10.1.2 - Ouvrages consultés pour l'élaboration des facteurs d'émission-----	189
10.1.3 - Principaux sites Internet consultés pour la mise au point de la méthodologie-----	192
10.2 Bibliographie générale-----	193
10.2.1 - Documents édités par le GIEC-----	193
10.2.2 - Documents édités par le CITEPA -----	193
10.2.3 - Documents édités par l'ADEME -----	194
10.2.4 - Documents édités par d'autres organismes français-----	194
ANNEXE 1 : PRODUCTION D'ELECTRICITE EN EUROPE-----	195
ANNEXE 2 - CONTENU EN EQUIVALENT CARBONE DU KWH ELECTRIQUE PRODUIT PAR EDF -----	197
ANNEXE 3 : FACTEURS D'EMISSION DE DIOXYDE DE CARBONE POUR LES COMBUSTIBLES -----	199
ANNEXE 4 : NOTE DE CADRAGE SUR LE CONTENU CO₂ DU KWH PAR USAGE EN FRANCE -----	203
ANNEXE 5 : REPARTITION DES TERRES AGRICOLES EN FRANCE -----	207
ANNEXE 6 : CONTENU EN CARBONE DES VOLAILLES -----	208
1 - Dindes industrielles -----	208
2 - Canards & pintades de batterie -----	208
3 - Volailles fermières -----	209
ANNEXE 7 - REPARTITION DES VEHICULES ROUTIERS DE TRANSPORT DE MARCHANDISES PAR PTAC -----	210
1 - Camionnettes de PTAC < à 1,5 t -----	211
2 - Camionnettes de PTAC compris entre 1,5 et 2,5 t -----	211
3 - Camionnettes de PTAC compris entre 2,51 et 3,5 t -----	212
4 - Camionnettes de PTAC compris entre 3,51 et 5 t -----	212

5 - Camions de PTAC compris entre 5,1 et 6 t -----	213
6 - Camions de PTAC compris entre 6,1 et 10,9 t -----	213
7 - Camions de PTAC compris entre 11 et 19 t -----	214
8 - Camions de PTAC compris entre 19,1 et 21 t -----	214
9 - Camions de PTAC compris entre 21,1 et 32,6 t -----	215
10 - Ensembles articulés-----	215

ANNEXE 8 - CONSOMMATIONS DES VEHICULES DE TOURISME PAR PUISSANCE ADMINISTRATIVE ----- 216

1 - Catégorie 3 à 5 CV fiscaux, essence -----	216
2 - Catégorie 6 à 10 CV fiscaux, essence -----	217
3 - Catégorie plus de 11 CV fiscaux, essence -----	218
4 - Catégorie 3 à 5 CV fiscaux, diesel -----	219
5 - Catégorie 6 à 10 CV fiscaux, diesel-----	219
6 - Catégorie 11 CV fiscaux et plus, diesel -----	220

ANNEXE 9 - RAYON D'ACTION ET AMENAGEMENTS INTERIEURS DES AVIONS AIRBUS ----- 221

1 - Rayons d'action -----	221
1.1 A300 version fret -----	221
1.2 A310-----	221
1.3 A318-----	222
1.4 A319-----	222
1.5 A320-----	223
1.6 A330-200 -----	223
1.7 A330-300 -----	224
1.8 A340-200 -----	224
1.9 A340-300 -----	225
1.10 A340-500-----	225
1.11 A340-600-----	226
2. Cabines -----	226
2.1 A320-----	226
2.2 A330-200 -----	227
2.3 A340-200 -----	227
2.4 A340-600 -----	228

LISTE DES TABLEAUX ----- 229

LISTE DES FIGURES ----- 236

LISTE DES SIGLES----- 238

LISTE DES EXPERTS ADEME ----- 240

Introduction

Le présent document permet de détailler le calcul de chacun des facteurs d'émission¹ contenus dans les différents tableurs maîtres composant la méthode Bilan Carbone® et d'en préciser les sources. 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.

Depuis la sortie de la première version du Bilan Carbone, plus particulièrement destinée aux entreprises, cette méthode a fait l'objet d'améliorations constantes tant au niveau de la forme que du contenu pour en être actuellement à la version n° 4 ou V4.

La nouvelle étape décisive de cette évolution est la mise au point d'une version spécifiquement destinée aux collectivités territoriales et qui a justifié que l'ensemble des tableurs et documents associés au Bilan Carbone porte désormais un numéro de version qui est le n°5 ou V5. Une première version test d'un tableur « collectivités » a fait l'objet d'une expérimentation auprès d'une quinzaine de collectivités territoriales françaises pendant 18 mois. Les premiers retours d'expérience ont conduit à modifier significativement le tableur initial, qui a été éclaté en 2 modules distincts :

1. un module « patrimoine & services » qui s'attache aux émissions engendrées par l'activité de la collectivité ou par les services qu'elle rend ;
2. un module « territoire » qui concerne plus largement les émissions engendrées par l'ensemble des activités prenant place sur le territoire de la collectivité considérée.

C'est la sortie de cette version n°5 qui justifie la mise à jour de ce guide qui reprend le calcul de la totalité des facteurs d'émissions repris dans les trois tableurs maîtres « entreprises », « collectivités – patrimoine & services » et « collectivités – territoire » composant globalement la méthode Bilan Carbone.

Note : compte tenu de l'édition de deux mises à jour rapprochées de ce guide des facteurs d'émissions, l'une en juin 2006 pour les facteurs relatifs au tableur maître « entreprises », l'autre en décembre 2006 pour les facteurs relatifs aux tableurs maîtres « collectivités », nous indiquerons les paragraphes modifiés lors de ces deux dernières mises à jour par une bordure rouge en marge gauche comme c'est le cas pour le présent alinéa.

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 les résultats avec les deux unités, toutefois les facteurs d'émission sont uniquement en équivalent carbone. **Attention 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 ce document et utilisés dans le tableur Bilan Carbone® 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 Bioénergies

Les bioénergies (biocombustibles et biocarburants) faisant l'objet d'une nomenclature relativement détaillée, et les processus de production étant relativement bien documentés, les facteurs d'émission ont été affectés d'une incertitude par défaut de 10%.

1.1.3 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 de gaz à effet de serre autres que le CO₂

Le facteur d'émission pour un gaz à effet de serre autre que le CO₂ est son PRG² (voir § 3.1). Ce dernier est une approximation en soi, estimée valide à $\pm 30\%$ par le GIEC³.

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

1.4.1 Matériaux entrants

La valeur par défaut de l'incertitude sur le facteur d'émission d'un matériau entrant, c'est-à-dire la variation autour de la valeur moyenne du "contenu en gaz à effet de serre" pour les produits alimentaires a été prise égale à 30%. Cette incertitude a été prise égale à 10% pour les facteurs d'émission concernant les matériaux de construction des bâtiments issus de la base INIES⁴, les données de cette base faisant référence à des études détaillées. Les matériaux primaires ont été affectés d'une incertitude égale à 20%.

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.

² PRG : Potentiel de Réchauffement Global

³ GIEC : Groupement d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

⁴ INIES : Information sur l'Impact Environnemental et Sanitaire . La Base INIES est une base de données proposant des analyse de cycle de vie de différents matériaux et produits de construction de bâtiments. Voir § 9.1.3.

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.

1.4.2 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 tertiaire⁵ 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 (méthode par les superficies), l'outillage ou encore les véhicules et le matériel informatique. Seules des analyses de filière précises permettraient de réduire ces incertitudes de manière significative.

En revanche, pour l'approche par les matériaux pour les bâtiments ou les routes et parkings, une incertitude moindre, variant de 10 à 20 %, a été affectée aux différents facteurs d'émission.

⁵ 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 ou des NO_x).
- 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.

Ces facteurs correspondent pour l'essentiel à des émissions de CO₂. Lorsque d'autres gaz sont pris en compte, il s'agira uniquement de méthane⁶, de N₂O⁷ et pour des contributions généralement marginales. Les émissions de gaz frigorigènes (climatisation, froid alimentaire...) sont également prises en compte. Pour plus de détails, vous pouvez vous reporter au chapitre correspondant (cf. § 3 relatif aux émissions non énergétiques).

2.2 Combustibles fossiles

On entend par combustibles fossiles tous les produits bruts ou dérivés issus du pétrole, du gaz et du charbon.

Les facteurs d'émission calculés ci-dessous ont 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

⁶ Du méthane peut-être émis au moment de la combustion en cas d'oxydation incomplète ; c'est notamment le cas pour les feux de biomasse, mais n'est généralement pas significatif pour la combustion d'un hydrocarbure dans un moteur ;

⁷ Le N₂O est l'un des oxydes d'azote engendrés dès qu'une combustion se fait avec de l'air comme comburant. L'oxygène et l'azote s'associent alors sous diverses formes, dont du N₂O.

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*, qui seront éventuellement exploitées dans le cadre de certaines extractions⁸.

Pour ne pas alourdir le tableur Bilan Carbone®, ce dernier limite les facteurs d'émission à un nombre restreint d'unités d'énergie, les plus courantes de fait. Pour l'éventualité où les données seraient disponibles uniquement dans une autre unité, nous rappelons au préalable quelques règles de conversion des unités entre elles.

Remarque : les facteurs d'émission des combustibles fossiles qui sont donnés ci-dessous (§ 2.2.3 à 2.2.5) sont pour une large part issus d'une circulaire ministérielle récente, rédigée dans le cadre de la transposition de la directive « permis d'émission ». Cette circulaire propose des facteurs d'émission pour les combustibles (solides, liquides ou gazeux) qui diffèrent de quelques % de ceux qui étaient en vigueur dans la version précédente n°3 du Bilan Carbone. Dans un souci d'harmonisation, nous avons repris les valeurs de cette circulaire dans le présent guide, pour éviter toute hésitation quant à la valeur à employer (la différence reste inférieure à l'incertitude sur les facteurs).

Par contre, les facteurs des combustibles ci-dessous ne sont pas ceux qui ont été utilisés pour le calcul des facteurs d'émission des transports (§ 4 du présent document). Ces derniers ont été mis au point avec les facteurs d'émission des combustibles en vigueur dans la version n°3, et n'ont pas été modifiés dans cette version, faute de temps. Il en résulte probablement une différence de quelques %, en ordre de grandeur, avec les facteurs pour les transports qui seraient obtenus en prenant en compte les valeurs ci-dessous, soit moins que l'incertitude sur les facteurs des transports. Cela ne gêne en rien l'approche par les ordres de grandeur, et l'harmonisation sera effectuée pour la prochaine version.

2.2.1 Passage du PCS au PCI

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. Du fait de la présence de vapeur d'eau, il existe 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 d'un combustible est la quantité de chaleur, exprimée en kWh ou MJ, qui est dégagée par la combustion complète d'un m³ de gaz dans l'air à une pression constante de 1,01325 bar ; le gaz et l'air étant à une température initiale de 0°C et tous les produits de combustion étant ramenés à la température de 0°C.

⁸ 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 de la méthode Bilan Carbone®" et le "Manuel d'utilisation du tableur Bilan Carbone.xls".

L'eau pouvant se trouver sous forme gazeuse ou sous forme liquide au voisinage du zéro, il existe en fait 2 pouvoirs calorifiques selon l'état final de l'eau résultant de la combustion :

- **Lorsque l'eau formée pendant la combustion est conservée à l'état gazeux (vapeur)**, la quantité de chaleur mesurée correspond au Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI).
- **Lorsque l'eau formée pendant la combustion est ramenée à l'état liquide (les autres produits restant à l'état gazeux)**, la quantité de chaleur mesurée correspond au Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS).

La distinction PCS/PCI réside donc dans le fait que le PCS intègre l'énergie (appelée chaleur latente) libérée par la condensation⁹ de l'eau après la combustion tandis que l'autre, le PCI, ne l'intègre pas.

Pour 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 exprimés en 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 part de la vapeur d'eau dans les produits de combustion, donc de la proportion d'hydrogène dans le combustible ; il 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

Pour le gaz naturel, par exemple, 1 kWh PCS équivaut à 1,11 kWh PCI. Cela signifie que le facteur d'émission par unité d'énergie augmente de 11% lorsque l'on passe du PCS au PCI (ou inversement diminue de 11% lorsque l'on passe du PCI au PCS).

2.2.2 Equivalences entre les unités de mesure de l'énergie

Le tableau ci-dessous reprend les unités utilisées pour mesurer l'énergie (tep¹⁰, tec¹¹, Joule, kWh PCI, BTU¹², m³ de gaz, tonne de bois¹³) et établit les équivalences entre ces différentes unités.

⁹ La condensation correspond au passage de l'état gazeux à l'état liquide

¹⁰ tep : tonne équivalent pétrole

¹¹ tec : tonne équivalent charbon

¹² BTU : British Thermal Unit

	conversion des unités						
	tep	tec	Joule	kWh PCI	BTU	m ³ de gaz	tonne bois 20%
tep	1	1,43	4,20 E+10	11 667	39 808 351	1 200	2,99
tec	0,697	1	2,93 E+10	8 136	27 759 690	837	2,09
Joule	2,38 E-11	3,41 E-11	1	2,78 E-07	0,000948	2,86 E-08	7,12 E-11
kWh PCI	8,57 E-05	1,23 E-04	3,60 E+06	1	3 412	0,10	2,56 E-04
BTU	2,51 E-08	3,60 E-08	1 055	0,00029	1	3,01 E-05	7,51 E-08
m ³ de gaz	0,00083	0,00120	3,50 E+07	9,7	33 174	1	0,00249
t bois 20%	0,334	0,479	1,40 E+10	3 900	13 307 363	401	1

Tableau 2 : Equivalences entre les unités de mesure de l'énergie

Ainsi, on peut lire par exemple sur la ligne « tep » du tableau ci-dessus, les équivalences d'1 tep en tec, en Joules, en kWh PCI, en BTU, en m³ de gaz et en tonne de bois.

2.2.3 Combustibles liquides

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

2.2.3.1. Emissions liées à la combustion des combustibles liquides

Les données de base dont nous disposons sont obtenues auprès des organismes suivants : l'ADEME¹⁴, l'Observatoire de l'Energie¹⁵, le Comité Professionnel du Pétrole (CPDP)¹⁶, le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable¹⁷ et la Commission Européenne¹⁸. Leurs différentes publications nous permettent d'obtenir des facteurs d'émissions de GES selon différentes unités ou d'établir des équivalences. Les valeurs retenues sont les suivantes:

Source d'énergie	kg équivalent carbone par tonne	kg équivalent carbone par kWh	kg équivalent carbone par tep PCI	kg équivalent carbone par litre
Gaz de Pétrole Liquéfié - GPL	803	0,063	733	0,432
Supercarburant (ARS, SP95, SP98) ¹⁹	876	0,072	836	0,661
Gazole	859	0,074	859	0,726
Fuel domestique	859	0,074	859	0,726
Fuel lourd	851	0,077	893	0,851
Pétrole brut	836	0,072	836	0,726

¹³ 20% d'humidité.

¹⁴ ADEME, 2005, Facteurs d'émission de dioxyde de carbone pour les combustibles. (voir annexe 3)

¹⁵ DGEMP, Observatoire de l'Energie, L'énergie en France, Repères, Edition 2005 et site internet <http://www.industrie.gouv.fr/energie/sommaire.htm>

¹⁶ CPDP, 2005, Circulaire n°9642, Masses volumiques 2006.

¹⁷ ADEME, 2005, Facteurs d'émission de dioxyde de carbone pour les combustibles. (voir annexe 3)

¹⁸ Directive 1999/100/CE de la Commission, du 15 décembre 1999, portant adaptation au progrès technique de la directive 80/1268/CEE du Conseil relative aux émissions de dioxyde de carbone et à la consommation de carburant des véhicules à moteur (mesure des émissions de CO₂ normalisée)

¹⁹ Equivalent à essence

Carburéacteur ²⁰	852	0,073	848	0,682
-----------------------------	-----	-------	-----	-------

Tableau 3 : Facteurs d'émission des combustibles liquides.

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.

2.2.3.2. Emissions amont des combustibles liquides

Les émissions amont des combustibles liquides concernent l'extraction du pétrole brut, le transport de ce dernier, soit par bateau soit par pipe-line, et le raffinage, opération qui est la plus émissive de la chaîne. Un document publié par l'IFP en 2001²¹ 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 pétrole, 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 4 : 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. 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 MEDD) kg équ. C par tonne	Contenu lié aux consommations d'énergie du raffinage (Source DGEMP) kg équ. C par tonne	Contenu total en kg équ. C par tonne
GPL	803	90	893
Essence	876	88	964
Carburéacteur	852	18	870

²⁰ Equivalent à kérosène et jefuel

²¹ 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

FOL (fioul lourd)	851	56	907
FOD et Gazole	859	31	890

Tableau 5 : 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, 2001), 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 CEREN²², 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 ensemble (IFP, 2001), 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 equ. C/tep)	59,6
total (kg equ. C/tonne)	61,4

Tableau 6 : Facteurs d'émission liés à l'extraction et au transport du pétrole

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, 2001) 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 dépenses 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 les tableaux ci-après:

²² Energies par produits, Etude du CEREN pour l'ADEME, 1999.

	Emissions de combustion	Emissions liées au raffinage	Extraction et transport amont	Emissions totales	% supplémentaire par rapport aux seules émissions de combustion
unité	kg équ. C par tonne	kg équ. C par tonne	kg équ. C par tonne	kg équ. C par tonne	
Pétrole	836		61,4	898	7,3%

Tableau 7 : 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 concernant le pétrole (IFP, 2001).

	Emissions de combustion	Emissions liées au raffinage	Extraction et transport amont	Emissions totales	% supplémentaire par rapport aux seules émissions de combustion
source	MEDD	CEREN	IFP		
unité	kg équ. C par tonne	kg équ. C par tonne	kg équ. C par tonne	kg équ. C par tonne	
Carburant					
GPL	803	90	61	954	18,8%
Essence	876	88	61	1025	17,0%
Carburéacteur	852	18	61	931	9,3%
FOL (fioul lourd)	851	56	61	968	13,7%
FOD/Gazole	859	31	61	951	10,7%

Tableau 8 : 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 concernant les principaux 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 MEDD, 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 PCI	kg équivalent carbone par litre
Gaz de Pétrole Liquéfié - GPL	954	0,075	871	0,513
Supercarburant (ARS, SP95, SP98) ²³	1 025	0,084	978	0,774
Gazole	951	0,082	951	0,804
Fuel domestique	951	0,082	951	0,804
Fuel lourd	968	0,087	1 016	0,968
Pétrole brut	898	0,077	898	0,779
Carburéacteur ²⁴	931	0,080	926	0,745

²³ Equivalent à essence

²⁴ Equivalent à kérosène ou jefuel

Tableau 9 : Conversion des facteurs d'émission globaux (amont + combustion) de différents carburants

Nous constatons ainsi qu'en intégrant les émissions amont, les carburants diesel, essence et GPL sont comparables en termes d'émission par unité d'énergie finale. Le tableur Bilan Carbone® possède une séparation entre ce qui relève des émissions de combustion sur place et ce qui relève des émissions amont.

2.2.3.3. Incertitude

Comme exposé au § 1 ci-dessus, tous les facteurs d'émission sont affectés d'une incertitude. Dans le cas présent, les procédés sont relativement standards, les énergies de combustion sont bien connues, et les dépenses intermédiaires connues en moyenne mondiale, de telle sorte que nous avons affecté à ce poste une imprécision de 5% seulement.

2.2.4 Gaz naturel

2.2.4.1. Emissions liées à la combustion du gaz naturel

Les sources précitées (ADEME, MEDD) permettent d'établir les valeurs suivantes pour les émissions de combustion du gaz naturel :

Source d'énergie	kg équivalent carbone par tonne	kg équivalent carbone par kWh	kg équivalent carbone par tep (énergie finale)
Gaz naturel	771	0,056	653

Tableau 10 : Facteurs d'émission de la combustion du gaz naturel (ADEME, MEDD, 2005)

2.2.4.2. Emissions amont du gaz naturel

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 précité 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 11 : Facteurs d'émission des processus amont du gaz naturel (IFP-2001)

5,7 g équivalent CO₂ par MJ se convertissent en 71 kg équivalent carbone par tep, soit 9% des émissions liées à la seule combustion (qui sont de 707 kg équivalent carbone par tep).

Par ailleurs ce document de l'IFP 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.

En retenant le chiffre de 0,35% de fuites, cela signifie que la consommation finale de 1000 Kg de gaz naturel nécessite l'extraction de 1003,5 Kg. Cela équivaut à rajouter 2,9% d'émission supplémentaires en équivalent CO₂²⁵ par rapport aux émissions de combustion seules, de telle sorte que les émissions totales amont représentent 12,9% des émissions de combustion.

	<i>combustion</i>	<i>extraction</i>	<i>traitement</i>	<i>transport</i>	<i>pertes du réseau de transport et de distribution</i>	<i>Emissions totales</i>	<i>% supplémentaire par rapport aux seules émissions de combustion</i>
<i>source</i>	<i>CITEPA</i>	<i>IFP</i>					
émissions en kg C/GJ	16	0,518	0,436	0,600			
% du gaz consommé	100%	100%	100%	100%	0,35%		
émissions en kg eqC/tonne	771	25,702	21,644	29,760	21,95	870	12,85%

Tableau 12 : 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 du gaz naturel.

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

Source d'énergie	kg équivalent carbone par tonne	kg équivalent carbone par kWh	kg équivalent carbone par tep (énergie finale)
Gaz naturel	870	0,063	737

Tableau 13 : Calcul du facteur d'émission global (amont + combustion) du gaz naturel

2.2.4.3. Incertitude

Comme pour les combustibles liquides, nous avons attribué aux facteurs d'émission du gaz naturel une incertitude de 5%

²⁵ En prenant en compte un PRG de 23.

2.2.5 Combustibles solides

Les facteurs d'émission par unité d'énergie (CO₂/GJ) et les contenus énergétiques par unité de poids (GJ/t) des principaux combustibles solides ont été publiés par le MEDD en 2005 et repris dans une note de l'ADEME²⁶.

Ces données sont reprises dans le tableau ci-dessous pour ce qui concerne les combustibles solides, issus de ressources fossiles.

Nature de combustible	Contenu énergétique en GJ PCI par tonne	FACTEUR D'EMISSION (kgCO ₂ /GJ PCI)
Charbon à coke (PCS>23 865 kJ/kg)	26	95
Houille (PCS>23 865 kJ/kg)	26	95
Charbon sous-bitumineux (17 435 kJ/kg<PCS<23 865 kJ/kg)	26	96
Agglomérés (provenant de houille ou sous bitumeux)	32	95
Lignite (PCS<17 435 kJ/kg)	17	100
Brique de lignite	17	98
Coke de houille	28	107
Coke de lignite	17	108
Coke de pétrole	32	96
Tourbe	11,6	110
Schistes	9,4	106
Vieux Pneumatiques	26	85
Plastiques	23	75
Naphta	45	73

Tableau 14: énergie massique et émissions de CO₂ associées

A partir de ce tableau, il est possible d'obtenir les valeurs ci-dessous

LIBELLE	Energie massique (GJ/t)	kgCO ₂ /GJ PCI	kg équ C/kWh PCI	kg équ C/tonne	kg équ C/tep PCI
Charbon à coke (PCS>23 865 kJ/kg)	26	95	0,093	674	1 082
Houille (PCS>23 865 kJ/kg)	26	95	0,093	674	1 082
Charbon sous-bitumineux (17 435 kJ/kg<PCS<23 865 kJ/kg)	26	96	0,094	681	1 093
Agglomérés (provenant de houille ou sous bitumeux)	32	95	0,093	829	1 082
Lignite (PCS<17 435 kJ/kg)	17	100	0,098	464	1 139
Brique de lignite	17	98	0,096	454	1 116
Coke de houille	28	107	0,105	817	1 219
Coke de lignite	17	108	0,106	501	1 230
Coke de pétrole	32	96	0,094	838	1 093
Tourbe	11,6	110	0,108	348	1 253
Schistes	9,4	106	0,104	272	1 207
Vieux Pneumatiques	26	85	0,083	603	968
Plastiques	23	75	0,074	470	854
Naphta	45	73	0,072	896	831

Tableau 15: énergie massique et émissions de CO₂ par unité d'énergie pour les combustibles fossiles solides

26 ADEME, 2005, Facteurs d'émission de dioxyde de carbone pour les combustibles (voir annexe 3)

Remarque : une liste plus complète de combustibles est disponible en annexe 11, avec les facteurs d'émission par unité de masse ou par unité d'énergie.

Le document de l'IFP précité²⁷ 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 16: 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.

Faute de disposer de données particulières pour les autres combustibles solides, nous appliquerons le même pourcentage supplémentaire de 8% (environ) des émissions de combustion pour tenir compte des processus amont, sauf pour les vieux pneumatiques et vieux plastiques, car il s'agit alors de valorisation de déchets, avec par convention des émissions de production des déchets valorisés qui sont nulles.

LIBELLE	kg équ C/kWh PCI	kg équ C/tonne	kg équ C/tep PCI
Charbon à coke (PCS>23 865 kJ/kg)	0,101	728	1 169
Houille (PCS>23 865 kJ/kg)	0,101	728	1 169
Charbon sous-bitumineux (17 435 kJ/kg<PCS<23 865 kJ/kg)	0,102	735	1 181
Agglomérés (provenant de houille ou sous bitumeux)	0,101	895	1 169
Lignite (PCS<17 435 kJ/kg)	0,106	501	1 230
Briquelette de lignite	0,104	491	1 205
Coke de houille	0,113	882	1 316
Coke de lignite	0,115	541	1 328
Coke de pétrole	0,102	905	1 181
Tourbe	0,117	376	1 353
Schistes	0,112	293	1 304
Naphta	0,077	968	898

Tableau 17: Facteurs d'émission globaux (amonts + combustion) de combustibles solides, hors déchets valorisés

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

²⁷ 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

standard. Bien entendu, un utilisateur de la méthode peut toujours rajouter une ligne avec le facteur d'émission "collant" au mieux à son cas.

2.2.6 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®.

2.3 Bioénergies

2.3.1 Biocombustibles

2.3.1.1 Définitions

La catégorie « biocombustibles » rassemble les fractions solides, d'origine animale ou végétale, pouvant être brûlées pour valorisation de la chaleur de combustion (valorisation directe de la chaleur, avec éventuellement production combinée d'électricité).

Ces produits végétaux (ou animaux, de manière plus marginale) servant de combustibles pour chaudière sont aujourd'hui principalement des co-produits ou sous-produits d'activités forestières, agricoles ou industrielles : bois (écorces, sciures, chutes...), paille, pépins, noyaux, balles de riz, bagasse²⁸...

Toutefois certaines filières de biocombustibles - en développement - sont dédiées à la fourniture d'énergie : plaquettes forestières (copeaux de bois issus du déchetage de bois), granulés (compactage de sciures de bois), cultures agricoles énergétiques (céréales...).

2.3.1.2 Gaz pris en compte dans les facteurs d'émission

Comme il est rappelé dans le guide méthodologique, les inventaires d'émission de gaz à effet de serre ont pour objet de représenter la perturbation d'origine humaine des cycles naturels des gaz à effet de serre. Ce qui doit être mesuré, c'est le supplément d'effet de serre qui découle de l'accumulation des gaz éponymes dans l'atmosphère du fait de l'homme. Pour cela, il faut donc que l'homme ait créé un flux vers l'atmosphère et n'ait pas créé, corrélativement, un flux qui reprenne ces gaz de l'atmosphère.

Quand c'est un composé d'origine organique qui est brûlé, deux cas de figure peuvent se présenter :

- la biomasse brûlée n'est pas remplacée : il y a alors lieu de compter les émissions

²⁸ La bagasse se compose du résidu ligneux de la canne à sucre, et trouve des débouchés significatifs dans les pays producteurs pour substituer le charbon dans les centrales électriques thermiques.

- la biomasse brûlée est remplacée l'année même ou peu de temps après : il n'y alors pas lieu de compter des émissions, car ces dernières sont compensées par la croissance de la biomasse qui prend place par ailleurs.

Le deuxième cas s'appliquera en cas d'utilisation des produits d'une culture annuelle, par exemple : le fait de brûler de la paille l'année N est compensé par la croissance de la paille l'année N+1. Même pour le bois de feu (ou de produits issus du bois) ce raisonnement subsiste si la forêt est dite bien gérée, quand le prélèvement annuel sera inférieur ou égal à la biomasse produite pendant l'année²⁹, de telle sorte que l'ensemble « combustion+croissance » est au moins équilibré (quand il est en faveur de la croissance végétale, on parle même de puits). Ce CO₂ "biomasse", intégré au cycle carbone des espaces forestiers et agricoles, ne contribue pas à l'effet de serre tant qu'il y a équilibre de ce cycle, c'est-à-dire que la photosynthèse compense les émissions liées à l'exploitation de cette biomasse et à sa combustion.

Cette hypothèse est vérifiée dans le cas des espaces boisés et forestiers en France, puisqu'ils se renouvellent et sont gérés durablement (0,4% d'augmentation annuelle de la surface forestière sur la dernière décennie, +50% d'espaces boisés depuis la fin du XIX^{ème} siècle³⁰). Pour les cultures agricoles, celles-ci étant renouvelées annuellement, le cycle est ici aussi respecté, comme expliqué précédemment.

Comme la fraction organique des biocombustibles n'engendre pas d'émissions de CO₂ à comptabiliser, le facteur d'émission des biocombustibles proviendra :

- des gaz autres que le CO₂ émis lors de la combustion (par exemple du CH₄),
- des émissions de gaz à effet de serre liées à la production du combustible (fabrication des engrais le cas échéant, traitement mécanique ou thermique du produit de la culture ou du bois, etc),
- des émissions de gaz à effet de serre liées au transport du combustible.

Concernant les émissions sur site de CH₄, les calculs montrent que leur impact effet de serre sont négligeables devant les autres sources d'émissions du cycle du combustible (3,2 g / GJ³¹). Ainsi, le contenu équivalent carbone du combustible biomasse se limitera :

- aux émissions de GES liées à la production du combustible,
- aux émissions de GES liées au transport du combustible.

2.3.1.3 Facteurs d'émissions

Les calculs des facteurs d'émission de GES des biocombustibles sont principalement basés sur deux études de l'ADEME dont les résultats sont parus très récemment³².

²⁹ Que les forestiers appellent parfois « l'accru annuel »

³⁰ Source : DGEMP, pages concernant la biomasse du site de l'Observatoire de l'Energie : www.industrie.gouv.fr/energie/sommaire.htm

³¹ Etude ADEME – Bio Intelligence Service / « Bilan Environnemental du chauffage collectif et industriel au bois » / 2005.

³² Etude ADEME – Bio Intelligence Service / « Bilan Environnemental du chauffage collectif et industriel au bois » / 2005.

Et : Note ADEME / « Bilan énergie et effet de serre des filières céréales » / 2006.

2.3.1.3.1 Co-produits et sous-produits valorisés sur site

Cette première catégorie regroupe l'ensemble des co-produits et sous-produits liés à l'activité du site ou au process de l'entreprise et valorisés sur place. On retrouve ici le cas des entreprises du bois et de l'agroalimentaire, générant des écorces, sciures, chutes de bois, déchets végétaux... brûlés en chaudière pour assurer leur propre besoin de chaleur ou vapeur.

Dans le cas de ces filières très courtes de valorisation de produits fatals, le facteur d'émission sera considéré comme nul. Cette hypothèse est cohérente avec les résultats observés dans l'analyse du cas de l'industrie du bois³³.

2.3.1.3.2 Coproduits ou sous-produits faisant l'objet d'une filière d'approvisionnement

La seconde catégorie regroupe les co-produits de process qui ne sont pas valorisés sur site mais transformés et acheminés vers un autre site. Dans ce cas, les opérations de transformation et de transport engendrent des émissions à prendre en compte. Le tableau suivant présente les principaux biocombustibles entrant dans cette catégorie (correspondant aux filières majeures se développant sur le territoire) et leur facteur d'émission :

Définition	Contenu énergétique	Facteur d'émission	Dont phase transformation	Dont phase transport
Ecorces, sciures, broyats de DIB (palettes, cagettes...)	3,3 MWh PCI / tonne à 30% d'humidité	1,2 kgeC / MWh PCI	0,9 kgeC / MWh PCI	0,3 kgeC / MWh PCI
Plaquettes forestières (copeaux de bois issus des rémanents forestiers)	2,8 MWh PCI / tonne à 40% d'humidité	4 kgeC / MWh PCI	3,5 kgeC / MWh PCI	0,5 kgeC / MWh PCI
Paille (tiges de céréales)	4,2 MWh PCI / tonne à 10% d'humidité	14 kgeC / MWh PCI	13,7 kgeC / MWh PCI	0,3 kgeC / MWh PCI

Tableau 18 : Les principaux biocombustibles et leurs facteurs d'émission (ADEME,2005 et ADEME,2006)

Les hypothèses sont détaillées dans les sources bibliographiques, mais nous en rappelons les deux principales :

- Une distance de 50 à 100 km sépare en général le lieu de production de la chaufferie
- Pour la paille, une allocation massique des impacts liés aux phases de cultures a été appliquée.

2.3.1.3.3 Biocombustibles issus de cultures dédiées

Il existe également des biocombustibles qui constituent le produit principal recherché d'une filière (et non un simple sous-produit ou co-produit, généralement fatal, d'une autre

³³ Etude ADEME – Bio Intelligence Service / « Bilan Environnemental du chauffage collectif et industriel au bois » / 2005.

production). C'est le cas des TCR (Taillis à Courtes Rotations), des plantations pluriannuelles de peupliers, de saules ou d'eucalyptus, des cultures de miscanthus, de triticales (variété de céréale rustique) ou de sorghos. Les combustibles (solides) se trouveront sous la forme de grain, de copeaux, de broyats de plantes entières...

En l'absence de détail sur le type de culture dédiée considérée (et notamment de l'itinéraire technique de production agricole ou forestier), on adoptera un facteur d'émission moyen entre le cas « Plaquettes forestières » et « paille » :

Définition	Contenu énergétique	Facteur d'émission	Dont phase transformation	Dont phase transport
Cultures dédiées (TCR, cultures annuelles)	3,3 MWh PCI / tonne à 30% d'humidité	9 kgeC / MWh PCI	8,6 kgeC / MWh PCI	0,4 kgeC / MWh PCI

Tableau 19 : Facteur d'émission des biocombustibles issus de filières dédiées (ADEME,2005)

Ces ordres de grandeurs sont cohérents avec les calculs réalisés par l'ADEME sur le triticale (ADEME, 2006).

2.3.2 Biocarburants

2.3.2.1 Définitions

On appelle « biocarburant » un carburant (liquide) obtenu à partir de matières premières végétales. Actuellement, deux grandes filières industrielles existent :

- les alcools
- les dérivés des huiles végétales

2.3.2.1.1 La filière bioéthanol

Le bioéthanol est produit par fermentation de sucres ou d'amidon, principalement issus, en France, des cultures de betteraves et de céréales. Cet alcool peut être incorporé à l'essence jusqu'à 5 % en volume sans modification technique des moteurs ; jusqu'à 7,5 % s'il est transformé au préalable avec l'isobutène pétrolier en ETBE (éthyl tertio butyl éther), ce dernier étant autorisé jusqu'à 15 %.

Il peut également être utilisé avec des véhicules adaptés - dits « flexibles » - qui permettent l'utilisation normale d'un mélange à 85 % d'éthanol et de 15 % d'essence (E85). En réalité, le taux de mélange entre l'éthanol et l'essence avec ces véhicules est variable, introduisant une souplesse d'approvisionnement en carburant.

2.3.2.1.2 La filière huiles végétales

L'autre filière concerne les huiles végétales issues du pressage des oléagineux (colza principalement et tournesol). Une réaction de transestérification avec du méthanol ou de l'éthanol permet d'obtenir un produit incorporable dans le gazole pour les moteurs Diesel : l'EMHV (l'ester méthylique d'huile végétale). Des variantes en développement permettront d'utiliser de l'éthanol (pour produire de l'EEHV - ester éthylique d'huile végétale) ou

d'estérifier des acides gras d'origine animale. L'incorporation des esters est autorisée dans le gazole jusqu'à 5 % en volume, sans modification des moteurs Diesel actuels, et peut même atteindre 30%. Les esters doivent être conformes à la norme européenne (NF) EN 14214 qui définit leurs spécifications.

2.3.2.2 Facteurs d'émission

2.3.2.2.1 Principe

Comme il n'existe pas de raison particulière de traiter les combustibles d'origine organique de manière différente selon qu'ils sont liquides, solides ou gazeux, nous allons appliquer les mêmes principes que ceux exposés au § 2.3.1.2 pour le calcul des facteurs d'émission. Comme les biocarburants (liquides) utilisés en Europe ne proviennent que de cultures annuelles³⁴, les ACV réalisées tiennent uniquement compte, dans les facteurs d'émission, soit des émissions de méthane ou de protoxyde d'azote, généralement marginales, soit des émissions provenant de la culture et de la transformation et la distribution des produits de culture.

2.3.2.2.2 Valeurs

Les facteurs d'émissions publiés concernant les biocarburants, quoi que restant du même ordre de grandeur, sont susceptibles de varier d'un facteur quatre d'une étude à l'autre³⁵ :

- Carburants issus des filières alcools éthers: de 20 à 80 geCO₂ / MJ
- Carburants issus des filières huiles esters : de 10 à 40 geCO₂ / MJ

Faute de disposer d'une valeur propre au cas de figure analysé, la valeur par défaut sera issue des travaux ADEME – DGEMP – Ecobilan de 2002 (« Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France »), à savoir :

	Facteur d'émission par MJ		Facteur d'émission par kg	
Avant combustion				
Bioéthanol	34 geqCO ₂ / MJ	9,3 geqC / MJ	912 geqCO ₂ / kg	249 geqC / kg
EMHV (colza)	20,2 geqCO ₂ / MJ	5,5 geqC / MJ	755 geqCO ₂ / kg	206 geqC / kg
Après combustion				
Bioéthanol	34 geqCO ₂ / MJ	9,3 geqC / MJ	912 geqCO ₂ / kg	249 geqC / kg
EMHV (colza)	23,7 geqCO ₂ / MJ	6,5 geqC / MJ	888 geqCO ₂ / kg	242 geqC / kg

Tableau 20 : Facteurs d'émission des biocarburants (ADEME - DGEMP, 2002)

On notera que les facteurs avant et après combustion sont distincts pour l'EMHV. En effet, l'EMHV est un produit obtenu par transestérification d'huile végétale et de méthanol, ce dernier étant actuellement obtenu à partir de gaz naturel. L'EMHV contient ainsi une fraction de carbone non organique, libérée à la combustion. Ceci n'est pas le cas du bioéthanol, dont l'ensemble du carbone est d'origine organique.

³⁴ Cette affirmation n'est pas exacte pour les palmiers à huile, qui sont des cultures pérennes, et par ailleurs dans ce dernier cas un problème méthodologique se pose si les palmiers ont été plantés sur une parcelle qui a d'abord du être défrichée (avec en général combustion du bois qui y poussait).

³⁵ source : étude ADEME – BG – EPFL / « Bilan environnemental des filières végétales pour la chimie, les matériaux et l'énergie » / 2004

A partir des valeurs ci-dessus, nous pouvons en tirer les facteurs suivants, discriminant, comme pour les combustibles fossiles, une valeur « avec amont » et une valeur de combustion seule, dite « sans amont » :

	Facteur d'émission par kWh		Facteur d'émission par tonne	
	Sans amont	Avec amont	Sans amont	Avec amont
Bioéthanol	0	33 geC	0	249 kg equ . C
EMHV (colza)	3,6 geC	23 geC	36 kg equ . C	242 kg equ . C

Tableau 21: Facteurs d'émission retenus pour la méthode pour les biocarburants

2.3.2.3 Incorporation systématique dans l'essence et le gazole

Des mesures fiscales incitatives sont mises en place pour une incorporation progressive, par les pétroliers et les distributeurs, de biocarburants dans les carburants conventionnels essence et gazole. Leur consommation pour l'année 2004 correspondait à une incorporation en PCI de 0,42 % pour l'éthanol et de 0,95 % pour les esters. Il est souhaité que cette proportion atteigne 5,75 % en 2008 et 7 % en 2010.

Cette incorporation de biocarburants dans les carburants d'origine fossile conduit ainsi chaque véhicule s'approvisionnant sur le territoire à en consommer un peu, sans modification nécessaire des moteurs.

Cette incorporation d'ETBE et d'EMHV dans les carburants standards ne donne pas lieu à une correction particulière des facteurs d'émission dans le cadre du Bilan Carbone®. En effet, cette mesure est répercutée dans le calcul des facteurs d'émission des carburants essence et gazole déterminés par l'Observatoire de l'Energie et repris ici.

Au delà de cette consommation de biocarburants systématique et transparente pour tout utilisateur, le choix de véhicules spécifiques ou l'adaptation volontaire des moteurs peut permettre une utilisation plus massive de biocarburants. C'est le cas des technologies flexibles (utilisation en proportions variables au cours du temps d'éthanol et d'essence dans un même véhicule) et de l'EMHV pour flotte captive.

Dans le premier cas, il suffit d'appliquer à la fraction éthanol le facteur d'émission de ce dernier, selon la quantité consommée. Cette technologie, déjà commercialisée aux Etats-Unis, au Canada, au Brésil et en Suède, concerne essentiellement les véhicules légers.

Dans le deuxième cas, l'EMHV n'est incorporée qu'à hauteur de quelques % dans le gazole standard. Cette proportion peut cependant atteindre 30% en volume sans modification des systèmes d'injection et de motorisation. Cette incorporation volontaire peut concerner des flottes captives : bus, camions, véhicules utilitaires, trains électriques... L'utilisation d'EMHV en complément du gazole au-delà de 50% nécessite en revanche des adaptations techniques. En pareil cas, il suffit d'appliquer à chaque fraction du combustible (EMHV ou gazole) le facteur d'émission qui lui correspond.

2.4 Electricité

2.4.1 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 lors de sa production.

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. Dans le cas de ces pays, si certains clients qui ont la possibilité de choisir leur fournisseurs savent explicitement d'où provient 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 français changera de manière significative.

En outre, toute augmentation de la consommation électrique qui résulterait d'une substitution entre énergie (électrification par exemple) se traduirait très probablement par une augmentation du contenu en CO₂ du kWh, au vu des moyens de production pouvant être mobilisés rapidement (centrales thermiques principalement). Les contenus CO₂ proposés dans la méthode Bilan Carbone sont donc pertinents pour une évaluation actuelle, mais à utiliser avec précaution pour toute prospective. Dans ce dernier cas, les hypothèses prises pour le facteur d'émission de l'électricité consommée en plus devront être clairement explicitées.

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,
- électricité pour certaines sources renouvelables.

Notons que, sauf pour le § 2.4.5, les facteurs d'émission proposés ci-dessous **ne tiennent pas compte des pertes en ligne**³⁶, ni de l'amortissement des installations pour les producteurs européens (§ 2.4.3).

Par ailleurs, les facteurs d'émission se rapportent aux moyens de production utilisés pour fournir le client, qui ne sont pas nécessairement limités à ceux détenus dans le pays du client. En général il y a un large recouvrement (l'essentiel des kWh fournis par EDF à des clients français viennent bien de centrales françaises) mais cela peut ne pas être le cas, notamment quand un petit producteur français sert aussi de base arrière hexagonale à un producteur étranger bien plus gros.

2.4.2 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 question³⁷.

³⁶ Les pertes en ligne, de la centrale au client final basse tension, sont de l'ordre de 10%

³⁷ 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 !

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 vie³⁸. 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.

Pour l'étranger, les valeurs ont été fournies par le GHG Protocol, lui-même faisant référence à l'Agence Internationale de l'Energie (année de référence : 2004).

Pays	Kg équivalent carbone par kWh, en 2004
Electricité en France	0,023
Electricité en Allemagne	0,141
Electricité en Autriche	0,056
Electricité en Belgique	0,073
Electricité au Danemark	0,091
Electricité en Espagne	0,117
Electricité en Finlande	0,069
Electricité en Grèce	0,222
Electricité en Irlande	0,176
Electricité en Italie	0,139
Electricité au Luxembourg	0,083
Electricité aux Pays-Bas	0,120
Electricité au Portugal	0,137
Electricité au Royaume-Uni	0,124
Electricité en Suède	0,012
Electricité, moyenne européenne	0,096
Electricité aux USA	0,158
Electricité au Japon	0,115

Tableau 22 : Facteurs d'émission de la production d'électricité par pays en 2004³⁹

Enfin, autant les facteurs d'émission, pour un producteur donné, s'il achète ou vend des centrales, sont susceptibles de varier rapidement, autant l'électricité de réseau, reflétant le parc de centrales installées sur le territoire national, a un facteur d'émission variant plus lentement. En effet, 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 2006.

En revanche, 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

³⁸ Source EDF (voir précisions dans l'Annexe 2 de ce document).

³⁹ Ces données ont été publiées par l'AIE (Agence Internationale de l'Energie)

fournir l'électricité dite "de base". Le basculement du charbon sur le gaz est également quelque chose qui peut se produire en l'espace de quelques années.

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 de 15%.

2.4.3 Facteurs d'émission par producteur pour les électriciens européens

PriceWaterhouseCoopers et ENERPRESSE ont publié en 2005 une étude⁴⁰ sur le "contenu en CO₂" des kWh fournis par les principaux électriciens européens pour l'année 2004. 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	g CO2/kWh
Allemagne, EnBW	263
Allemagne, Eon	381
Allemagne, RWE	779
Autriche, Verbund	133
Belgique, Electrabel	327
Danemark, Elsam	436
Danemark, energi E2	678
Danemark, Elsam	436
Espagne, Endesa	507
Espagne, Hidrocantabrio	864
Espagne, Iberdrola	179
Espagne, Union Fenosa	593
Espagne, Viesgo generacion	823
Finlande, Fortum	187
Finlande, PVO	280
France, EDF France	42
France, SNET	985
GB, British Energy	106
GB, Drax	833
GB, EDF Energy	812
GB, Eon UK	719
GB, RWE UK	681
GB, Scottish & Southern	524
Grèce, DEI	1 015
Italie, Endesa Italia	550
Italie, Edison	569
Italie, ENEL	503
Norvège, Statkraft	0
Pays-Bas, Essent	484
Portugal, EDP	475
République Tchèque, CEZ	575
Suède/All, Vattenfall	410

⁴⁰"Changement climatique et électricité. Facteur Carbone européen. Comparaison des émissions de CO₂ des principaux électriciens européens", de PWC et ENERPRESSE, novembre 2005 (données pour année 2004)

Tableau 23 : Facteurs d'émission CO₂/kWh par fournisseur d'électricité européens en 2004 (PWC – ENERPRESSE, 2005)

Dans le tableur Bilan Carbone® figure également le facteur d'émission de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). La CNR produisant son électricité à partir de l'exploitation de centrale hydroélectrique, le contenu CO₂ du kWh qu'elle produit est égal à 0. En effet, comme mentionné précédemment, ne sont pris en compte ici que les émissions dues à la combustion des centrales et les centrales hydroélectriques, par définition, transforment l'énergie hydraulique en énergie électrique et n'ont donc recour à aucune combustion d'énergie.

Il faut cependant noter que 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 les émissions amont liées à la construction des installations de production ne sont également pas prises 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 de l'ordre de 14% et 32% de la production électrique en Europe en 2004⁴¹.

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 § 2.4.2.

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.

2.4.4 Cas des sources renouvelables intermittentes et fatales

2.4.4.1 Généralités

Pour la prise en compte des sources renouvelables de production électrique, la méthode propose des facteurs d'émissions nuls pour les émissions « à la production » - ce qui revient à dire que les émissions d'utilisation de l'énergie primaire sont nulles. Les émissions prises en compte sont celles de l'amont et du périphérique : fabrication, installation, maintenance. Il n'est pas tenu compte de l'intermittence induite dans le réseau, les volumes en cause étant faibles pour l'instant.

Ces facteurs d'émission sont notamment utilisés dans les tableurs Bilan Carbone® destiné aux collectivités locales.

⁴¹ Eurostat / 2005 / Statistiques de l'électricité / Statistiques en bref de mai 2005. Notons que l'éolien représente moins de 0,1% de la fourniture électrique européenne .

2.4.4.2 Eolien

Une ACV récente et exhaustive⁴² propose pour le modèle le plus récent d'aérogénérateur installé sur des sites en Europe du Nord comme facteur d'émission la valeur de 1,3 g équivalent carbone par kWh pour de l'éolien à terre et de 1,4 g pour l'éolien en mer. Etant donné que le facteur d'émission est proportionnel à l'hypothèse faite sur le facteur de charge annuel (c'est-à-dire le nombre d'heures-équivalent où l'éolienne tourne à pleine puissance), nous proposons de retenir avec un coefficient de sécurité suffisant la valeur de 2 g équivalent carbone par kWh, $\pm 50\%$.

2.4.4.3 Photovoltaïque

Une ACV récente et exhaustive⁴³ propose comme facteur d'émission la valeur de 8 à 13 g équivalent carbone par kWh pour un système photovoltaïque complet relié au réseau. Extrapolée aux conditions d'ensoleillement moyen en France elle aboutit à 15 g équivalent carbone par kWh. Cette valeur sera retenue avec une incertitude de 30%

2.4.5 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 site internet⁴⁴. 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 2005 (calculés en analyse de cycle de vie) qui est reproduite ci-dessous.

mois	g équ. CO2/kWh	g équ. C/kWh
janvier 2005	49	13,4
février 2005	73	19,9
mars 2005	69	18,8
avril 2005	52,8	14,4
mai 2005	33,2	9,1
juin 2005	41,3	11,3
juillet 2005	51,7	14,1
août 2005	28,3	7,7
septembre 2005	44,9	12,2
octobre 2005	50	13,6
novembre 2005	55,8	15,2
décembre 2005	71	19,4

Tableau 24: Facteurs d'émission mensuels d'EDF en 2005

⁴² "Life cycle assessment of offshore and offshore sited wind power based on Vestas V90-3.0 MW turbines", Vestas, 2006

⁴³ "Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaic module production", Erik A. Alsema & colleagues, 2005

⁴⁴ www.edf.fr/

Ces facteurs d'émission sont reportés dans le tableur de la méthode Bilan Carbone® 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 23 est inférieure à 10%.

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 propre d'EDF avec une partie de la production des autres producteurs nationaux (SNET, Compagnie Nationale 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.

2.4.6 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 ⁴⁵	2 à 10

Tableau 25 : 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).

⁴⁵ L'électricité d'origine éolienne a représenté, en 2004, 0,03% de l'ensemble de la production électrique. Elle n'intervient donc pas de manière significative dans le calcul du facteur d'émission, même marginal.

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. Ces derniers sont en effet, 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 hydrauliques, 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 affectées uniquement de l'électricité nucléaire ou hydraulique de fleuve, à "contenu en gaz à effet de serre" inférieur à la moyenne.

Des travaux de cette nature, menés à l'ADEME⁴⁶, aboutissent aux facteurs d'émission suivants (ces facteurs d'émission intègrent les pertes en ligne !)

(en gCO₂/kWh)

indicateurs détaillés	Référence (valeur moyenne)	à titre indicatif : plages de variation	indicateurs simplifiés
chauffage+ pompes de circ.	180	129 à 261	180 Chauffage
éclairage résidentiel	116	93 à 151	100 Eclairage
éclairage tertiaire	80	64 à 88	
éclairage publique et industriel	109	85 à 134	
usages résidentiels : cuisson	82	66 à 93	60 Usages intermittents
usages résidentiels : lavage	79	63 à 88	
usages résidentiels : produits bruns	62	50 à 81	
usages tertiaires : autres	52	41 à 77	
usages industriels (hors éclairage)	55	38 à 86	
usages résidentiels : ECS	40	20 à 72	40 Usages "en base"
usages résidentiels : froid	40		
usages résidentiels : autres	39		
usages tertiaires : climatisation	37		
agriculture-transport	38		
autres (BTP, recherche, armée, etc.)	35		

Tableau 26 : Facteurs d'émission du kWh électriques français par usages en gCO₂/kWh (ADEME, 2005)

Ces facteurs d'émission par usage pour l'électricité de réseau française sont notamment utilisés dans le tableur Bilan Carbone® destiné aux collectivités locales.

2.4.7 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.

⁴⁶ Note de Cadrage sur le contenu CO₂ du kWh par usage en France, ADEME, janvier 2005 (cf. annexe 4)

Les valeurs proposées sont alors les suivantes⁴⁷ :

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 27 : 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 § 2.4.5 ci-dessus).

⁴⁷ Ces valeurs sont dérivées des 3 publications d'Olivier Sidler/Enertech (1996, 1999, 2000) mentionnées dans la bibliographie

Les taux d'équipement retenus par défaut correspondent aux moyennes nationales, et les équivalents carbone par kWh retenus sont issus des travaux mentionnés au § 2.4.5 ci-dessus. L'ensemble est rassemblé 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 ⁴⁸	137%	0,039
Magnétoscope ⁴⁹	50%	0,039
Décodeur Canal+ ⁵⁰	20%	0,039
Démodulateur d'antenne parabolique	20%	0,039
HiFi	50%	0,039
Répondeur téléphonique ⁵¹	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 28 : Facteurs d'émission des différents équipements électriques résidentiels

2.4.8 Consommations spécifiques d'électricité pour le tertiaire

Des données publiées par l'ADEME⁵² en 2005 à partir des données du CEREN donnent des consommations d'électricité moyennes, tous usages confondus et usages spécifiques⁵³ pour l'année 2003. Ces données sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Nature activité	Consommation d'électricité spécifique kWh/m ² de local	Consommation d'électricité tous usages kWh/m ² de local
Commerces	126	243
Bureaux	121	283
Enseignement	16	131
Santé	67	221
Cafés Hôtels Restaurants	78	254
Moyenne toutes branches	83	222

⁴⁸ Ce pourcentage supérieur à 100% reflète un taux de multiéquipement de 37%

⁴⁹ Source INSEE, ainsi que pour les chaînes Hi fi

⁵⁰ 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

⁵¹ Estimation personnelle de l'auteur, ainsi que le taux d'équipement des téléphones répondeur, aspirateurs, fers à repasser

⁵² ADEME / 2005 / Les chiffres clés du bâtiment. Energie - Environnement/ Edition 2005 / page 84.

⁵³ On entend par électricité spécifique, l'électricité hors usage chauffage et eau chaude sanitaire

Tableau 29: Consommation électrique moyenne en 2003 par type d'activité (tous usages et usages spécifiques). (ADEME, 2005)

2.4.9 Pertes en ligne de l'électricité

Le transport⁵⁴ et la distribution⁵⁵ 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 y 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 en ligne plus adapté s'ils sont livrés en moyenne tension (un taux de 3% semble alors une estimation raisonnable).

2.4.10 Précautions à prendre dans le cadre des plans d'action

Etant donné le faible facteur d'émission de l'électricité de réseau en France, il sera tentant de considérer, dans les plans d'action, le passage à l'électricité d'usages actuellement assurés par d'autres énergies (exemple : construire un four électrique pour fondre des matériaux à la place d'un four à gaz ; remplacer une chaudière à gaz par un chauffage à l'électricité ; etc). En pareil cas, il sera alors nécessaire de convenir d'un facteur d'émission pour l'électricité supplémentaire que l'entité qui fait son Bilan Carbone va consommer de ce fait. Prendre les facteurs d'émissions actuels par usage, calculés sur une base historique, de l'électricité de réseau pour cette consommation supplémentaire, ce qui peut apparaître comme évident, ne l'est en fait pas tant que cela.

En effet, sauf économies réalisées par ailleurs, au sein de l'entité qui fait son Bilan Carbone ou au sein d'autres entités, une telle action augmentera la consommation d'électricité globale du pays. Se pose alors la question de savoir si les moyens supplémentaires qui seront mis en

⁵⁴ Le transport désigne classiquement le cheminement du courant électrique sur les réseaux à très haute, haute et moyenne tension (au-dessus de 20 kV, environ).

⁵⁵ 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).

œuvre seront émetteurs de CO₂ à l'identique de ce qui se fait actuellement ou pas, dans un contexte de « libéralisation » des marchés de l'énergie.

Il apparaît donc que le choix d'un facteur d'émission nécessite, en toute bonne rigueur, de spéculer sur l'évolution de la consommation globale, et sur les moyens supplémentaires qui seront mis en œuvre si la consommation globale augmente.

En conséquence, la substitution éventuelle d'une énergie fossile par de l'électricité dans le cadre d'un plan d'action qui fait suite à un Bilan Carbone doit s'accompagner d'une réflexion soignée sur les hypothèses légitimes qui peuvent être faites quant à la provenance de l'électricité qui sera demandée en plus grande quantité. Aucune baisse globale des émissions de CO₂ ne pourra être invoquée sans cette précaution.

2.5 Achats de vapeur

2.5.1 Généralités

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 - doivent déclarer leurs émissions dans le cadre de la directive européenne CO₂, ce qui permet 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 2004, qui donne une valeur indicative.

2.5.2 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, et du fioul. La CPCU opère également un incinérateur, au Kremlin Bicêtre, mais le rapport annuel 2004 de cette société indique (p. 22) que cette incinération ne fait pas l'objet d'une valorisation énergétique, et donc que le réseau de vapeur n'est pas alimenté par cette énergie d'incinération des ordures ménagères.

La moyenne d'émission pour l'ensemble des sites producteurs de vapeur s'élève à 308 grammes de CO₂ par kWh produit, soit 84 g équivalent carbone par kWh (page 23 du rapport

annuel 2004). Notons que sur les sites qui ne produisent que de la vapeur, cette moyenne est à 306 grammes de CO₂ par kWh.

Par ailleurs, il ressort des données publiées qu'une tonne de vapeur CPCU contient 756 kWh, de telle sorte qu'une tonne de vapeur CPCU engendre l'émission de 63,5 kg équivalent carbone.

2.5.3 Pertes en ligne de la vapeur

Tout comme c'est le cas pour l'électricité (cf. § 2.4.8), le transport et la distribution de la vapeur, depuis l'installation productrice de vapeur jusqu'au consommateur, occasionnent des pertes par effet Joule. Ces pertes représentent, en moyenne, 10% de la vapeur finale consommée. En d'autres termes, quand le consommateur soutire 1 kWh du réseau, l'appareil de production a dû y 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 d'installation. Si ce facteur d'émission est directement appliqué à la consommation relevée chez le consommateur, les pertes ne sont pas couvertes, alors que la vapeur 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 d'installation pour aboutir à une bonne estimation des émissions réelles.

Toutefois, ce pourcentage de pertes sera nul si le facteur d'émission est donné en pied d'immeuble. Le coefficient de pertes en ligne n'est donc pas à prendre en compte dans ce cas là.

2.6 Cas du chauffage des locaux sans compteur propre

2.6.1 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, notamment si 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 chauffage.

2.6.1.1. Chauffage au fioul

Concernant l'utilisation du fioul, l'Observatoire de l'Energie⁵⁶ publie des informations concernant les consommations totales et les m² totaux, la division est faite ici et permis d'obtenir les résultats suivants :

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

Tableau 30 : Consommation moyenne par m² de fioul pour le chauffage selon la nature d'activité. (Observatoire de l'Energie, 2001)

2.6.1.2. Chauffage au gaz naturel

Concernant l'utilisation du gaz naturel pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, deux études du CEREN (1990 et 2003) permettent d'avoir une indication sur les consommations moyennes par type d'activité comme présentées dans le tableau suivant :

Dépense moyenne en kWh/m ² - Gaz naturel				
Branche	Sous-Branche	Chauffage + ECS	Chauffage	ECS
Bureaux	Ensemble	184	177	7
	<1000m ²	198	191	7
	>=1000m ²	170	163	6
Enseignement	Ensemble	120	108	12
	Primaire	174	157	17
	Secondaire	96	86	9
	Supérieur - Recherche	140	127	14
Santé	Ensemble	174	134	41
	Hôpitaux publics	193	148	45
	Cliniques	152	117	35
	Restant	164	126	38
Commerces	Ensemble	152	142	10
	Grandes surfaces (2)			
	Petits commerces (1)	278	260	18
	Grands commerces (2)			
Cafés Hôtels Restaurants	Ensemble	274	220	54
	Restaurants	304	244	60
	Débites de boisson	218	175	43
	Hôtels	253	203	50

(1) La segmentation "petits commerces" correspond à des établissements de moins de 500 m².

(2) Les valeurs à prendre en compte pour les commerces de grande taille sont en attente des travaux conduits actuellement par PERIFEM.

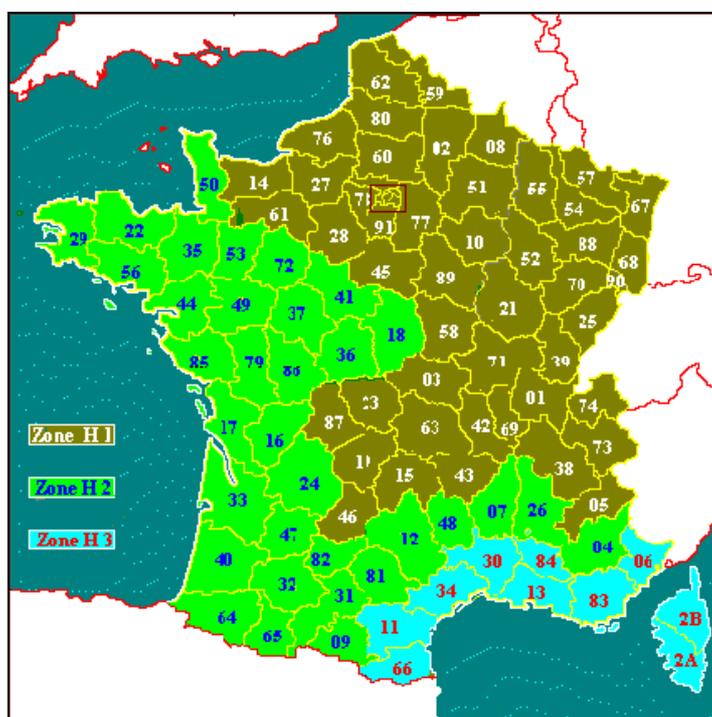
⁵⁶ Observatoire de l'Energie / édition 2001 / Tableaux des consommations d'énergie en France / page 89.

Tableau 31 : Consommation moyenne par m² de gaz naturel pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire selon la nature d'activité. CEREN 1990-2003

2.6.1.3. Prise en compte de la localisation et de la rigueur climatique

Il faut noter que les consommations moyennes d'énergie consacrées au chauffage sont variables selon la localisation du local chauffé. Les indicateurs de consommation d'énergie de référence par branche, proposés ci-dessus, doivent donc être ajustés par un coefficient de localisation géographique qui permettra de refléter la rigueur climatique relative par rapport à la moyenne pour le secteur d'activité considéré.

Les coefficients de correction et les zones associées sont présentés ci-dessous :



Carte 1 : Localisation des zones climatiques

	H1	H2	H3
Coeff_{climat}	1,1	0,9	0,6

Tableau 32 : Coefficient de correction en fonction de la rigueur climatique

Si, au sein d'une zone donnée, l'altitude dépasse 800 mètres, on prendra conventionnellement le coefficient de la zone qui précède. Ainsi, un logement situé à plus de 800 m dans une zone H2 devra être considéré comme étant en zone H1, etc. Les logements situés en zone H1 et à plus de 800 m d'altitude peuvent se voir attribuer un coefficient H1 majoré de 20%

2.6.2 Consommations moyennes du résidentiel

Lorsque la méthode Bilan Carbone® sera appliquée au cas d'une collectivité, il sera nécessaire de disposer d'une estimation des consommations d'énergie liées au chauffage des résidences principales présentes au sein de la collectivité sans accès aux compteurs, avec pour seule donnée de base le nombre de logements, leur type (appartement ou maison), et leur année de construction⁵⁷.

2.6.2.1 Facteurs d'émission par résidence principale pour le chauffage

Les chiffres communiqués à l'Ademe par le CEREN permettent d'aboutir aux valeurs suivantes, discriminées par type d'énergie, et par type de logement⁵⁸ :

Energie finale utilisée et âge du logement	kWh/m2.an - moyenne	superficie moyenne
Gaz naturel, maisons avant 1975	201	105
Gaz naturel, maisons après 1975	166	112
Gaz naturel, appts < 1975, chauff. Cent. collectif	207	66
Gaz naturel, appts > 1975, chauff. Cent. collectif	196	66
Gaz naturel, appts < 1975, chauff. Individuel	146	71
Gaz naturel, appts > 1975, chauff. Individuel	125	71
Fioul, maisons avant 1975	187	119
Fioul, maisons après 1975	171	120
Fioul, appts < 1975, chauff. Cent. collectif	195	71
Fioul, appts > 1975, chauff. Cent. collectif	174	71
Fioul, appts < 1975, chauff. Individuel	172	89
Fioul, appts > 1975, chauff. Individuel	162	88
Charbon, maisons < 1975	290	106
Charbon, maisons > 1975	235	114
Charbon, appts < 1975, chauff centr. Collectif	211	79
Charbon, appts > 1975, chauff centr. Collectif	172	79
GPL, maisons < 1975	139	114
GPL, maisons > 1975	129	116
GPL, appts < 1975	101	87
GPL, appts > 1975	80	86
Chauffage urbain, appartements < 1975	255	71
Chauffage urbain, appartements > 1975	230	70

Tableau 33 : Moyenne française de consommation d'énergie au m² par énergie fossile et par nature de logement, chauffage seul

En d'autres termes, une maison d'avant 1975 chauffée au fioul aura en moyenne une superficie de plancher de 106 m², et consommera en moyenne 290 kWh par m² et par an pour son chauffage.

⁵⁷ Ces informations sont disponibles sur le site de l'INSEE, dans la rubrique « recensement » ; cf. manuel du tableur pour le détail de l'accès aux informations utiles.

⁵⁸ Le terme "logement" est utilisé dans l'ensemble de ce chapitre pour désigner les résidences principales.

La même source (CEREN) permet également de disposer de ces valeurs pour les logements chauffés à l'électricité :

chauffage électrique pour les logements	kWh/m2.an - moy	superficie moyenne
Maisons avant 1975	150	96
Maisons après 1975	106	110
Appartements avant 1975	98	49
Appartements après 1975	65	53

Tableau 34 : Moyenne française de consommation d'énergie au m² par nature de logement, chauffage électrique

Les consommations beaucoup plus faibles (2 fois inférieures, voire plus) des logements chauffés à l'électricité, par rapport au gaz ou au fioul, s'expliquent par la 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 d'un peu plus de 50% en moyenne⁵⁹ : 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 quasiment 100% dans le radiateur,
- le chauffage électrique ne concerne que des installations individuelles (pas de chauffage collectif des immeubles avec une chaudière électrique), qui sont d'une manière générale plus économes que les chauffages collectifs (voir tableau 32 ci-dessus), notamment parce qu'il n'est pas nécessaire de surchauffer certaines parties de l'immeuble pour assurer une température de confort dans les parties les plus froides ou les plus mal isolées,
- le prix au kWh de l'électricité est nettement supérieur à celui du gaz, et donc les consommateurs sont plus attentifs à leur consommation.

2.6.2.2 Facteurs d'émission par résidence principale pour l'eau chaude sanitaire

La même source (CEREN) permettent d'aboutir aux valeurs suivantes, discriminées par type d'énergie, et par type de logement, pour l'énergie fossile :

Nature de logement et type d'énergie finale	kWh/an en moyenne
Gaz naturel, maisons avant 1975	1 668
Gaz naturel, maisons après 1975	1 944
Gaz naturel, appts < 1975	1 640
Gaz naturel, appts > 1975	1 792

⁵⁹ Conversation avec André Pouget, Pouget Consultants, mai 2004

Fioul, maisons avant 1975	2 672
Fioul, maisons après 1975	3 120
Fioul, appts < 1975	1 935
Fioul, appts > 1975	1 918
GPL, maisons < 1975	2 384
GPL, maisons > 1975	2 918
GPL, appts < 1975	1 642
GPL, appts > 1975	1 700
Chauffage urbain, appartements < 1975	2 379
Chauffage urbain, appartements > 1975	2 436

Tableau 35 : Moyenne française de consommation d'énergie par énergie fossile et par nature de logement, eau chaude sanitaire seule

En d'autres termes, un appartement d'après 1975 utilisant le gaz comme énergie pour son eau chaude sanitaire consommera en moyenne 1.792 kWh par an pour son eau chaude sanitaire.

Enfin les données de même nature concernant l'électricité sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

ECS électrique pour les logements	kWh/an en moyenne
Maisons avant 1975	1 629
Maisons après 1975	1 633
Appartements avant 1975	1 110
Appartements après 1975	1 302

Tableau 36 : Moyenne française de consommation d'énergie par nature de logement, eau chaude sanitaire électrique

2.6.2.3 Proportion de chaque énergie dans le chauffage des résidences principales

L'exploitation de statistiques du CEREN⁶⁰ permet d'aboutir aux données suivantes concernant l'utilisation des diverses énergies de chauffage par les logements⁶¹ :

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 37 : 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.

⁶⁰ Suivi du parc et des consommations de l'année 2002, CEREN

⁶¹ Indicateurs de développement durable, Jancovici pour IFEN, 2004

2.6.2.4 Proportion de chaque énergie dans l'eau chaude sanitaire des résidences principales

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

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

3 - Prise en compte des émissions ne provenant pas de l'usage de l'énergie

Ce chapitre est destiné à prendre en compte et à définir les facteurs d'émissions liées, d'une part à des réactions chimiques qui n'ont pas pour objet de produire de l'énergie et d'autre part, aux fuites de différents gaz..

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 GIEC⁶², 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'air⁶³.

⁶² GIEC signifie Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. L'abréviation anglaise est IPCC, pour International Panel on Climate Change. Source : IPCC / 2001 / Climate change 2001 – 3rd assessment report.

⁶³ Très souvent de l'ordre du siècle

Gaz	Kg équivalent carbone par kg de gaz ⁶⁴
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	1 036
HFC – 152a	38,2
HFC – 227ea	791
HFC – 23	2 673
HFC – 236fa	1 718
HFC – 245ca	153
HFC – 32	177
HFC – 41	40,9
HFC – 43 – 10mee	355
Perfluorobutane	1 909
Perfluoromethane	1 309
Perfluoropropane	1 909
Perfluoropentane	2 045
Perfluorocyclobutane	2 373
Perfluoroethane	2 509
Perfluorohexane	2 018
R11	1255
R12	2891
R134a	355
R22	464
R401a	307
R404a	1 032
R407c	451
R408a	822
R410a	539
R502	1232
R507	1050
SF ₆	6 518

Tableau 39 : Facteurs d'émissions non énergétiques (procédés et fuites)

Il faut noter que les GES mentionnés dans le tableau ci-dessus, malgré leur fort PRG, ne sont pas tous pris en compte par le Protocole de Kyoto, notamment les fluides frigorigènes suivants : R11, R12, R502, R22, R401a et R408a. Il en est tenu compte dans les agrégations des résultats dans le tableau Bilan Carbone®.

D'autre part, les CFC sont interdits par règlement communautaire dans les équipements neufs depuis 2000 et interdits à des fins de maintenance et d'entretien d'installations frigorifiques depuis 2001. Cependant, ils subsistent encore des installations qui fonctionnent avec ces fluides en France. De leur côté, les HCFC sont déjà interdits dans les équipements neufs depuis 2004, mais la maintenance reste autorisée avec des produits vierges jusqu'en 2010 et

⁶⁴ L'équivalent carbone valant le PRG multiplié par 12/44, seuls les 3 premiers chiffres significatifs du résultat ont été conservés.

des produits recyclés jusqu'en 2015. De ce fait, les facteurs d'émissions de ces gaz restent intégrés dans le tableur Bilan Carbone®.

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).

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 GIEC⁶⁵ a indiqué que, sous nos latitudes, 1,25% de l'azote épandu va se volatiliser en moyenne⁶⁶. 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 total⁶⁷. 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. Toutefois, ces 10% d'azote volatilisés sous forme de NH₃ occasionnent des retombées atmosphériques sous forme de N₂O, de l'ordre de 1%⁶⁸, qui doivent être prises en compte.

Outre l'épandage et les retombées atmosphériques précitées, un autre phénomène est à prendre en compte⁶⁹ : il s'agit du lessivage de l'azote dans les sols, estimé à 30% de l'azote épandu, engendrant des émissions sous forme de N₂O pour 2,5 % de cette quantité.

De la sorte, le pourcentage de l'azote contenu dans l'engrais qui donne naissance à du N₂O est de : $(0,9 \times 1,25\%) + (0,3 \times 2,5\%) + (0,1 \times 1\%) = 1,975 \%$ d'azote par rapport à la quantité totale épandue.

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 $\frac{2 \cdot 14 + 16}{2 \cdot 14}$, ou encore 44/28.

⁶⁵ GIEC signifie Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. L'abréviation anglaise est IPCC, pour International Panel on Climate Change.

⁶⁶ IPCC / 1996 / **Guidelines** for national greenhouse gas inventories - reference manual.

⁶⁷ Échange avec Sébastien Beguier, CITEPA, décembre 2002

⁶⁸ Source : IPCC 1997 & méthodologie utilisée par le CITEPA pour les inventaires nationaux

⁶⁹ Source : IPCC 1997 & méthodologie utilisée par le CITEPA pour les inventaires nationaux

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

$$\text{Poids de N}_2\text{O émis} = (\text{Poids de l'azote épandu}) \times 1,975\% \times (44/28)$$

Ou encore :

$$\text{Poids de N}_2\text{O émis} = 3,1\% \times (\text{poids de l'azote épandu})$$

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 3,1%. Compte tenu des fortes variations possibles d'un champ à un autre, le facteur d'incertitude attaché est de 70%. Des mesures locales permettent parfois 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 (HFC, CFC, HCFC) sont de puissants gaz à effet de serre, de telle sorte que, même émis en quantités minimes, ils peuvent représenter une fraction significative du total des émissions de gaz à effet de serre pour un site donné.

3.3.1 Froid commercial

Deux approches sont retenues pour le froid commercial : une approche par type d'équipement et une approche par taille de surface de vente.

La distribution de froid aux procédés et équipements utilisateurs peut être directe ou indirecte. Dans les **systèmes directs**, le fluide frigorigène refroidit directement les équipements. Dans les **systèmes indirects**, le fluide frigorigène refroidit un fluide intermédiaire appelé frigoporteur qui assure le transfert du froid par un circuit frigoporteur vers les équipements concernés. Ces systèmes permettent de limiter la charge en frigorigène et par conséquent, les fuites. Ils sont encore assez peu diffusés (seuls 10% des magasins ouverts en 2001 utilisent un système indirect).

Le froid positif regroupe les applications en température positive ; le froid négatif, celles en température négative.

Les meubles autonomes correspondent à des équipements qui se trouvent généralement dans les commerces de proximité et qui sont de petits appareils de réfrigération.

Le tableau ci-après⁷⁰ donne, pour chaque type d'installation, la charge de fluide (en kg/kWh frigo), le taux de fuites annuelles et les émissions en fin de vie.

⁷⁰ Source : ADEME -ARMINES / Aout 1999/ Inventaire des émissions de HFC utilisés comme fluides frigorigènes.



Système, niveau de température et âge de l'installation	Charge (kg/kW frigo)	Taux de fuites annuelles	Emissions fin de vie
Meubles autonomes (groupe logé)	0.3	0.5%	30%
Froid positif, système direct (> 3 ans)	2	30%	50%
Froid positif, système direct (< 3 ans)	2	15%	50%
Froid positif, système indirect (> 3 ans)	0.8	30%	50%
Froid positif, système indirect (< 3 ans)	0.8	15%	50%
Froid négatif (> 3 ans)	3.5	30%	50%
Froid négatif (< 3 ans)	3.5	15%	50%

Tableau 40 : Caractéristiques du froid commercial - Approche par les types d'équipements (ADEME-ARMINES, 1999)

L'âge de l'installation correspond soit à son âge si elle n'a pas été rénovée, soit à la date de dernière rénovation.

Le tableau ci-après⁷¹ donne les caractéristiques à retenir en fonction de la surface de vente.

Type de surface et taille	Charge (kg/m ² de vente)	Taux de fuites annuelles	Emissions fin de vie
magasin de proximité (120 à 400 m ²)	0.65	10%	50%
supermarché système direct (400 à 2 500 m ²)	0.29	15%	
hypermarché système direct (2 500 à 15 000 m ²)	0.27	25%	
toutes surfaces systèmes indirects (frigoporteur)	0.12	10%	

Tableau 41 : Caractéristiques du froid commercial - Approche par les surfaces de vente (ADEME-ARMINES, 2001)

3.3.2 Froid industriel

3.3.2.1 Industrie agroalimentaire

Le tableau ci-dessous⁷² donne la charge de fluide rapportée à la puissance frigorifique, suivant le système de froid utilisé, ainsi que les taux de fuites et d'émissions en fin de vie.

Système	kg de fluide par kW frigo	Taux de fuites annuel	Emissions en fin de vie
Système direct, température moyenne (réfrigération)	5.5	15%	50%
Système direct, température basse (surgélation)	8.8	15%	50%
Système indirect, température moyenne (réfrigération)	1	15%	50%
Système indirect, température basse (surgélation)	1.5	15%	50%

Tableau 42 : Caractéristiques du froid industriel pour l'agroalimentaire (ADEME-ARMINES, 2003)

⁷¹ Source : ADEME -ARMINES / 2001/ Inventaire et prévisions des fluides frigorigènes et de leurs émissions / Méthodes d'inventaires / p16-19-22-23.

⁷² Source : ADEME -ARMINES / 2003. / Inventaire et prévisions des fluides frigorigènes et de leurs émissions / Méthodes d'inventaires / p35.

Les **tanks à lait** font l'objet d'une description à part⁷³ :

Tanks à lait	kg de fluide par m ³ de stockage	Taux de fuites annuel	Emissions en fin de vie
	2.09	5%	50%

Tableau 43 : Caractéristiques des tanks à lait

L'incertitude choisie pour les facteurs d'émissions concernant l'industrie agroalimentaire est de 50% car les calculs se sont affinés par rapport à la précédente version de ce document.

3.3.2.2 Autres industries

Les groupes de refroidisseurs d'eau ou groupes de production d'eau glacée (températures positives) sont des systèmes classiques identiques à ceux proposés dans le secteur du froid tertiaire (climatisation, conditionnement d'air).

Le tableau ci-dessous⁷⁴ donne la charge de fluide rapportée à la puissance frigorifique, suivant le système de froid utilisé, ainsi que les taux de fuites et d'émissions en fin de vie pour ces systèmes.

Température positive (groupes refroidisseurs d'eau – production d'eau glacée)	kg de fluide par kW frigo	Taux de fuites annuel	Emissions en fin de vie
Type d'équipement			
Compresseur centrifuge rénové, tout mode de condensation	0.3	15%	20%
Compresseur centrifuge neuf ou compresseur volumétrique, condenseur à eau	0.2	10%	20% (40% sur compresseur volumétrique de petite ou moyenne puissance)
Compresseur centrifuge neuf ou compresseur volumétrique, condenseur à air	0.25	10%	20% (40% sur compresseur volumétrique de petite ou moyenne puissance)

Tableau 44 : Caractéristiques du froid industriel – Systèmes à température positive (ADEME-ARMINES, 2001)

Une agrégation regroupant les "groupes de production d'eau glacée / climatisation" est possible. Elle "moyenne" les valeurs ci-dessus et correspond donc aux résultats suivants : 0.25 kg/kW frigo, 15% de fuites annuelles, 30% en fin de vie.

Le tableau ci-après⁷⁵ donne la charge de fluide rapportée à la puissance frigorifique, suivant le système de froid utilisé, ainsi que les taux de fuites et d'émissions en fin de vie pour les systèmes à température négative.

⁷³ Source : ADEME - ARMINES / 2003 / p35

⁷⁴ Source : ADEME - ARMINES / 2001 / p43

⁷⁵ Source : ADEME - ARMINES / 2003 / p37-38.

Température négative	kg de fluide par kW frigo	Taux de fuites annuel	Emissions en fin de vie
moyenne	1	15%	50%
basse	1.6	15%	50%

Tableau 45 : Caractéristiques du froid industriel – Systèmes à température négative (ADEME-ARMINES, 2003)

Comme pour l'industrie agroalimentaire, l'incertitude retenue est de 50%.

3.3.2.3 Moyenne toutes industries

Dans le cas où les détails ne seraient pas connus, on peut utiliser le chiffre proposé dans le tableau suivant⁷⁶, qui est une moyenne sur les industries agroalimentaires.

Système	kg de fluide par kW frigo	Taux de fuites annuel	Emissions en fin de vie
"moyenne" groupe froid	2.6	15%	50%

Tableau 46 : Caractéristiques moyennes à utiliser lorsque le système froid n'est pas connu

L'incertitude est alors de 80%.

3.3.3 Froid tertiaire (climatisation)

Pour les grands groupes de climatisation, utilisant l'eau glacée, les chiffres sont les mêmes que pour la production d'eau glacée (autres industries). Les mêmes simplifications sont apportées. Pour les climatisations refroidissant directement l'air (climatisation à air) sans circuit frigoporteur, une ligne est ajoutée⁷⁷.

	kg de fluide par kW frigo	Taux de fuites annuel	Emissions en fin de vie
Eau glacée / climatisation	0.25	15%	30%
Climatisation à air	0.3	3.5%	90%

Tableau 47 : Caractéristiques du froid tertiaire (climatisation)

L'incertitude choisie est de 50%.

Avec les informations correspondants au système de froid étudié, ainsi que les durées de vie des installations (qui peuvent se retrouver), l'utilitaire « Clim_froid » proposé en complément du tableur Bilan Carbone® permet de reconstituer des émissions approximatives de fluides frigorigènes, aussi bien pendant l'utilisation du système que lors de sa fin de vie⁷⁸.

⁷⁶ Source : ADEME - ARMINES / 2002 / p39.

⁷⁷ Source : ADEME - ARMINES / Aout 1999

⁷⁸ Pour plus de détails, se référer à l'annexe 2 du Manuel d'utilisation du tableur Bilan Carbone.xls (version juin 2006).

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 cas évoqués ci-dessus, la méthode Bilan Carbone® ne propose pas de module standard permettant de convertir des données commodément accessibles dans toute entreprise ou activité pour calculer ou estimer des émissions de GES.

4- Prise en compte des transports

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

- du gaz carbonique provenant de la combustion des carburants (pétrole, gaz, GPL, etc.),
- des fuites liées à la climatisation le cas échéant, qui engendrent des émissions d'halocarbures (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).

Mis à part les problèmes de fuites de fluide de climatisation, le reste des émissions est la conséquence directe de l'emploi de carburants. Les émissions des transports sont donc une conséquence, dans un contexte particulier, de l'utilisation d'énergies fossiles. Toutefois les émissions de gaz à effet de serre d'un engin de transport sont fortement variables selon les cas de figure. La prédiction des émissions engendrées dépend à la fois de caractéristiques pouvant donner lieu à mesure (puissance du moteur et combustible utilisé, ou encore taux de remplissage), 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, dès que cela est possible, de l'amortissement des véhicules.

Remarque : les facteurs d'émission des carburants fossiles qui ont été donnés au chapitre §2 sont pour une large part issus d'une circulaire ministérielle récente, rédigée dans le cadre de la transposition de la directive « permis d'émission ». Cette circulaire propose des facteurs d'émission pour les combustibles (solides, liquides ou gazeux) qui diffèrent de quelques % de ceux qui étaient en vigueur dans la version précédente n°3 du Bilan Carbone. Dans un souci d'harmonisation, nous avons repris les valeurs de cette circulaire dans le présent guide, pour éviter toute hésitation quant à la valeur à employer (la différence reste inférieure à l'incertitude sur les facteurs).

Par contre, ces facteurs des combustibles ne sont pas ceux qui ont été utilisés pour le calcul des facteurs d'émission des transports qui vont être décrits ci-après. Ces derniers ont été mis au point avec les facteurs d'émission des combustibles en vigueur dans la version n°3, et n'ont pas été modifiés dans cette version, faute de temps. Il en résulte probablement une différence de quelques %, en ordre de grandeur, avec les facteurs pour les transports qui seraient obtenus en prenant en compte les valeurs ci-dessous, soit moins que l'incertitude sur les facteurs des transports. Cela ne gêne en rien l'approche par les ordres de grandeur, et l'harmonisation sera effectuée pour la prochaine version.

4.1 Transport routier de personnes

Remarque : les rubriques ne sont pas traitées ici dans l'ordre des différents manuels d'utilisation des tableurs maîtres Bilan Carbone. Ici les facteurs d'émission sont décrits par moyen de transport, alors que dans les manuels ce sont les lieux de destination qui servent de trame.

4.1.1 Voitures particulières

4.1.1.1 Amortissement des voitures particulières

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 ⁷⁹	Electricité en France ⁸⁰
Tep	38 000	462 000	119 000	1 390 000

Tableau 48 : Consommations énergétiques en France pour l'activité de construction des véhicules terrestres (1999)

Toutefois, les véhicules circulant en France ont été construits, pour une large part, ailleurs en Europe. La supposition que tous les véhicules circulant en France ont été fabriqués avec de l'électricité à faible contenu en carbone serait donc infondée. En revanche, 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.

⁷⁹ Il s'agit pour l'essentiel de fioul lourd

⁸⁰ L'équivalence ici est de 0,222 tep par MWh

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. A 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 ⁸¹	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 49 : Facteurs d'émissions pour l'activité de construction des véhicules terrestres

Par ailleurs le nombre de voitures particulières produites sur le sol français (c'est-à-dire dans des sites situés en France, qui sont les seuls qui figurent dans les statistiques de consommation de l'Observatoire de l'Energie) était de 3,4 millions en 2001. L'écart de la consommation d'énergie du 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 voitures particulières étant prépondérantes dans le total de l'activité, nous supposons qu'un ordre de grandeur acceptable sera fourni en assimilant toute l'activité du secteur à la seule construction automobile.

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

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

Pour tenir compte de la contribution des équipementiers, qui sont à l'origine de plus de la moitié de la valeur ajoutée de la filière, nous allons forfaitairement multiplier par 2 les émissions estimées ci-dessus pour la partie finale de la construction de véhicules (ce qui fait donc passer de 350 à 700 kg équivalent carbone par voiture). Il resterait toutefois à savoir si 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.

⁸¹ L'équivalence ici est de 0,222 tep par MWh et 106 g équ. C par kWh électrique (source IEA).

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

- selon l'IFP⁸², 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'APME⁸³, 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'IRSID⁸⁴, une voiture contient en moyenne 50% d'acier, que nous supposons issu à 66% d'acier recyclé (cette estimation demanderait à être confirmée).

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

	Plastique	Aluminium	Verre	Acier ⁸⁵	Caoutchouc	Liquides	Autres ⁸⁶	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 50 : 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 information.

Compte tenu d'une "durée de vie" des voitures qui est de l'ordre de 150.000 à 200.000 km, les émissions de fabrication 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.

⁸² Echanges avec Stéphane HIS, IFP, octobre 2003

⁸³ APME : Association of Plastic Manufacturers (l'information a été trouvée sur le site web www.apme.org)

⁸⁴ IRSID : Institut de Recherche de la Sidérurgie

⁸⁵ L'acier utilisé par le secteur automobile est à 60% de l'acier recyclé, ce qui amène à une valeur de 500 kg équ. C par tonne d'acier pour son contenu en GES (voir § 5.1)

⁸⁶ 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

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 voitures particulières

Les consommations de référence sont un recours lorsqu'il n'est pas possible d'accéder directement aux achats de carburant des véhicules employés⁸⁷.

Des données disponibles auprès de l'Observatoire de l'Energie 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 en suivant des cycles de roulages conventionnels :

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

Toutefois, 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 cycles de roulages conventionnels et consommations réelles varie selon la puissance administrative du véhicule (cf. § 4.1.1.2.3), sans qu'il soit possible de proposer une règle valable quel que soit le véhicule considéré (le supplément constaté en utilisation réelle par rapport aux cycles de roulage conventionnels 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 propriétaire⁸⁸. 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 § 2.2.3,
- y ajouter les émissions moyennes de construction d'un véhicule, réparties sur le kilométrage total parcouru par le véhicule sur sa durée de vie.

⁸⁷ 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 !

⁸⁸ Observatoire de l'Energie / édition 2001 / Tableaux des consommations d'énergie en France.

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 pour un véhicule diesel.

Ces valeurs ont été obtenues en utilisant le poids moyen par puissance administrative pour les véhicules neufs vendus en 2001⁸⁹ et le parc de véhicules en circulation au 31 décembre 2001⁹⁰. Même en sachant que les véhicules se sont un peu alourdis au fil des ans, un écart de 10% sur le poids moyen par véhicule modifie les émissions globales (fabrication + carburant) de 1 gramme équivalent carbone par km, soit moins de 2% de la valeur totale obtenue.

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

Avec ces hypothèses, nous aboutissons aux valeurs suivantes :

Zone de résidence	Consommation moyenne des véhicules essence (litres aux 100)	Emissions de construction (g C/km)	Soit g équ. C/km au total	Ecart à la moyenne
Communes < 2.000 hab.	7,8	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 51 : Emissions, 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 52 : Emissions, 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).

⁸⁹ Source ADEME

⁹⁰ Source Ministère de l'Équipement, des Logements et du Transport, Service Économique et Statistique

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 53 : 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.

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

4.1.1.2.3 Emissions approchées par type de carburant et puissance administrative

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'énergie⁹¹.

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 54 : 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 49 et 50), 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,
- les consommations pour les cycles de roulages conventionnels 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 (elles sont associées aux cycles de roulages conventionnels), et pour un ensemble certes important (plus de 2 millions de véhicules), mais partiel, puisqu'il s'agit des seuls véhicules vendus en 2001 (un peu moins de 8% du parc).

⁹¹ La puissance administrative est définie à partir de la puissance réelle et des émissions de CO₂ qui correspondent à un facteur près à la consommation d'énergie.

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

A partir de ces données nous allons donc :

- effectuer la moyenne, par puissance administrative, des consommations associées aux cycles de roulages conventionnels pour les véhicules neufs vendus en 2001 (avec les données ADEME),
- en déduire une moyenne par tranches de puissances administratives et type de carburant, les tranches étant celles utilisées par l'Observatoire de l'Energie,
- rapprocher cette moyenne des consommations réelles du parc existant, pour voir combien il faut rajouter aux moyennes calculées avec les cycles de roulages conventionnels et sur les seuls véhicules neufs pour obtenir la consommation réelle des véhicules de la catégorie fournie par l'Observatoire de l'Energie. La consommation réelle de référence concernera un parcours mixte, qui est supposé se rapprocher le plus de la réalité⁹².

Par exemple les consommations associées aux cycles de roulages conventionnels 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 55 : Consommations associées aux cycles de roulage conventionnels des véhicules essence pour des puissances administratives de 3 à 5 CV fiscaux.

⁹² 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 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 (UTAC⁹³), soit 6,1 litres aux 100, à la consommation réelle mesurée, soit 7,2 litres aux 100 km, il faut rajouter 17%.

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

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

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

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

Les divers tableaux ainsi obtenus se trouvent en annexe 8 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'INRETS⁹⁴, la distance moyenne au travail⁹⁵ 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 en province,
- 15 km environ s'il réside en 2^{ème} couronne parisienne.

⁹³ UTAC : Union Technique de l'Automobile, du Motocycle et du Cycle

⁹⁴ INRETS : Institut National de recherche sur les Transports et leur Sécurité

⁹⁵ J.-P. Orfeuil, La Jaune et La Rouge, avril 1998

Par ailleurs une étude de l'INSEE⁹⁶ 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 56 : Distance moyenne domicile-travail en fonction du parcours.

Sur cette base, nous supposons 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.

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. 2.2.3) et celui de l'essence est de 18% (même paragraphe).

⁹⁶ INSEE : Institut National de Statistiques et des Etudes Economiques

Il nous reste à formuler une dernière hypothèse : que la moyenne "France entière" des émissions au km, pour les déplacements domicile-travail, est la même que celle pour la 2^{ème} couronne parisienne. Compte tenu du fait que 80% de la population 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, mort.	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 57 : 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 type extra - urbain pour se rendre au travail,
- un salarié habitant en banlieue de ville de province ou en 2^{ème} couronne parisienne fera un parcours de type mixte pour se rendre au travail,
- un salarié habitant en banlieue parisienne proche fera un parcours de type urbain pour se rendre au travail,
- un salarié habitant dans Paris fera un parcours de type urbain+bouchons (nous rajoutons alors 10% aux émissions "urbaines") pour se rendre au travail.

Par ailleurs, à partir des tableaux figurant en annexe 8, 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 ⁹⁷
Emissions par km parcouru, en grammes équivalent carbone	58	69	87	96

Tableau 58 : facteurs d'émission domicile travail en fonction du type de parcours effectué par km.

⁹⁷ 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 !

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 8.

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.

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.

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

Pour les Bilan Carbone « territoire », il sera nécessaire de disposer de valeurs de référence concernant le nombre de véhicule.km par personne et par an en moyenne sur une zone donnée. Ces données « par défaut » seront aussi proposées pour les autres modes de transport dans le cas où aucune information spécifique au territoire ne serait disponible.

L'enquête transports de l'INSEE⁹⁸ propose les moyennes nationales suivantes :

⁹⁸ INSEE Enquêtes Transports 1993-1994

	Zones rurales ou ZPIU ⁹⁹ de moins de 50 000 hab	ZPIU de 50 000 à 300 000 hab		ZPIU de plus de 300 000 hab			ZPIU de Paris		Ensemble
		Ville centre ¹⁰⁰	Banlieue et périphérie	Ville centre	Banlieue	Périphérie	Paris	Banlieue et périphérie	
Nbre de déplacements quotidiens par personne	2,73	3,06	2,87	2,93	2,84	2,57	2,74	2,71	2,83
Distance moyenne par déplacement (en km)	9,70	6,96	9,23	7,06	7,73	10,14	6,16	9,19	8,61
Total	26,47	21,27	26,50	20,67	21,97	26,08	16,89	24,93	24,37
Répartition modale en %									
Marche à pied	12,37	20,59	12,73	23,41	14,29	12,71	30,64	19,41	16,57
Transports collectifs	2,80	4,86	4,29	11,83	7,26	4,13	35,11	13,90	7,74
Voitures	79,94	70,90	77,31	61,21	73,14	77,33	32,09	62,94	71,03
Deux roues	4,64	3,56	5,34	3,54	5,24	5,67	2,01	3,57	4,47
Autres	0,24	0,10	0,33	0,00	0,07	0,16	0,14	0,17	0,19

Tableau 59 : distances parcourues et répartition modale pour les déplacements quotidiens

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

Faute de données plus récentes, nous avons conservé cette distance, sachant que la hausse constatée ces dernières années porte probablement plus sur le nombre de véhicules en circulation, leur masse et leur puissance, que sur le kilométrage annuel moyen par personne. Les données des Comptes des Transports permettent certes de constater des hausses sur les voy-km (+18%) entre 1994 et 2004, mais l'effet parc en explique l'essentiel : ce dernier a augmenté de plus de 20% sur la même période¹⁰¹.

Pour en déduire les kilométrages effectués par les véhicules, il restera à diviser cette distance par le taux moyen d'occupation d'une voiture, qui est de 1,25 personne en moyenne dans le cadre des déplacements en ville¹⁰².

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

⁹⁹ ZPIU signifie **zones de peuplement industriel ou urbain** et permet de qualifier le tissu urbain et la taille de l'agglomération en tenant notamment compte du niveau des migrations quotidiennes. Dans le présent document, on confondra cette notion avec celle de taille d'agglomération

¹⁰⁰ Une ville-centre d'unité urbaine multicomcommunale (ou d'agglomération multicomcommunale) est définie comme suit. Si une commune abrite plus de 50% de la population de l'unité urbaine, elle est seule ville-centre. Sinon, toutes les communes qui ont une population supérieure à 50% de la commune la plus peuplée, ainsi que cette dernière, sont villes-centres. Les communes urbaines qui ne sont pas villes-centres constituent la banlieue de l'agglomération multicomcommunale.

¹⁰¹ Tableaux des consommations d'énergie, Observatoire de l'Énergie, 2004 CCFA, 2005

¹⁰² Source : SES - Service Economie et Statistique du Ministère Equipement, Transports

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

Dans le cadre des Bilan Carbone « territoire », il sera également nécessaire d'évaluer les déplacements longue distance en voiture des résidents (loisirs, famille, éventuellement courses ou motifs professionnels). Pour cela nous allons également exploiter une enquête transports de l'INSEE, d'où sont tirés les résultats suivants :

déplacements en millions de voyageurs*km selon le mode principal	déplts locaux 1993	autres déplts courts 1993	longue distance 1993
bicyclette	78	2	0
cyclomoteur	45	0	0
moto	48	1	14
VP ménage conducteur	4645	499	1483
VP ménage passager	1422	77	964
VP hors ménage	1110	105	463
bus, car	451	35	230
transport ferrés locaux (métro, tram, val)	231	9	0
trains (y compris ter)	240	9	366
tgv	0	0	281
avion	0	0	1472
autres	28	8	144
total	8299	446	5415

Tableau 60 : répartition des déplacements totaux par mode en 1993

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

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

Tableau 61 : kilométrages parcourus par personne et par an en France en 1993

Le kilométrage effectué en VP conducteur par personne et par an s'assimilera, pour le Bilan Carbone, au nombre de km.véhicule de voiture engendré par personne et par an au titre de cette mobilité.

Il nous reste à évaluer le % d'augmentation de ce kilométrage depuis 1993. Il s'avère que le nombre de voyageurs.km a augmenté de 18 % entre 1994 et 2004¹⁰³, mais le parc en circulation a augmenté de 20%. En première approximation, nous conserverons donc, pour 2005, la distance parcourue par véhicule et par an en moyenne nationale pour 1993.

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

¹⁰³ Commission des Comptes des transports de la Nation (à partir de DAEI/SESp - UTP - RATP - SNCF - DAC)

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 une voiture 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 commun¹⁰⁴ 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 62 : Facteurs d'émission de la fabrication des minibus, autobus urbains et autocars interurbains.

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

4.1.2.2 Emissions par véhicule.km

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

¹⁰⁴ Sites de constructeurs : www.heuliezbus.com, www.volvo.com, www.scania.com, www.renault.fr ; site relatifs aux transports en commun : www.vmcv.ch, busparisiens.free.fr

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

Tableau 63 : Facteurs d'émission par voyageur.km pour différents types d'autobus (ADEME, 2002)

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

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

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 64 : Facteurs d'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 65 : Facteurs d'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 carburant¹⁰⁵, 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-retour¹⁰⁶, 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).

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 § 4.1.4).

¹⁰⁵ Source : ADEME

¹⁰⁶ Source INRETS

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

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

	Zones rurales ou ZPIU ¹⁰⁷ de moins de 50 000 hab	ZPIU de 50 000 à 300 000 hab		ZPIU de plus de 300 000 hab			ZPIU de Paris		Ensemble
		Ville centre ¹⁰⁸	Banlieue et périphérie	Ville centre	Banlieue	Périphérie	Paris	Banlieue et périphérie	
Nbre de déplacements quotidiens par personne	2,73	3,06	2,87	2,93	2,84	2,57	2,74	2,71	2,83
Distance moyenne par déplacement (en km)	9,70	6,96	9,23	7,06	7,73	10,14	6,16	9,19	8,61
Total	26,47	21,27	26,50	20,67	21,97	26,08	16,89	24,93	24,37
Répartition modale en %									
Transports collectifs	2,80	4,86	4,29	11,83	7,26	4,13	35,11	13,90	7,74

Tableau 66 : distance annuelle moyenne parcourue par Français en 1993 et part des transports collectifs

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

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

Tableau 67 : distance annuelle moyenne parcourue en transport collectif par Français en 1993

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

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

¹⁰⁷ ZPIU signifie **zones de peuplement industriel ou urbain**, et permet de qualifier le tissu urbain et la taille de l'agglomération en tenant notamment compte du niveau des migrations quotidiennes. Dans le présent document, on confondra cette notion avec celle de taille d'agglomération

¹⁰⁸ Une ville-centre d'unité urbaine multicomcommunale (ou d'agglomération multicomcommunale) est définie comme suit. Si une commune abrite plus de 50% de la population de l'unité urbaine, elle est seule ville-centre. Sinon, toutes les communes qui ont une population supérieure à 50% de la commune la plus peuplée, ainsi que cette dernière, sont villes-centres. Les communes urbaines qui ne sont pas villes-centres constituent la banlieue de l'agglomération multicomcommunale.

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

Tableau 68 : kilométrages hebdomadaires totaux par mode, 1993

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

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

Tableau 69 : kilomètres effectués par personne et par an selon le mode, 1993

Faute de disposer de chiffres plus récents, nous retiendrons ceux-ci, qui indiquent notamment que, en moyenne nationale, le fer (local + TER) et le bus sont à peu près à égalité de parts modales dans les TC pour les déplacements courts. Par ailleurs, ces valeurs indiquent aussi que le TER et les transports ferrés locaux sont aussi à égalité, ce qui fait que, en première approximation, nous considérerons, sauf pour Paris, que par défaut le fer et la route sont à égalité dans les transports en commun quelle que soit la zone. Par contre, pour Paris, les parts modales du fer (métro/RER) et du bus sont de 66% et 33% respectivement (source RATP), pourcentages qui seront retenus pour cette agglomération.

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

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

Tableau 70 : kilomètres effectués par personne et par an selon le mode, pour les transports collectifs

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

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

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

Tableau 71 : kilomètres effectués par personne et par an en longue distance selon le mode

Il faudrait ensuite intégrer un % d'augmentation du kilométrage que chaque personne parcourt en bus et car depuis 1993, sachant que le nombre total de voyageurs.km a augmenté de 3% entre 1994 et 2004¹⁰⁹. Faute de données sur l'évolution du nombre de voyages, nous conservons cette valeur pour cette version du guide des facteurs, soit 211 km en bus et car par personne et par an en moyenne nationale.

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

4.1.3 Deux-roues

4.1.3.1 Amortissement et émissions amont des deux-roues

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

Par ailleurs, nous pouvons noter que pour les petites voitures le supplément lié à la fabrication du véhicule (par rapport aux émissions d'utilisation en cycle mixte) est un peu inférieur à 30%, ainsi qu'il ressort des deux tableaux 179 et 182 (annexe 8), dont nous reproduisons une portion ci-dessous :

¹⁰⁹ Commission des Comptes des transports de la Nation (à partir de DAEI/SESp – UTP – RATP – SNCF – DAC)

Puissance administrative (CV fiscaux)	Part de la fabrication, g équ. C/km	Emissions liées à la consommation (grammes équ. C/km), selon le type de parcours			Supplément pour la fabrication du véhicule par rapport aux émissions d'utilisation		
		Extra-urbain	Mixte	Urbain	Extra-urbain	Mixte	Urbain
3	10,8	37,2	42,7	52,5	29%	25%	21%
4	11,0	42,8	50,5	64,4	26%	22%	17%
5	10,8	46,7	57,0	75,0	23%	19%	14%

Extrait du tableau situé en annexe 8 concernant les facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux essence

Puissance administrative (CV fiscaux)	Part de la fabrication, g équ. C/km	Emissions liées à la consommation (grammes équ. C/km), selon le type de parcours			Supplément pour la fabrication du véhicule par rapport aux émissions d'utilisation		
		Extra-urbain	Mixte	Urbain	Extra-urbain	Mixte	Urbain
3	9,2	29,5	32,4	37,1	31%	28%	25%
4	11,5	37,9	45,3	58,4	30%	25%	20%
5	11,2	43,7	53,0	69,3	26%	21%	16%

Extrait du tableau situé en annexe 8 concernant les facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux diesel

On peut ainsi remarquer que plus les voitures sont petites, plus la part des émissions liées à la fabrication a tendance à augmenter. En extrapolant cette observation, nous pouvons raisonnablement supposer que la part des émissions liées à la fabrication des 2 roues est supérieure à celle des plus petites puissances fiscales des voitures, soit de l'ordre de 30% des émissions liées à la combustion.

Les émissions amont liées à l'extraction, au transport et au raffinage du carburant utilisé (essence), sont équivalentes à 17% des émissions de combustion. (cf. § 2.2.3.2 Emissions amont des combustibles liquides)

4.1.3.2 Emissions par véhicule.km liées à la combustion

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

	Kg eqC / voy.km		Kg eqC / veh.km	
	Urbain	Interurbain	Urbain	Interurbain
Cyclomoteurs	0.018		0.018	
Motocycles < 125 cm ³	0.028	0.029	0.029	0.031
Motocycles > ou = 125 cm ³	0.033	0.031	0.033	0.033
Taux d'occupation moyen			1.02	1.07

Tableau 72 : Facteurs d'émission des deux-roues liés à la combustion (ADEME, 2002)

Dans le tableur Bilan Carbone®, nous avons choisi de retenir les facteurs d'émission liés aux déplacements urbains et uniquement pour les véhicule-km. En effet, les facteurs d'émissions des déplacements urbain et interurbains ne sont pas significativement différents et le faible taux d'occupation laisse sous-entendre que les deux roues sont majoritairement utilisés par une seule personne.

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

4.1.4 RER, métro et tramways

4.1.4.1 Facteur d'émission

Sachant qu'un passager.km en train correspond à l'émission de 2,6 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 2,6 (g équ. C/passager.km) = 17 kg équivalent carbone par an.

Un travail en cours avec la RATP permettra, pour les § 4.1.2 et 4.1.4 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.

4.1.4.2 Kilométrages effectués au titre de la mobilité quotidienne

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

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

4.2 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 PTAC¹¹⁰ 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 soient sommables, il faut bien entendu que les poids moyens à vide soient disponibles pour les mêmes classes de PTAC que les consommations.

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

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

	Classe de PTAC
Camionnettes	< 1,5 tonnes
	1,5 à 2,5 tonnes
	2,51 à 3,5 tonnes
	3,5 tonnes
Camions	3,51t à 5 tonnes
	5,1 à 6 tonnes
	6,1 à 10,9 tonnes
	11 à 19 tonnes
	19,1 à 21 tonnes
	21,1 à 32,6 tonnes
	tracteurs routiers (PTAC tracteur + remorque : 44 t en général).

Tableau 73 : Classes de PTAC pour les camionnettes et les camions.

¹¹⁰ PTAC : Poids Total Autorisé en Charge

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 7). 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 64, 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 7.

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 Transports¹¹¹

- 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
2,51 à 3,5 tonnes	2,90	1,70	1,20
3,5 tonnes	3,50	2,10	1,40
3,51 à 5 tonnes	4,74	2,37	2,37
5,1 à 6 tonnes	5,67	2,84	2,84
6,1 à 10,9 tonnes	8,80	4,11	4,69
11 à 19 tonnes	16,32	6,53	9,79
19,1 à 21 tonnes	19,37	7,75	11,62
21,1 à 32,6 tonnes	26,87	10,21	16,66
tracteurs routiers	40,00	15,00	25,00

Tableau 74 : Caractéristiques PTAC

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

Classe de PTAC	Durée de vie en km ¹¹²
< 1,5 t essence	150 000
< 1,5 t diesel	200 000
1,5 à 2,5 tonnes essence	150 000
1,5 à 2,5 tonnes diesel	200 000
2,51 à 3,5 tonnes essence	200 000
2,51 à 3,5 tonnes diesel	250 000
3,5 tonnes	300 000
3,51 à 5 tonnes	300 000
5,1 à 6 tonnes	300 000
6,1 à 10,9 tonnes	380 000
11 à 19 tonnes	480 000
19,1 à 21 tonnes	550 000
21,1 à 32,6 tonnes	650 000
tracteurs routiers	750 000

Tableau 75 : Durée de vie moyenne des véhicules en km en fonction de la classe de PTAC

¹¹¹ L'Utilisation des véhicules utilitaires légers en 2000 - Ministère des Transports/SES

¹¹² 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.

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).

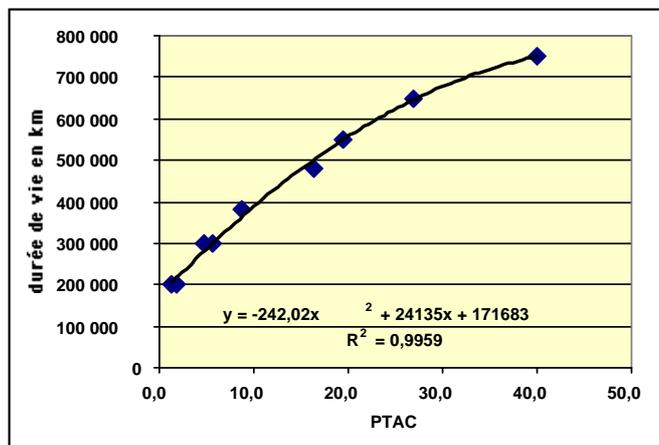


Figure 1 : Corrélation entre la durée de vie et le PTAC des camions et camionnettes.

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
2,51 à 3,5 tonnes essence	2,90	1,70	200 000	12,8
2,51 à 3,5 tonnes diesel	2,90	1,70	250 000	10,2
3,5 tonnes	3,50	2,10	300 000	10,5
3,51 à 5 tonnes	4,74	2,37	300 000	11,9
5,1 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
21,1 à 32,6 tonnes	26,87	10,21	650 000	23,6
tracteurs routiers	40,00	15,00	750 000	30,0

Tableau 76 : 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. En effet, si une société possède sa propre flotte il est évident qu'elle a les moyens de connaître les consommations qui s'y rapportent, même si elle ne comptabilise que des factures de carburant. La présente méthode étant destinée à proposer des facteurs d'émission à des entités qui n'ont pas les moyens de connaître les consommations de carburant, il paraît raisonnable de considérer que c'est le transport pour le compte d'autrui qui sera concerné de manière quasi-exclusive.

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 ¹¹³	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
2,51 à 3,5 tonnes essence	16,7	123,4

¹¹³Il s'agit d'une moyenne tous types de propriétaires confondus jusqu'à 5 tonnes de PTAC et des seules consommations 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.

2,51 à 3,5 tonnes diesel	10,8	87,9
3,5 tonnes	12,4	100,9
3,51 à 5 tonnes	18,5	150,6
5,1 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
21,1 à 32,6 tonnes	42,8	348,4
tracteurs routiers	37,1	302,0

Tableau 77 : Facteurs d'émission de la consommation des véhicules par km et par classe de PTAC

Ces consommations découlant d'observations sur un échantillon (c'est comme cela que les chiffres sont établis par le Ministère), la source d'incertitude est la représentativité de l'échantillon pris par rapport au parc réellement en service. Ce biais est probablement faible, et nous l'avons estimé à 5% de manière forfaitaire. 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 § 2.2.3 (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-après :

Classe de PTAC	Litres aux 100 km ¹¹⁴	G équ. C par km	Incertaine sur consommation	Fabrication g équ. C/km	Incertaine sur fabrication	Soit g par véhicule.km	Incertaine 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%
2,51 à 3,5 t essence	16,7	123,4	5%	12,8	70%	136,2	11%
2,51 à 3,5 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%
3,51 à 5 t	18,5	150,6	5%	11,9	70%	162,4	10%
5,1 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%
21,1 à 32,6 tonnes	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 78 : 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.

¹¹⁴ Même remarque que ci-dessus (et même source).

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

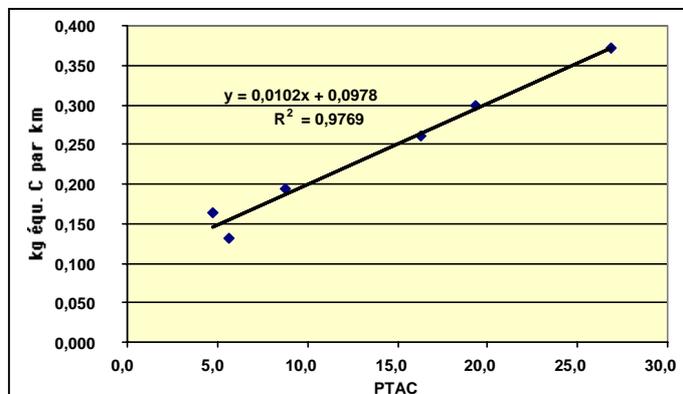


Figure 2 : Corrélation entre le PTAC et les émissions par véhicule.km

Il existe une exception : la consommation des véhicules de 3,51 à 6 tonnes semble aberrante¹¹⁵, 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.

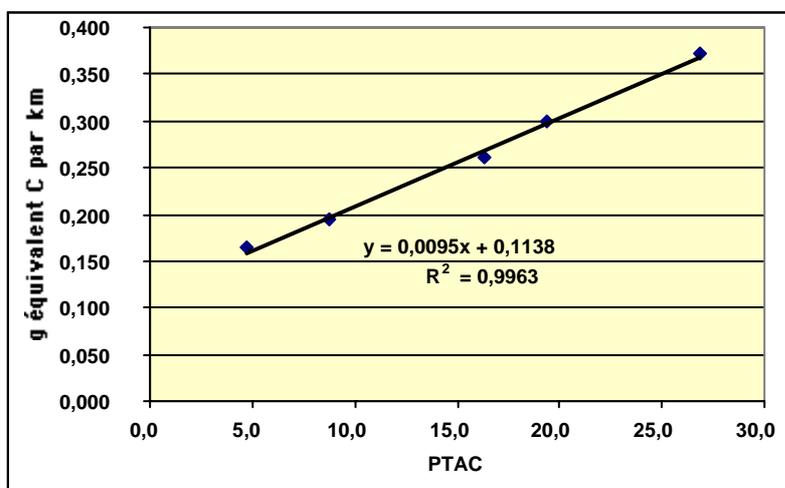


Figure 3 : Corrélation entre le PTAC et les émissions moyennes par véhicule.km pour les véhicules particuliers

¹¹⁵ 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 camions¹¹⁶, 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 Bilan Carbone® et son emploi préconisé dès lors que le PTAC exact du véhicule qui sert à acheminer des produits ou des matières premières particuliers est connu sans que la consommation du véhicule ne le soit.

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 Raisonnement

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 transportée¹¹⁷.

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 taux de remplissage moyen T_{rm} sur la partie du trajet qui est faite en charge.

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

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

¹¹⁶ Christophe RIZET et Basile KEÏTA / INRETS / novembre 2000 / Choix logistiques des entreprises et consommation d'énergie / page 33.

¹¹⁷ C'est ainsi qu'elle est modélisée dans la méthodologie du programme Copert III

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

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

De la sorte nous parvenons à la formule

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

Qui peut encore s'écrire :

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

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

En fait, c'est l'inverse que nous allons faire : les chiffres mentionnés au § 4.2.2 sont basés sur des véhicules en utilisation réelle, c'est-à-dire qu'ils réalisent une partie de leurs trajets à vide, et le reste avec une charge 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 pourrions 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 III¹¹⁸, qui stipule :

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

Nous pouvons donc écrire que :

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

La formule énoncée plus haut pour calculer E_v :

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

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

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

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

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

PTAC	Taux de distance à vide (T_{dv}) ¹¹⁹	Charge utile maximale	Tonnage moyen par véhicule (T_m) ¹²⁰	Taux de remplissage moyen (T_{rm}) ¹²¹
< 1,5 t essence	20,0%	0,40	0,12	30%
< 1,5 t diesel	20,0%	0,40	0,12	30%
1,5 à 2,5 t essence	20,0%	0,70	0,21	30%
1,5 à 2,5 t diesel	20,0%	0,70	0,21	30%
2,51 à 3,5 t essence	20,0%	1,20	0,36	30%
2,51 à 3,5 t diesel	20,0%	1,20	0,36	30%
3,5 t	20,0%	1,40	0,42	30%
3,51t à 5 t	20,0%	2,37	0,71	30%
5,1 à 6 t	20,0%	2,84	0,85	30%
6,1 à 10,9 t	19,0%	4,69	1,65	35%
11 à 19 t	17,8%	9,79	4,24	43%
19,1 à 21 t	15,0%	11,62	4,93	42%
21,1 à 32,6 tonnes	29,9%	16,66	8,27	50%
tracteurs routiers	21,1%	25,00	14,31	57%

Tableau 79 : Caractéristique du transport de marchandises en fonction de la classe de PTAC.

¹¹⁸ nov 2000 - voir toutes les informations sur Internet : vergina.eng.auth.gr/mech/lat/copert/copert.htm

¹¹⁹ Ministère chargé du transport, DAEI-SES, Utilisation des véhicules de TRM, année 2001 (transport pour compte d'autrui)

¹²⁰ Exploitation du fichier SITRAM-TRM année 2000 (global comptes propre et d'autrui)

¹²¹ Celui-ci correspond au tonnage moyen par véhicule (T_m) divisé par la charge utile maximale (CU).

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

$$T_{rm} = T_m \div CU$$

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

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
2,51 à 3,5 t essence	0,123	0,123	1,20
2,51 à 3,5 t diesel	0,088	0,088	1,20
3,5 t	0,101	0,101	1,40
3,51 à 5 t	0,136	0,196	2,37
de 5,1 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
21,1 à 32,6 tonnes	0,302	0,435	16,66
tracteurs routiers	0,252	0,363	25,00

Tableau 80 : 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 taux de remplissage moyen.

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

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

Pour les entreprises qui ne les connaissent pas, les valeurs du tableau 68 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 :

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

E_{fab} désigne ici les émissions de fabrication rapportées au km, suivant les calculs du § 4.2.2. La formule complète est celle qui sert aux calculs dans le tableur, de telle sorte que le facteur d'émission applicable varie automatiquement en fonction des informations disponibles, à savoir les taux de distance à vide et de remplissage en charge.

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

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

Dans ce cas de figure, les informations commodément accessibles dans l'entité qui fait son Bilan Carbone® seront les poids des marchandises expédiées, et les distances, reconstituées d'après le point de départ et celui d'arrivée. Afin de proposer une solution simple pour utiliser ces informations pour déterminer les émissions, l'ADEME a fait réaliser une étude spécifique. Cette étude a abouti à l'élaboration d'un utilitaire dit « fret-route-tkm »¹²² (fourni en complément du tableur du Bilan Carbone®) qui permet de calculer l'éclatement des tonnes.kilomètre par type de véhicules pour l'ensemble des marchandises transportées.

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

¹²² Toutes les informations concernant cet utilitaire sont précisées dans le "Manuel d'utilisation du tableur Bilan Carbone.xls".

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 :

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

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

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

Nous aboutissons alors à :

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

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

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
2,51 à 3,5 t essence	472,8
2,51 à 3,5 t diesel	340,7
3,5 t	331,7
3,51 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 81 : 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. Différents sites internet proposent un calcul exact de ces distances entre une commune d'origine et de destination, n'importe où en Europe dont notamment les sites www.infotrafic.com, www.mappy.fr et www.viamichelin.fr.

4.2.7 Tonnes.km par habitant et par région

Il pourra être utile, dans le cadre de la version « territoire » du Bilan Carbone, de disposer des tonnes.km expédiées ou reçues par habitant, selon la région.

4.2.7.1 Tonnes.km expédiées par habitant et par région

Les statistiques du Ministère de l'Équipement (Source : MTETM/SESP, enquête TRM 2004) fournissent des millions de tonnes.km chargées et déchargées par région et par classe de PTAC. A partir de ces données, il suffit de diviser par la population de la région pour aboutir aux valeurs suivantes (les données sont séparées dans deux tableaux pour de simples raisons de place) :

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

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

Tableau 82 : t.km expédiées par la route par habitant et par an selon la région

4.2.7.1 Tonnes.km réceptionnées par habitant et par région

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

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

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

Tableau 83 : t.km réceptionnées par la route par habitant et par an selon la région

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 serre¹²³. 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'Airbus¹²⁴ et de Boeing en octobre 2002 (voir annexe 9).

4.3.1 Consommations par passager.km

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

- les rayons d'action (autonomies maximales avec seulement des passagers),
- le nombre de sièges par classe. .

¹²³ 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.

¹²⁴ www.airbus.com

Les configurations présentées sont les configurations "de référence", figurant sur la documentation constructeur.

Avion	Carburant max. (litres)	Rayon d'action ¹²⁵ (km)	Sièges 2nde	Sièges Affaire	Sièges 1ère	Total sièges	Equivalent 2nde ¹²⁶
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 84 : 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).

¹²⁵ Il s'agit du rayon d'action maximal avec la capacité d'emport maximale de passagers, sans fret.

¹²⁶ 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.

Enfin les avions émettent certes du CO₂, dont la prise en compte est facile avec les facteurs d'émission pour les carburants, calculés au § 2.2.3, mais ils émettent aussi d'autres gaz à effet de serre : vapeur d'eau¹²⁷, 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 GIEC¹²⁸).

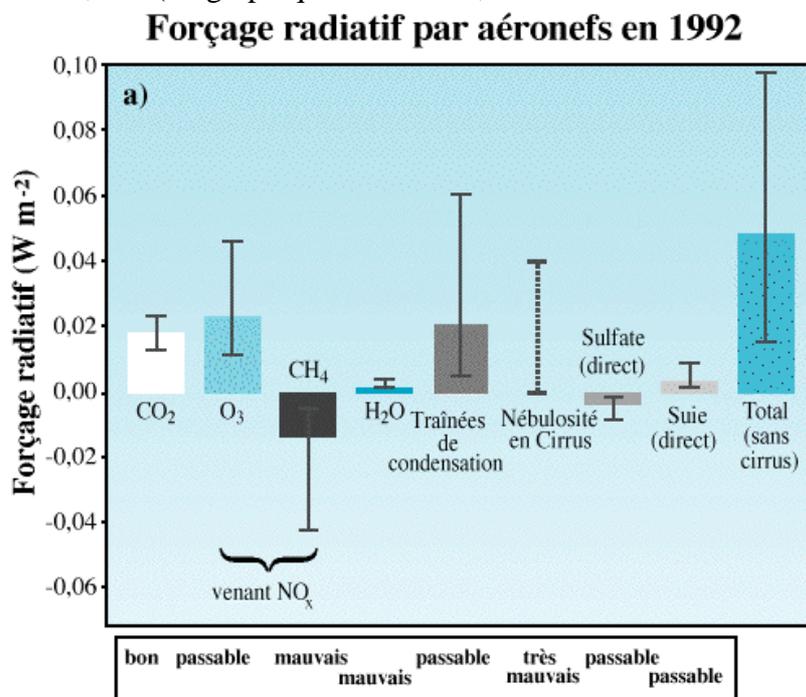


Figure 4 : Forçage radiatif par avions en 1992.

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

Il est facile de voir que les gaz "mineurs" et la vapeur d'eau 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) :

¹²⁷ 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

¹²⁸ GIEC / 1999 / L'aviation et l'atmosphère planétaire, résumé à l'intention des décideurs

	Avion	Autonomie avec tous sièges occupés (km)	G équ. C par pass.km en 2 ^{de}	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 ¹²⁹	11 019	59	-	-	59	

Tableau 85 : 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%. Toutefois, si nous prenons les deux avions les plus couramment employés en long courrier (B 747 et A 340-600), on remarque que les deux valeurs sont très proches, de l'ordre de 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 courts courriers, il importe de se rappeler que :

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

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

- 80 g équ. C par passager.km pour un passager de court courrier en 2^{de},
- 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^{de},
- 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.

¹²⁹ Une seule 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) en km	Kg équ. C par tonne.km ¹³⁰
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 86 : 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.

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 :

¹³⁰ 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

Catégorie	Avion	Carburant max (litres)	Autonomie (pour la charge emportée) en km	Fret (tonnes)	Kg équ. C par tonne.km ¹³¹
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 87 : 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 Kg eqC/t.km
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 88 : 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.

Valeur moyenne retenue pour les moyens-courriers :		0,570 Kg eqC/t.km
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 89 : 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.

¹³¹ Ces chiffres tiennent compte des émissions amont pour le kérosène mentionnées au § 2.2.3

Valeur moyenne retenue pour les long-courriers :		0,320 Kg eqC/t.km
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 90 : 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

4.3.3.1 Cas général

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).

4.3.3.2 kilométrages effectués au titre de la mobilité longue distance

Par défaut, en cas de manque d'information spécifique au territoire, la distance parcourue par personne et par an en avion sera déduite des mêmes informations que celles exposées au § 4.1.2.4, et que nous reproduisons ci-dessous pour la part aérienne :

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

Tableau 91 : km par personne et par an effectués en avion en 1993

Par ailleurs, les statistiques disponibles donnent les indications suivantes :

- une stagnation du trafic intérieur entre 1994 et 2004 (source Compte des Transport en 2004),
- une augmentation de 80 à 90% des passagers transportés (et non des voy-km) entre 1995 et 2005 pour les vols internationaux au départ de la métropole.

Enfin 80 millions de passagers ont emprunté un aéroport français en 2005, soit, en première approximation, 40 millions dans chaque sens, avec :

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

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

	millions de passagers	distance moyenne	distance totale million de km
Asie	7	5 000	35 000
EUROPE	50	500	25 000
AFRIQUE	13	3 000	39 000
Amérique	10	6 500	65 000
Total	80	2 050	164 000

Tableau 92 : distance moyenne par passager en avion

La distance moyenne par passager apparaît donc aux alentours de 2000 km. Par ailleurs, si nous supposons que 50% de ces passagers sont français, alors il en ressort une distance moyenne par Français, pour les vols longue distance, de $2000 \times 40 / 60 = 1360$ km.

De ce fait, nous conserverons en première approche les 1352 km de l'enquête transports.

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 primaire¹³² 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 de voyageurs en France

Les données ont été obtenues auprès de la Direction de la stratégie de la SNCF qui, à partir de ses statistiques internes, a évalué les efficacités énergétiques de ses différents modes de transport de voyageurs (Train Rapide National – TRN -, Train à Grande Vitesse – TGV -, Train Express Régional – TER -) et de traction (diesel et électrique).

Pour obtenir les facteurs d'émissions correspondant à chacun de ces modes nous avons associées les efficacités énergétiques (kep¹³³/voyageur.kilomètre) calculées par la SNCF aux facteurs d'émission du gazole (voir § 2.2.3) et de l'électricité (voir § 2.4.5). Nous obtenons les résultats suivants :

VOYAGEURS	émissions moyennes (kg eqC/voyageur.km)		
	électricité	diesel	global
total voyageurs	0.0009	0.0252	0.0026
TGV - <i>Train à Grande Vitesse</i>	0.0007	-	0.0007
TRN - <i>Train Rapide National</i>	0.0008	0.0246	0.0035
TER - <i>Train Express Régional</i>	0.0014	0.0259	0.0102
Train Ile-de-France	0.0013	0.0181	0.0015

Tableau 93 : Facteurs d'émission par voyageur.km pour les déplacements en train en France

¹³² L'énergie primaire est celle qui est utilisée dans la centrale

¹³³ kep : Kilo équivalent pétrole

Ainsi, un passager-km correspond à 2,6 g équivalent carbone en moyenne en France (hors émissions de fabrication du train). L'importante différence entre le facteur d'émission du TGV et celui du TER est due à la fortes diésélisation du parc des trains régionaux et à l'origine de l'électricité utilisée par les TGV. Ces données tiennent également compte des taux moyens d'occupation.

Notons que ces chiffres sont légèrement différents de ceux publiés par l'ADEME en décembre 2002¹³⁴, (2,8 g équivalent carbone par passager.km en moyenne). Cette différence est due à la désagrégation des données SNCF mentionnées ci-dessus et à leur traitement afin de mettre en évidence les émissions à imputer au trafic urbain et celles à imputer au trafic interurbain de voyageurs.

4.4.2.2 Train de voyageurs en Europe

L'étude de l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC) sur les effets externes, communément appelée "étude INFRAS-IWW", a fait l'objet d'une actualisation en octobre 2004¹³⁵ avec pour année de référence 2000. Cette étude permet d'établir des facteurs d'émission pour le transport ferroviaire de voyageurs de différents pays européens.

Pays	Grammes équivalent carbone par voyageur.km
Allemagne	18,2
Autriche	6,4
Belgique	13,2
Danemark	31,1
Espagne	14,0
Finlande	12,3
Grèce	18,1
Irlande	10,6
Italie	8,7
Luxembourg	10,8
Norvège	10,9
Pays bas	20,8
Portugal	16,8
Royaume Uni	20,4
Suède	3,5
Suisse	1,0
Moyenne Europe (EU-17)	12.0

Tableau 94 : Facteurs d'émission par voyageur.km pour les déplacements en train à l'étranger (UIC – INFRAS - IWW, 2004)

¹³⁴ ADEME, Explicit / 2002 / Evaluations des efficacités énergétiques et environnementales des transports en 2000.

¹³⁵ UIC, INFRAS-IWW / Octobre 2004 / External costs of transport.

4.4.2.3 kilométrages effectués au titre de la mobilité longue distance

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

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

Tableau 95 : millions de voyageurs*km par semaine de déplacement longue distance en mode ferré

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

Km par personne et par an, moyenne	longue distance 1993
trains (y compris ter)	336
tgv	258
total	594

Tableau 96 : distance moyenne par personne et par an en longue distance en mode ferré

Enfin le nombre total de voyageurs.km a augmenté de 25% entre 1994 et 2004¹³⁶, alors que dans le même temps la population française augmentait de 5%. Or, une partie de ces km sont le fait de visiteurs étrangers (qui ne contribuent pas à la distance moyenne par résident français), cela amène à retenir, en première approximation, une hausse de 15% des kilométrages parcourus, soit 683 km par personne et par an en moyenne.

4.4.3 Fret

4.4.3.1 Train de fret en France

La source est la même qu'au § 4.4.2.1. Une tonne.km en France correspond à 2,0 g équivalent carbone. Ce chiffre tient aussi compte de la manière dont le pays produit son électricité, du taux de remplissage moyen du train, et de la proportion du parc de locomotives qui fonctionne au diesel.

FRET	Emissions moyennes (kg eqC/tonne.km)		
	électricité	diesel	global
Total fret	0,0005	0,015	0,0020
Train entier	0,0004	-	0,0020
Transport combiné	0,0005	0,012	0,0007
Reste fret	0,0008	0,022	0,0034

Tableau 97 : Facteurs d'émission par tonne.km pour le fret ferroviaire en France

¹³⁶ Commission des Comptes des transports de la Nation (à partir de DAEI/SESp - UTP - RATP - SNCF - DAC)

4.4.3.2 Train de fret en Europe

La même source qu'au 4.4.2.5. (étude INFRAS-IWW) a été utilisée. Les chiffres sont les suivants :

	kg eq C / tonnes.km
Allemagne	0,0087
Autriche	0.0034
Belgique	0.0051
Danemark	0.0103
Espagne	0.0094
Finlande	0.0055
Grèce	0.0121
Irlande	0.0159
Italie	0.0079
Luxembourg	0.0069
Norvège	0.0022
Pays-Bas	0.0083
Portugal	0.0121
Royaume-Uni	0.0112
Suède	0.0012
Suisse	0.0010
Moyenne Europe (EU-17)	0.0062

Tableau 98 : Facteurs d'émission par tonne.km pour le fret en train à l'étranger (UIC – INFRAS - IWW, 2004)

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 99 : 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 concernant qu'une catégorie d'acteurs bien spécifiques (les compagnies pétrolières), nous n'avons pas cherché à calculer de facteurs d'émission pour ces bateaux. Cette catégorie de navires n'est donc pas répertoriée dans le tableur Bilan Carbone®.
- les porte-conteneurs,
- les cargos classiques,
- les navires rouliers, c'est-à-dire des bateaux sur lesquels les marchandises sont "sur roues" : on y embarque directement des remorques de camions, des voitures, des engins militaires...
- les ferries, purement passagers ou mixtes (rouliers).

4.5.2.1 Cas des porte-conteneurs

Les porte-conteneurs sont des bateaux qui chargent des marchandises déjà regroupées 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 deux consommations d'énergie journalières :

- celle pour la force motrice, nécessairement uniquement lors des sorties en mer,
- celle pour les besoins énergétiques autres que la traction (électricité, chauffage de l'équipage, etc.), qui entraînent des consommations aussi bien en mer qu'au port.

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 100 : 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.

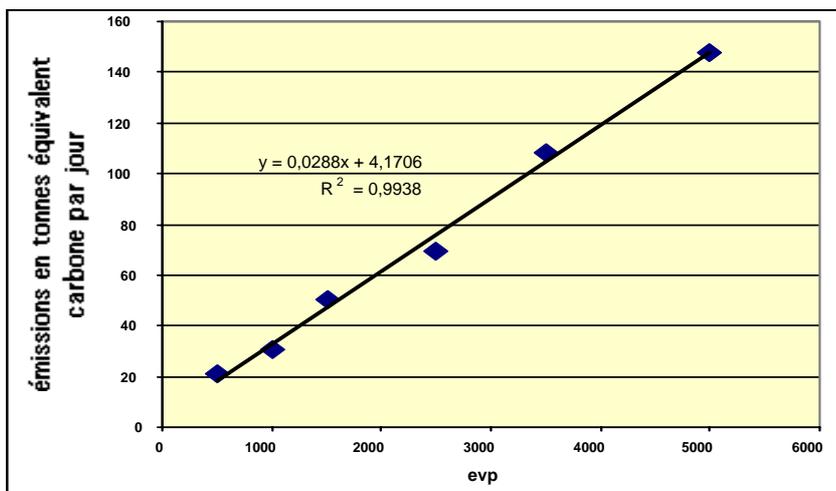


Figure 5 : Corrélation entre les émissions quotidiennes d'un porte conteneurs en mer et sa capacité d'emport.

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 :

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

Ces émissions seront reportées dans le tableau, 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 101 : 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 :

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

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.

4.5.3 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.

4.6. Transport fluvial de marchandises

L'activité du transport fluvial en France est articulée autour de 5 bassins et l'utilisation de deux types d'unité motorisée (les automoteurs et les pousseurs utilisés pour pousser les barges de convoi).

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

L'ADEME et VNF ont réalisé récemment une étude complète sur ce sujet¹³⁷ proposant des facteurs d'émissions de CO₂ détaillés par bassin et par type d'unité de bateau, ainsi que des facteurs d'émission agrégés (voir tableaux ci-dessous). Ces facteurs d'émissions tiennent compte d'un pourcentage de voyage à vide de 31% et d'un coefficient de chargement compris entre 80% et 100%. Ils concernent uniquement les émissions liées à la consommation de carburant.

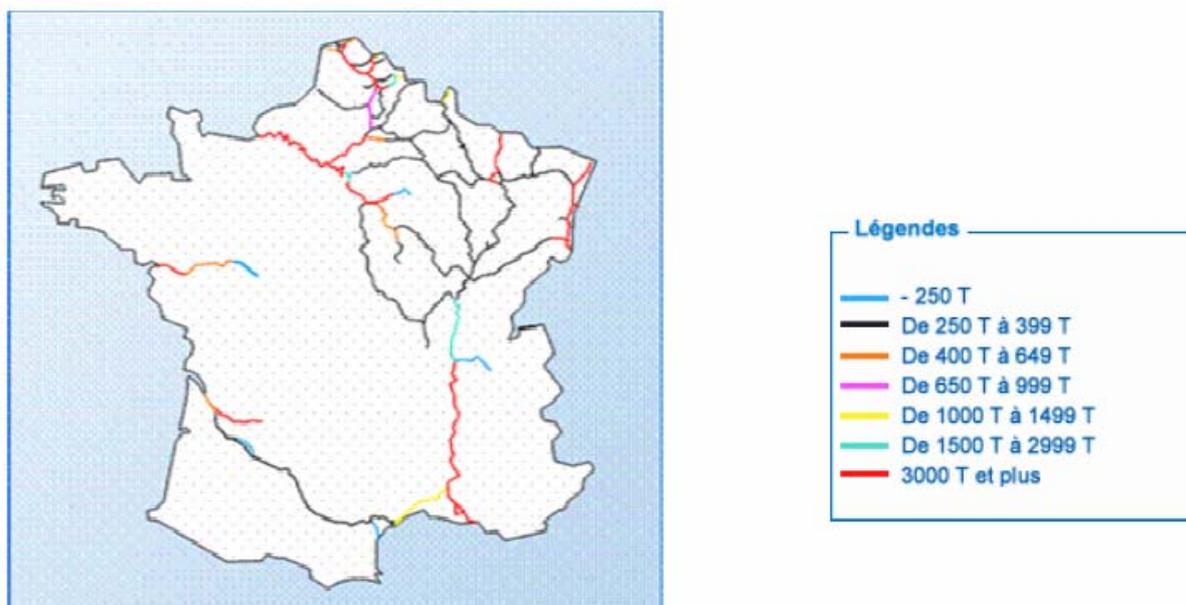
Le premier tableau ci-dessous donne des indicateurs agrégés, c'est-à-dire de moyennes tous bassins confondus pour les bateaux, et des moyennes tous bateaux confondus pour les bassins.

¹³⁷ ADEME, VNF, T&L Associés, juillet 2005, "Etude sur le niveau de consommation de carburant des unités fluviales françaises"

		Consommation unitaire d'énergie (gep/t.km)	Facteurs d'émissions (gCO2/t.km)	Facteur d'émissions (Kg eqC/t.km)
Equipements				
Automoteurs	< 400t	14.0	44.3	0.0121
	400 – 650 t	13.8	43.4	0.0118
	650 – 1000 t	12.3	38.8	0.0106
	1000 – 1500 t	11.5	36.3	0.0099
	> 1500 t	9.5	30.0	0.0099
Pousseurs	295 – 590 kW	8.6	27.1	0.0074
	590 – 880 kW	7.8	24.4	0.0067
	> 880 kW	6.8	21.5	0.0059
Bassin				
Seine		9.5	30.1	0.0082
Rhône		9.3	29.4	0.0080
Nord Pas de Calais		13.6	42.9	0.0117
Rhin		11.5	36.2	0.0099
Moselle		12.0	37.9	0.0103
Interbassin		12.1	38.2	0.0104
Total		10.8	34.0	0.0093

Tableau 102 : Indicateurs de consommation énergétique et facteurs d'émission.
Données agrégées par type d'équipement et par bassin de navigation.
 (ADEME, VNF, T&L Associés, 2005)

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



Carte 2 : Carte des gabarit des voies navigables en 2003 en France (VNF)

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

Bassin	Equipements		Consommation unitaire d'énergie (gep/t.km)	Facteurs d'émissions (gCO2/t.km)	Facteurs d'émissions (Kg eqC/t.m)
Seine	Automoteurs	< 400t	14.9	47.0	0.0128
		400 – 650 t	13.7	43.1	0.0118
		650 – 1000 t	12.0	37.8	0.0103
		1000 – 1500 t	6.6	20.7	0.0056
		> 1500 t	5.9	18.5	0.0050
	Pousseurs	295 – 590 kW	8.3	26.3	0.0072
		590 – 880 kW	7.5	23.6	0.0072
> 880 kW		5.2	16.5	0.0045	
Rhin	Automoteur	1000 – 1500 t	13.9	43.8	0.0119
		> 1500 t	11.9	37.4	0.0102
	Pousseurs	> 880 kW	8.7	27.3	0.0074
Nord Pas de Calais	Automoteurs	< 400t	15.0	47.2	0.0129
		400 – 650 t	13.8	43.5	0.0119
		650 – 1000 t	12.7	40.1	0.0109
		1000 – 1500 t	11.7	37.0	0.0101
		> 1500 t	10.8	34.1	0.0093
	Pousseurs	295 – 590 kW	8.5	26.6	0.0073
		590 – 880 kW	7.2	22.6	0.0062
> 880 kW		6.1	19.2	0.0052	
Moselle	Automoteur	1000 – 1500 t	13.4	42.2	0.0115
		> 1500 t	11.4	36.0	0.0098
	Pousseurs	> 880 kW	8.4	26.3	0.0072
Bassin	Equipements		Consommation unitaire d'énergie (gep/t.km)	Facteurs d'émissions (gCO2/t.km)	Facteurs d'émissions (Kg eqC/t.m)
Rhône	Automoteurs	< 400t	16.9	53.2	0.0145
		400 – 650 t	14.8	46.6	0.0127
		650 – 1000 t	12.8	40.5	0.0110
		1000 – 1500 t	7.1	22.4	0.0061
		> 1500 t	6.7	21.0	0.0057
	Pousseurs	295 – 590 kW	9.6	30.2	0.0082
		590 – 880 kW	8.9	27.9	0.0076
> 880 kW		5.9	18.7	0.0051S	

**Tableau 103 : Indicateurs de consommation énergétique et facteurs d'émission.
Données détaillées par bassin de navigation.
(ADEME, VNF, T&L Associés, 2005)**

La méthodologie utilisée pour la réalisation de cette étude étant basée sur des consommations réelles détaillées par type de bateau et bassin, nous avons affecté une incertitude de 10% aux facteurs d'émissions ainsi définis.

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, métaux, plastique, etc.) engendre des émissions de gaz à effet de serre essentiellement dues à l'énergie fossile et l'électricité consommées dans les processus industriels de fabrication (charbon pour la fabrication d'acier par exemple).

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 Bilan 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 du fait des émissions de CO₂ engendrées par le charbon lors de la réduction du minerai de fer, ainsi que des émissions liées à la combustion du gaz de cokéfaction.

La publication suisse "Cahiers de l'environnement"¹³⁸ fournit les 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.

¹³⁸ Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages / 1998 / Cahiers de l'Environnement, N° 250-I / Déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I.

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 2^{ème} transformation (acier neuf et recyclé confondus).

Notons enfin que l'agence fédérale américaine "Environment Protection Agency" (EPA) a publié un document¹³⁹ 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 de grandeur, 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 :

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

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. Cette valeur est très

¹³⁹ US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste.

proche de celle 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-dessous¹⁴⁰, 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 du fait :

- de l'énergie utilisée, d'une part (production de chaleur dans l'entreprise, et production d'électricité en dehors),
- 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 publication suisse citée précédemment. Elles concernent le CO₂, le CH₄, le N₂O, et les halocarbures, (notamment le CF₄).

Les données permettent de tenir compte du taux d'aluminium 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 d'aluminium 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) :

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

¹⁴⁰ CSIRO / août 2003 / Sustainability Network, Update 30E.

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 § 2.4), 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 d'aluminium 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'EPA (Environment Protection Agency), agence fédérale américaine chargée des questions d'environnement¹⁴¹, 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 recyclage¹⁴².

Sachant que les facteurs d'émission moyens pour l'électricité aux USA sont 30% plus élevés que la moyenne européenne, une valeur d'environ 3 tonnes équivalent carbone par tonne d'aluminium semble donc 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 c'est le cas en France (la Suisse n'a pratiquement que des centrales nucléaires ou hydroélectriques, voir annexe 1) Ainsi, 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.

5.3 Autres métaux

Il n'existe pas beaucoup d'analyses de cycle de vie aisément disponibles pour les autres métaux. Une publication australienne¹⁴³ 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) :

¹⁴¹ www.epa.gov

¹⁴² US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste.

¹⁴³ CSIRO / Août 2003 / Sustainability Network, Update 30E.

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 104 : Facteurs d'émission pour différents types de métaux produits en Australie. (CSIRO, 2003)

Pour la France, le CEREN nous donne des consommations énergétiques par secteur d'activité (sur la base des codes NAF)¹⁴⁴, 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 serre¹⁴⁵, 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 ¹⁴⁶	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 105 : Facteurs d'émission pour différentes activités métallurgique. (CEREN – 1999)

¹⁴⁴ CEREN / juillet 1999 / Contenu énergétique des produits de base de l'industrie, les matériaux de construction.

¹⁴⁵ 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.

¹⁴⁶ 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 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 106 : Calcul des facteurs d'émission pour différents métaux sans tenir compte de la part minière

Par ailleurs, le mémento des décideurs de la MIES¹⁴⁷ fournit un chiffre pour le cuivre, qui est de 280 kg équivalent carbone par tonne. Ce même mémento donne également 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 dans l'énergie 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 107 : 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 qu'en revanche 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.

On obtient ainsi 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) :

¹⁴⁷ MIES : Mission Interministérielle de l'Effet de Serre

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

Tableau 108 : 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 Bilan Carbone® plus approfondis des filières.

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, APME¹⁴⁸) propose des analyses de cycle de vie donnant les émissions dans l'air de CO₂, méthane, N₂O et aucune associées à la production d'un certain nombre de produits chimiques de base et de matières plastiques (ces émissions étant généralement négligeables, elles ne sont pas reprises en compte ci-dessous).

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)¹⁴⁹ :

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 109 : Facteur d'émission de la production de Polystyrène. (APME, 1997)

¹⁴⁸ <http://lca.apme.org>

¹⁴⁹ Dr. I. Boustead / avril 1997 / Eco-profiles in the european industry - report 4 : polystyrene (seconde édition).

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 document issu de la même association¹⁵⁰ 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 110 : Facteur d'émission de la production de Polychlorure de vinyle. (APME, 1998)

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

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.

5.4.1.3 Polyéthylène haute densité

Une autre publication de l'APME disponible sur leur site Internet¹⁵¹ 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 111 : Facteur d'émission de la production de Polyéthylène haute densité (APME –1999)

¹⁵⁰ Dr. I. Boustead / Mai 1998 / Eco-profiles in the european industry - report 6 : Polyvinyl Chloride (seconde édition),

¹⁵¹ Dr. I. Boustead / 1999 / Eco-profiles in the european industry. (Année de référence des données 1995)

L' EPA (Environment Protection Agency) a fait réaliser deux analyses de cycle de vie différentes pour le polyéthylène haute densité¹⁵², 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.

De même que vu précédemment, une formule d'interpolation linéaire permettra de tenir compte d'un taux de recyclé variable.

5.4.1.4 Polyéthylène basse densité

La même publication de l'APME que ci-dessus propose la valeur de 550 kg équivalent carbone par tonne 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 112 : Facteur d'émission de la production de Polystyrène basse densité. (APME –1999)

Le document déjà cité de l'EPA 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.

5.4.1.5 Polyéthylène terephthalate

La publication de l'APME de 1999 citée précédemment donne les émissions dans l'air liées à la production d'une tonne de Polyéthylène terephthalate.

¹⁵² US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste.

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 113 : Facteur d'émission de la production de Polyéthylène terephthalate amorphe. (APME –1999)

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 114 : Facteur d'émission de la production de Polyéthylène terephthalate (bouteille). (APME –1999)

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 115 : Facteur d'émission de la production de Polyéthylène terephthalate (film). (APME –1999)

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).

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'APME¹⁵³, 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 116 : 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 MIES¹⁵⁴ 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)¹⁵⁵.

En utilisant la répartition énergétique moyenne en France pour les énergies primaires hors électricité¹⁵⁶, on peut convertir le "contenu en énergie" du verre en "contenu en équivalent carbone" pour le seul CO₂.

On obtient le tableau suivant :

¹⁵³ Dr. I. Boustead / 1999 / Eco-profiles in the european industry. (Année de référence des données 1995)

¹⁵⁴ Mission Interministérielle de l'Effet de Serre / juin 1999 / Mémento des décideurs.

¹⁵⁵ CEREN / 1999 / Energies par produit.

¹⁵⁶ 19% de charbon, 27% de fioul, 49% de gaz, 5% de renouvelables et divers.

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
fibres de verre	0,228

Tableau 117 : Facteur d'émission de la production de différents produits verriers (CEREN, 1999)

Le CEREN donne également une consommation énergétique moyenne pour le code NAF correspondant au verre¹⁵⁷ 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 118 : 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.

Le mémento des décideurs de la MIES¹⁵⁸ 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 119 : Facteur d'émission de la production de verre plat et de laine de verre (MIES, 1999)

Enfin l'EPA¹⁵⁹ 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.

¹⁵⁷ C'est à dire pour la moyenne de consommation énergétique par tonne de produit vendu de toutes les entreprises du secteur "verre".

¹⁵⁸ Mission Interministérielle de l'Effet de Serre / juin 1999 / Mémento des décideurs.

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

5.6.1.1 Eléments de définition

Le ciment est un liant hydraulique, une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit en réaction au processus d'hydratation. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le ciment est un constituant de base du béton.

Le terme générique "**béton**" désigne un **matériau de construction** http://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_composite fabriqué à partir de granulats (sable, graves) agglomérés par un liant. On parle de liant hydraulique (couramment appelé ciment) quand il fait prise par hydratation, on obtient dans ce cas un béton de ciment. On peut aussi utiliser un liant dit hydrocarboné (bitume), ce qui conduit à la fabrication du béton bitumineux.

5.6.1.2 Facteurs d'émissions

Enerdata, bureau d'études spécialisé dans les questions d'énergie¹⁶⁰, 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.).

¹⁵⁹ US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste.

¹⁶⁰ <http://www.enerdata.fr/>

A partir du contenu en énergie du produit publié par le CEREN¹⁶¹, 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)¹⁶², 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 GHGprotocol¹⁶³ 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).

Les facteurs d'émission concernant les bétons spécifiques, notamment les bétons bitumineux utilisés dans les constructions d'infrastructures routières sont définis au § 9.2 (matériaux routiers).

5.6.2 Autres matériaux

5.6.2.1 Pierres de carrière

Selon le CEREN, les consommations énergétiques liées à l'extraction des pierres sont faibles par unité de poids¹⁶⁴. 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%.

¹⁶¹ CEREN / 1999 / Energies par produit.

¹⁶² Mission Interministérielle de l'Effet de Serre / juin 1999 / Mémento des décideurs.

¹⁶³ www.ghgprotocol.org

¹⁶⁴ CEREN / 1999 / Energies par produit.

5.6.2.2 Bois

Sous certaines conditions précisées ci-dessous, il est possible de considérer que l'emploi du bois comme matériau d'œuvre engendre 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. En effet, le bois contient du carbone qui a été soustrait à l'atmosphère lors de la croissance de l'arbre, et si 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, l'homme contribue ainsi à soustraire du CO₂ de l'atmosphère au lieu d'en rajouter.

Il y a toutefois deux conditions expresses pour que le bois d'œuvre corresponde à un puits. La première est qu'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 pas 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).

La deuxième condition concerne la réelle durabilité de l'objet contenant le bois. En effet, si ce dernier sert à fabriquer une charpente dont la durée de vie est supérieure au siècle, il sera légitime de lui faire correspondre un puits, mais s'il sert à fabriquer du mobilier à courte durée de vie (20 ou 30 ans), alors l'existence d'un puits se discute, car le carbone ne séjournera que brièvement dans l'objet en bois (qui fera l'objet d'une incinération en fin de vie).

Sous les deux conditions mentionnées ci-dessus, la valeur retenue est celle figurant dans le mémento des décideurs de la MIES, à savoir **-500 kg équivalent carbone par tonne de bois**¹⁶⁵.

¹⁶⁵ Mission Interministérielle de l'Effet de Serre / juin 1999 / Mémento des décideurs.

5.6.2.3 Autres matériaux de construction

Des facteurs d'émission concernant des matériaux et produits de construction sont disponibles dans la base de données INIES¹⁶⁶. Cette base de données, accessible gratuitement sur internet¹⁶⁷, propose des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) desquelles il est possible d'extraire des informations sur les émissions de GES d'un produit de construction donné.

Les facteurs d'émission extraits de cette base et intégrés dans le tableur Bilan Carbone® sont définis au § 9.1.

5.7 Papiers et cartons

Selon la publication de l'Office Suisse du Paysage¹⁶⁸, 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 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'EPA (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 carton¹⁶⁹, 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 tonne. 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 (4/5^e du total¹⁷⁰), 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 du double selon l'EPA.

¹⁶⁶ INIES : Information sur l'Impact Environnemental et Sanitaire.

¹⁶⁷ www.inies.fr

¹⁶⁸ Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages / 1998 / Cahiers de l'Environnement, N° 250-I / Déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I.

¹⁶⁹ US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste.

¹⁷⁰ Energies par produit, CEREN, 1999

Ici aussi, un bilan de filière pour les émissions de gaz à effet de serre permettrait d'affiner ce facteur d'émission..

5.8 Achats divers et petites fournitures, facteur par défaut

5.8.1. Cas des petites fournitures

Ce chapitre concerne toutes les petites fournitures (hors papier) qui sont toujours nécessaires à une activité. Comme il ne serait pas raisonnable de traiter un par un les stylos et les tampons, nous proposons un facteur d'émission pour les achats « indifférenciés », reprenant en fait le facteur d'émission moyen de l'industrie française.

Le PIB actuel de la France étant de 1600 milliards d'euros environ, pour des émissions nationales de 170 millions de tonnes équivalent carbone, on obtient un « contenu en gaz à effet de serre » de l'ordre de 100 tonnes équivalent carbone par million d'euro de PIB.

Le PIB n'étant rien d'autre que la valeur des produits et services disponibles pour un usage final, le « contenu en carbone » moyen des produits et services vendus est donc de l'ordre de 100 grammes équivalent carbone par euro de dépense en moyenne.

Ce facteur sera appliqué faute de mieux aux achats divers et petites fournitures et sera associé à une incertitude de 50%.

5.8.2. Cas des consommables bureautiques

Pour le cas des consommables bureautiques (cartouches de toner ou d'encre pour imprimante, par exemple) on appliquera le facteur moyen de l'informatique (voir § 9.3.3.6), une cartouche d'imprimante étant désormais un assemblage de semi-conducteurs et d'encres spéciales dont le prix par unité de poids est très élevé.

Le facteur appliqué est de l'ordre de 250 grammes équivalent carbone par euro de dépense en moyenne (incertitude 50%).

5.9 Services tertiaires

5.9.1 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.

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.

5.9.2 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 Millions de Francs (environ 15 000 Millions d'euros). 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 négligeable 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 (environ 150 000 €) 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 amènent à 11,6 tep par MF (environ 76,1 tep/M€), soit (en supposant que l'on ait 250 kF (environ 38 000 €) 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.

5.9.3 Dépense informatique, services divers

Faute d'avoir réalisé des Bilan 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 fossiles¹⁷¹),
- 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 de nouveaux plants (par contre la déforestation intervient comme une émission nette).

Il s'agit bien entendu d'un raisonnement approximatif, acceptable pour une première approximation, mais bon nombre de facteurs retenus doivent l'être à titre provisoire. La réalisation de Bilan Carbone® de filière pour apporter des informations permettant d'affiner les facteurs d'émissions définis dans ce chapitre. Le secteur de l'agriculture est d'autant plus important à analyser en terme d'émission de GES quand on sait que l'agriculture est en France le premier poste d'émission brute de GES (tous gaz confondus), devant les secteurs des transports ou de l'industrie¹⁷².

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

- pour les matériaux entrants de l'industrie agroalimentaire¹⁷³,
- pour la réalisation du Bilan Carbone® d'un restaurant (restaurant professionnel ou cantine du personnel).

¹⁷¹ CITEPA / Août 1999 / La France face à ses objectifs internationaux.

¹⁷² CITEPA / 2005 / Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France, Format SECTEN.

¹⁷³ 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.

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

6.2 Engrais

Une publication suisse, de la Station Fédérale de Recherches en Economie et Technologie Agricoles (en abrégé FAT)¹⁷⁴, 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 ammoniacque phosphate	kg N	1,41E+06	21	3140	9420	0,018	0,142
Nitrate d'ammoniacque	kg N	9,69E+05	9450	8880	9190	0,014	0,111
Urée-nitrate d'ammoniacque	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'ammoniacque 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 120 : 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 amoniacque phosphate	kg N	0,385	0,002	0,009	0,059	6E-05	2E-04	0,45
Nitrate d'ammoniacque	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 121 : Facteurs d'émission de la production d'engrais en fonction des différents GES en kg eqC.

¹⁷⁴ Gaillard & al. / 1997 / Inventaire environnemental des intrants agricoles en production végétale / Comptes rendus de la FAT.

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%.

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 122 : 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 123 : 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 de la FAT 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	
Cypermethrine	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 124 : 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 125 : 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 126 : 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 permettant de connaître la consommation de carburant à l'hectare de culture de blé cultivé ont été obtenues dans une étude réalisée par Ecobilan pour l'ADEME sur les filières de biocarburants¹⁷⁵, 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 ¹⁷⁶	86,9	

Tableau 127 : Facteurs d'émission relatif à la consommation de carburant pour la culture de blé par hectare cultivé. (ADEME- ECOBILAN, 2003)

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 128 : Emissions des produits utilisés pour la culture du blé. (ADEME- ECOBILAN, 2003)

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.

¹⁷⁵ ADEME – ECOBILAN / 2003 / Bilans énergétique et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants.

¹⁷⁶ Les facteurs d'émission sont ceux du § 2.2, tenant compte des émissions amont pour l'élaboration des carburants

Par ailleurs l'épandage des engrais azotés engendre des émissions de N₂O pour 3,1% 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 460 kg équivalent carbone par hectare.

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 ¹⁷⁷	1	33,3	1,3
Outils	13,3	110,8	4,2
Total par hectare			6,0

Tableau 129 : 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	460 kg équ. C par hectare
Equivalent carbone total	824 kg équ. C par hectare

Tableau 130 : 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 an¹⁷⁸. De ce fait, produire une tonne de blé engendre des émissions de 92 kg équivalent carbone par tonne. Compte tenu d'un taux d'humidité de 15% à la récolte, ces émissions sont de 108 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 131 : Facteurs d'émission pour l'énergie de culture du maïs par hectare cultivé

¹⁷⁷ Il s'agit ici de la moissonneuse-batteuse

¹⁷⁸ Source : Institut du Végétal

En ce qui concerne les intrants les valeurs fournies dans l'étude Ecobilan/ADEME précitée¹⁷⁹ sont les suivantes :

Intrants	Valeur	unité
Nitrate d'ammonium	120	kg de N par ha
Engrais P	8	kg P2O5 par ha
Engrais K	20	kg K2O par ha
Fongicides	0,1	kg de matières actives par ha
Herbicides	3,8	kg de matières actives par ha
Insecticides	0,2	kg de matières actives par ha
Substance de croissance	-	kg de matières actives par ha

Tableau 132 : Emissions 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 133 : 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	268	kg équ. C par hectare
N ₂ O	300	kg équ. C par hectare
Equivalent carbone total	568	kg équ. C par hectare

Tableau 134 : 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 an¹⁸⁰. De ce fait, produire une tonne de maïs fourrage engendre des émissions de 15 kg équivalent carbone par tonne. Compte tenu d'un taux d'humidité de 70% à la récolte¹⁸¹, ces émissions sont de 51 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 :

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

¹⁷⁹ ADEME – ECOBILAN / 2003 / Bilans énergétique et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants.

¹⁸⁰ Source : Institut du Végétal

¹⁸¹ 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	92
taux d'extraction	76%
Contribution du blé par tonne de farine	120
Contribution des transports ¹⁸²	7,8
Emissions de la meunerie ¹⁸³	5
Soit par tonne de farine	133

Tableau 135 : Facteur d'émission de la farine de blé

La farine sera donc prise avec **133 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 5). Cette activité étant marginale pour l'agriculture, aucun facteur d'émission n'est encore proposé dans le tableur Bilan Carbone®.

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

La réalisation de Bilan Carbone® de filière seraient néanmoins intéressants et permettrait d'enrichir le tableur en intégrant un facteur d'émission pour les cultures de fruits et légumes.

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).

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

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

¹⁸³ d'après CEREN ; il y a essentiellement de l'électricité.

- 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) ¹⁸⁴	Déjections : CH ₄ (kg) ¹⁸⁵	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 136 : Emissions annuelles du bétail (digestion, déjections et alimentation).

¹⁸⁴ Académie d'Agriculture / 1999 / Bilan et gestion des Gaz à effet de serre dans l'espace rural / Comptes rendus / vol. 85.

¹⁸⁵ US Environment Protection Agency / 1992 / Global Methane Emissions From Livestock and Poultry Manure.

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	16	32	27	188,36	158,00	956,49	1 302,85
Vaches allaitantes	16	32	27	188,36	158,00	711,60	1 057,95
Taureaux	15	32	27	176,58	148,12	681,95	1 006,65
Génisses, taurillons	15	32	27	176,58	148,12	415,10	739,80
Broutards, veaux	3	32	27	35,32	29,62	136,39	201,33
Bœuf	15	32	27	176,58	148,12	474,40	799,10

Tableau 137 : 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 veaux¹⁸⁶),
- chaque veau allaité est abattu lorsqu'il pèse 181 kg de poids vif¹⁸⁷
- enfin elle part à l'abattoir comme viande de bœuf¹⁸⁸, 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	35	30	136	0,5	18	15	68	101
6 mois de broutard	35	30	136	0,5	18	15	68	101
un an de génisse	177	148	415	1	177	148	415	740
4 ans de vache allaitante	188	158	712	4	753	632	2 846	4 232
Total de la vache allaitante sur sa vie	436	365	1 399		965	810	3 398	5 173
Quote-part par veau (4 veaux en tout)	47	39	178		188	158	712	1 058
Kg équivalent carbone par kg de carcasse de vache de réforme					0,62	0,52	1,62	2,77

Tableau 138 : Facteurs d'émission des vaches allaitantes de réforme

¹⁸⁶ 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)

¹⁸⁷ US Environment Protection Agency / 1992 / Global Methane Emissions From Livestock and Poultry Manure.

¹⁸⁸ 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

Cela amène à **2,77 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 vif¹⁸⁹.

VEAU DE LAIT	Equivalent carbone
Emissions de la mère (quote part ci-dessus)	1 058
6 mois de veau	101
Total par veau	1 159
Poids vif	181
% de carcasse	50%
poids de carcasse	91
kg équ. C par kg de viande avec os	12,80

Tableau 139 : Facteur d'émission du veau de lait

Cela amène le facteur d'émission du veau à **12,8 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 lactation¹⁹⁰, soit 16.500 litres au total sur sa durée de vie.

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.

¹⁸⁹ Source : site de référence des viandes rouges (www.mhr-viandes.com).

¹⁹⁰ Source : INRA

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	18	15	68	101
6 mois de broulard	18	15	68	101
un an de génisse	177	148	415	740
4 ans de vache laitière (dont 3 ans de lactation)	753	632	3 826	5 211
Total de la vache laitière sur sa vie	965	810	4 377	6 153
kg. équ. C par kg de lait	0,046	0,038	0,232	0,316
kg équ. C par kg de carcasse de vache de réforme	0,62	0,52	1,62	2,77

Tableau 140 : Facteur d'émission du lait entier

Cela nous amène, en première approximation, à 316 g équivalent carbone par litre de lait, ou encore à **316 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 notamment 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'abattage¹⁹¹.

De même que pour le veau, le bœuf donne environ 50% de poids net avec os par kg de poids vif¹⁹². Nous négligeons les co-produits (peau pour tannerie).

BŒUF	Equivalent carbone			
	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	TOTAL
24 mois de bœuf adulte	353	296	949	1 598
6 mois de broulard	18	15	68	101
Veau (cf. 9.5.3)	206	173	780	1 159
Total	577	484	1 797	2 857
Par kg de carcasse	1,70	1,42	5,28	8,40

Tableau 141 : Facteur d'émission du bœuf (races à viande)

Cela amène à **8,4 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.

¹⁹¹ US Environment Protection Agency / 1992 / Global Methane Emissions From Livestock and Poultry Manure.

¹⁹² Source : site de référence des viandes rouges (www.mhr-viandes.com)

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 4,74 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	1,70	1,42	5,28	8,40
Vache laitières de réforme	464 485	0,62	0,52	1,62	2,77
Vaches allaitantes de réforme	422 260	0,62	0,52	1,62	2,77
Total ou moyenne	1 365 369	1,00	0,84	2,91	4,74

Tableau 142 : 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 :

Fromage	l de lait par kg de fromage	Kg équivalent carbone
Gruyère	11,43	3,61

Tableau 143 : Facteur d'émission du fromage à pâte cuite

Nous retiendrons donc **3.610 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 470 g équivalent carbone par kg de yaourt, ou encore **470 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 **3.160 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 kg¹⁹³. Il est ensuite engraisé, pendant 161 jours, de 7 à 105 kg en moyenne¹⁹⁴. Il faut 3,21 kg d'aliments (essentiellement des céréales, que nous assimilerons à du blé pour le calcul) pour faire un kg de poids vif¹⁹⁵; 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 moyenne¹⁹⁶, 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 0,34 kg équivalent carbone par kg de poids vif.

Enfin le ratio poids utile/poids vif de l'animal abattu est de 76%¹⁹⁷.

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 :

¹⁹³ Source : INRA

¹⁹⁴ Source : INRA

¹⁹⁵ Source : INRA

¹⁹⁶ US Environment Protection Agency / 1992 / Global Methane Emissions From Livestock and Poultry Manure.

¹⁹⁷ Source : INRA

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	0,14	0,18	0,00	0,33
Total par kg de poids vif	0,14	0,52	0,26	0,93
Total par kg de poids net	0,19	0,69	0,34	1,22

Tableau 144 : Facteur d'émission du porc de batterie

Nous retiendrons donc la valeur de **1.220 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)¹⁹⁸.

De même que ci-dessus, les déjections sont une source de méthane. Les chiffres de la publication précitée¹⁹⁹ sont de 0,15 kg de méthane par animal et par an pour ce poste.

Le ratio poids utile/poids vif est de 66%²⁰⁰.

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	0,08	0,11	0,00	0,19
Supplément pour chauffage, abattage, etc ²⁰¹	0,00	0,00	0,00	0,02
Total par kg de poids vif	0,10	0,11	0,05	0,26
Total par kg de poids net	0,15	0,16	0,08	0,40

Tableau 145 : 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 400 kg équivalent carbone par tonne de poulet de batterie avec os.

Les autres volailles sont étudiées en annexe 6.

¹⁹⁸ Source : INRA

¹⁹⁹ US Environment Protection Agency / 1992 / Global Methane Emissions From Livestock and Poultry Manure.

²⁰⁰ Source : INRA

²⁰¹ Estimation de l'auteur

6.9.2 Œufs

Il faut 2,13 kg d'aliments pour produire 1 kg d'œufs (en batterie)²⁰². Un œuf moyen pèse 63 grammes²⁰³. 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	0,22
prise en compte des déjections	0,05
Sous-total	0,27
10% forfaitaires	0,03
Equivalent carbone par kg	0,30
Equivalent carbone par œuf	0,019

Tableau 146 : Facteur d'émission d'un œuf

Nous retiendrons donc 19 grammes équivalent carbone par œuf, ou encore **300 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. En revanche, 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 suivants²⁰⁴ :

²⁰² Source : INRA

²⁰³ Source : INRA

²⁰⁴ Académie d'Agriculture / 1999 / Bilan et gestion des Gaz à effet de serre dans l'espace rural / Comptes rendus / vol. 85.

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 147 : 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 an²⁰⁵. 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.

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)	87
Kg équ. C de 2 mois d'agneau de lait	1
TOTAL	88
Poids vif	22
% de carcasse	50%
poids de carcasse	11
kg équ. C par kg de carcasse	7,98

Tableau 148 : 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	88
Kg équ. C pour 2 mois d'agneau à l'herbe	2
TOTAL	90
Poids vif	47
% de carcasse	50%
poids de carcasse	24
kg équ. C par kg de viande avec os	3,83

Tableau 149 : Facteurs d'émission de l'agneau à l'herbe

²⁰⁵ source INRA

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 10% pour tenir compte du transport, de la manutention, de la chaîne du froid, etc., nous prendrons pour le poisson un facteur d'émission de 440 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 reste²⁰⁶.

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% 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.

²⁰⁶ Source : conversation avec Loïc Antoine, IFREMER

6.13 Autres produits

La collecte de données permettant de réaliser les approximations pour d'autres produits courants ou semi-finis de l'industrie agroalimentaire est en projet. Cela concerne par exemple :

- les matières grasses,
- le chocolat (ou le cacao),
- les légumes courants (pommes de terre, betteraves...),
- etc....

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 (Prolea²⁰⁷, Institut du Végétal²⁰⁸, Ecobilan²⁰⁹, ADEME,²¹⁰ 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 ²¹¹	50

²⁰⁷ Echanges avec Benoît CARROUEE de Prolea en 2003

²⁰⁸ ITCF - ADEME / 2003 / Référentiel pour le calcul des bilans énergétiques.

²⁰⁹ AGPM - Ecobilan / 1998 / Analyse de cycle de vie de l'amidon de maïs, de maïs grain et de maïs ensilage.

²¹⁰ ADEME - Ecobilan / 2003 / Bilans énergétique et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants.

Tournesol	40
Colza	170
Pâturages fertilisés	94
Pommes de terre	160

Tableau 150 : 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	460
Mais grain conventionnel	438
Mais fourrage conventionnel	300
Sorgho	375
Betteraves conventionnelles	218
Vignes	501
Vignes non intensives	125
Tournesol	100
Colza	425
Pâturages fertilisés	235
Pommes de terre	400

Tableau 151 : 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 compte²¹².

²¹¹ 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.

²¹² IFEN – JM Jancovici / 2004 / Indicateurs de développement durable.

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 152 : 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 :

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 153 : 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 154 : Emissions annuelles de 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 155 : Emissions annuelles de méthane 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.

Les données ci-dessous concernent à la fois la production directe de déchets par l'entité réalisant son Bilan carbone® et la fin de vie des produits ou services vendus par cette même entité²¹³.

7.1 Déchets inertes

Les déchets inertes sont des déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante et qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique.

Dans la pratique, cette catégorie de déchets regroupe tout ce qui ne contient pas de composés organiques, c'est à dire :

- les métaux,
- les autres minéraux (verre, pierres, gravats, etc.)

²¹³ L'entité ignorant d'une manière générale le devenir précis des produits/services vendus, les chiffres proposés par défaut (ou « mix français ») pourront notamment être utilisés pour évaluer les émissions de ces produits/services en fin de vie.

7.1.1 Déchets inertes – mise en 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 matériau²¹⁴. 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 Déchets inertes - valeur par défaut

La répartition moyenne des déchets inertes en France par filière est la suivante²¹⁵ :

Déchets	% de mise en décharge sans valorisation	% de mise en décharge avec valorisation	% d'incinération sans valorisation.	% d'incinération avec valorisation.	% de recyclage matière
Emballage acier, aluminium. Cuivre, zinc, nickel, plomb	32%	14%	--	1%	53%
Emballage en verre, verre, matériaux de construction.	33%	16%	--	--	51%

Tableau 156 : Répartition française du traitement des déchets inertes dans les différentes filières (ADEME, 2004).

²¹⁴ US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste.

²¹⁵ ADEME / 2004 / La valorisation des emballages en France.

Cependant, comme tous les facteurs d'émission par tonnes de déchets inertes sont équivalents selon les filières de traitement des déchets, et que toutes les fins de vie pour les déchets minéraux valent 4 kg équivalent carbone par tonne (§ 7.1.1), la valeur moyenne du contenu en carbone de la fin de vie des déchets inertes est de 4 kg équivalent carbone par tonne quelque soit la filière de traitement des déchets utilisées.

Notons que ces valeurs sont très faibles par rapport au contenu en carbone lié à la fabrication des matériaux inertes.

7.2 Déchets non fermentescibles mais combustibles

Il s'agit essentiellement du plastique (le papier étant lui fermentescible²¹⁶).

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 (notamment 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.

Pour la combustion seule, le facteur d'émission calculé au § 2.2.5 sera appliqué par défaut à tous les plastiques. 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 474 kg équivalent carbone par tonne.

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.

²¹⁶ Il s'agit en effet d'un composé organique qui se décompose en décharge

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.

Sur ces bases les valeurs sont les suivantes pour les USA²¹⁷ :

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	510
Plastique, valeur moyenne conventionnelle	-510 ⁽²¹⁸⁾

Tableau 157: 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 l'année de l'étude). 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
Plastique, valeur moyenne conventionnelle	-73

Tableau 158: 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 :

²¹⁷ Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste, US Environment Protection Agency, 1998, p. 85

²¹⁸ la valeur par défaut sera celle de quasiment tous les plastiques

Nature du matériau incinéré	kg équivalent carbone par tonne de matériau incinéré avec valorisation
Plastique, valeur moyenne conventionnelle	401

Tableau 159: Calcul des facteurs d'émission de l'incinération de plastiques avec valorisation.

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 2002, 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)²¹⁹ :

% de mise en décharge sans valorisation	% de mise en décharge avec valorisation	% d'incinération sans valorisation.	% d'incinération avec valorisation.	% de recyclage matière
32%	15%	2%	36%	15%

Tableau 160 : 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 cette valeur moyenne du contenu en carbone de la fin de vie des plastiques en France, avec la formule suivante :

$$47\% * 4 + 2\% * 474 + 36\% * 401 + 15\% * 4 = 156^{220}$$

Cette valeur sera retenue lorsque la destination n'est pas connue.

7.3 Déchets 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.

²¹⁹ ADEME / 2004 / La valorisation des emballages en France.

²²⁰ Le calcul ci-dessus donnerait en fait un peu moins mais les pourcentages affichés sont des arrondis ; le calcul exact donnant bien 165.

7.3.1 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'EPA²²¹, 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 161 : Facteurs d'émission des déchets papiers et cartons mis en décharge sans valorisation (EPA, 1998)

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.

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**²²².

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.

²²¹ US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste/ p. 108.

²²² US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste/ p. 108.

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 environ²²³. 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.

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**.

²²³ 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 $(290/21)*44/12$

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 plus²²⁴).

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 replantée²²⁵. 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.

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 alimentaires²²⁶. 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 (l'année de l'étude), alors qu'en France nous sommes à 23 g équivalent carbone par kWh.

Nous aboutissons alors à une économie de $60 \times 23 / 167 = 9$ **kg équivalent carbone par tonne** de déchets alimentaires incinérés avec récupération de l'énergie.

²²⁴ 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.

²²⁵ 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.

²²⁶ US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste/ p. 91.

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 **- 5 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	-26
Carton	-190	-27

Tableau 162 : Economies résultant de la valorisation thermique de l'incinération de papiers 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.

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 suivante²²⁷.

% de mise en décharge sans valorisation	% de mise en décharge avec valorisation	% d'incinération sans valorisation.	% d'incinération avec valorisation.	Compostage ou valorisation
36%	18%	2%	32%	12%

Tableau 163 : 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 96 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 suivante²²⁸:

²²⁷ ADEME / 2004 / La valorisation des emballages en France.

²²⁸ ADEME / 2004 / La valorisation des emballages en France.

% de mise en décharge sans valorisation	% de mise en décharge avec valorisation	% d'incinération sans valorisation.	% d'incinération avec valorisation.	% de recyclage matière
17%	8%	2%	21%	52%

Tableau 164 : Répartition française du traitement des papiers et cartons dans les différentes filières.

Cela amène à des valeurs moyennes de :

- **61 kg équivalent carbone par tonne pour le papier.**
- **42 kg équivalent carbone par tonne pour le carton,**

Ces valeurs seront celles retenues lorsque la destination du déchet n'est pas connue.

7.4 Déchets Industriels spéciaux

Une étude²²⁹ réalisée par la FNADE²³⁰ et l'ADEME en 2001-2002 (publication en 2003) a permis d'évaluer les impacts environnementaux du stockage des déchets dangereux en sites collectifs en France.

La méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV) a été utilisée. Il s'agit d'une technique comptable des impacts potentiels sur l'environnement générés tout au long du cycle de vie d'un produit ou d'un service.

Les données d'inventaire ont été élaborées à partir de valeurs moyennes représentatives de la situation française en 2000.

Un centre de stockage²³¹ est un lieu aménagé pour le dépôt de déchets sur le sol ou leur enfouissement dans la terre. En France, il existe trois catégories de centre de stockage :

- de classe I : déchets dangereux (déchets ultimes et stabilisés)
- de classe II : déchets non dangereux (déchets ménagers et assimilés ou DMA)
- de classe III : déchets inertes (gravats et déblais).

L'étude porte uniquement sur les centres dits de classe I.

Les déchets admissibles dans de tels centres proviennent de processus industriels ou d'installations de dépollution (par exemple les résidus de l'incinération). Ce sont des déchets essentiellement solides ou minéraux, très peu réactifs, très peu évolutifs et très peu solubles.

²²⁹ ADEME – FNADE / 2003 / Eco-profil du stockage des déchets dangereux en sites collectifs en France.

²³⁰ FNADE : Fédération Nationale des Activités de Dépollution et de l'Environnement

²³¹ On pourra parler aussi de centre d'enfouissement technique (anciens CET) ou de Centre de Stockage de Déchets Ultimes (CSDU).

Y sont interdits les déchets fermentescibles, liquides, radioactifs, à risque infectieux (DASRI), non pelletables, pulvérulents non conditionnés, explosifs, inflammables, et chauds ou ayant une teneur en PCB supérieure à 50 ppm en masse.

Une fois analysés et acceptés, les déchets subissent un traitement par stabilisation et solidification avant d'être stockés dans des alvéoles.

Une opération de stabilisation (réalisée à froid) permet d'assurer la rétention chimique des éléments composants du déchet. Certains déchets sont déjà stables en l'état lorsqu'ils arrivent sur le site et ne subissent pas cette opération. Une opération de solidification permet ensuite d'augmenter la résistance mécanique du déchet ; l'objectif de ces différents traitements est bien entendu de réduire le transfert des polluants présents dans le déchets vers le milieu qui l'accueille.

Le stockage est alors effectué dans des casiers hydrauliquement indépendants pour maîtriser les interactions déchet/environnement et en particulier minimiser la production de lixiviats.

L'ACV réalisée porte uniquement sur les étapes ci-dessus et est basée sur un échantillon de 11 de ces sites, représentatifs de la situation moyenne en France en 2000.

Il en ressort que pour 1 tonne de déchets stockés, il y a émission de 124 kg de CO₂, provenant principalement de la fabrication des matières premières utilisées lors du traitement de stabilisation.

Ce processus engendre également des émissions de méthane (CH₄), d'oxydes d'azote (NO_x) et d'oxydes de soufre (SO_x), s'élevant respectivement à 160 g, 359 g et 289 g pour 1 tonne de déchets.

Le tableau ci-après fournit la répartition des émissions suivant les différentes phases du cycle de vie du centre de stockage.

	Construction du site et de la zone de stockage	Stabilisation des déchets		Transport des déchets sur le site	Stockage des déchets	Fermeture du site (10.000 ans)	Post-exploitation	TOTAL
		Matières premières	Procédé					
CO ₂ (g)	5 439	110 517	762	760	994	5 073		123 545
CH ₄ (g)	9	142	2	1	0,7	8		159
NO _x	50	248	2	9	5	46		359
SO _x	8	256	3	0,6	5	17		289

Tableau 165 : données d'inventaire du cycle de vie du stockage d'1 tonne de déchets dangereux, par étapes du cycle de vie (ADEME – FNADE, 2003)

En ajoutant la contribution des divers gaz à effet de serre émis, nous retiendrons un facteur d'émission moyen de **125 kg équivalent carbone par tonne de déchets**. Il convient de noter que les valeurs ci-dessus peuvent varier dans un rapport de 1 à 4 selon les sites, ce qui explique que nous ayons retenu une incertitude de 50% pour ce facteur d'émission.

Les valeurs ci-dessus étant agrégées pour tout ce qui entre sur le site de stockage, il n'est pas possible d'en extrapoler des valeurs pour un type particulier de déchets dangereux.

7.5 Fuites ou émissions non énergétiques de fin de vie

Les facteurs d'émission utilisés pour les fuites ou émissions non énergétiques de fin de vie sont explicités dans le § 3.1 de ce guide.

De même, les données utilisées dans l'utilitaire dit "Clim_froid" de la méthode Bilan Carbone® et permettant de reconstituer des émissions approximatives de fluides frigorigènes, aussi bien pendant l'utilisation du système que lors de sa fin de vie²³², sont détaillées dans le § 3.3.

7.6 Eaux usées

En théorie, les émissions des eaux usées peuvent provenir de deux sources :

- le séjour en conditions anaérobies (marécages, bassins de rétentions, lagunes, bras mort de rivière...) d'eaux chargées en matière organique (donc contenant du carbone), ce qui conduit à des émissions de méthane, pour autant qu'elles séjournent pendant une durée longue (quelques semaines au moins, ou plus si cette matière est diffusée sous forme peu humide).
- la dégradation de composés azotés, en conditions aérobies ou non, ce qui donne des émissions de N₂O.

Comme, en pratique, il faut une durée de séjour minimum en conditions anaérobies et une concentration minimum des eaux usées en matières organiques, pour que les émissions soient significatives, ce qui suit ne concerne pas :

- les eaux rejetées dans un milieu non stagnant (eaux en mouvement de rivière ou de fleuve, par exemple), où les conditions anaérobies ne sont pas réunies,
- les eaux rejetées dans un réseau qui aboutit à une station d'épuration, car le maintien en conditions anaérobies de la matière organique en suspension (qui ne dure que le temps d'arriver à la station) est bien trop court pour que des émissions significatives aient lieu. Seules les eaux en sortie de station, et rejetées dans un milieu stagnant, sont éventuellement à prendre en compte.

Enfin les facteurs d'émission ci-dessous ne concernent 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.

Une parfaite adéquation des facteurs d'émission à la réalité devrait conduire à utiliser des facteurs différenciés selon le système de traitement (qui conditionne le caractère plus ou moins aérobie) et les conditions climatiques (qui conditionnent la rapidité de fermentation). Ainsi, selon ce contexte une part plus ou moins grande du carbone initial est effectivement transformée en méthane.

²³² Pour plus de détails, se référer à l'annexe 2 du Manuel d'utilisation du tableur Bilan carbone.xls.

Faute de bibliographie actuellement disponible, nous nous bornerons à donner la valeur supérieure des émissions possibles pour les cas qui relèvent de cette approche, qui sont de 0,25 kg de méthane par kg de carbone organique dégradable contenu dans les déchets²³³.

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

$$\text{kg équivalent carbone provenant des eaux usées} = 0,25 * \text{kg DBO} * 6,27^{234}$$

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.

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	154
Eaux usées de la production de boissons alcoolisées	63
Eaux usées de la brasserie	16
Eaux usées de la chimie organique	47
Eaux usées de l'amidon	16
Eaux usées des produits laitiers	3
Eaux usées de l'industrie agroalimentaires, légumes	6
Eaux usées de la fabrication d'huiles alimentaires	78
Eaux usées de la papeterie	6
Eaux usées de la tannerie	8
Eaux usées de l'agroalimentaire, valeur par défaut	5

Tableau 166 : Facteur d'émissions du traitement des eaux usées

²³³ Ministère australien de l'environnement / 1997 / A Quick Reference Guide, Estimating Potential Methane Production, Recovery and Use from Waste. (www.environment.gov.au).

²³⁴ 6,27 est la valeur approchée de $(23 * 12 \div 44)$, c'est à dire l'équivalent carbone d'un kg de méthane

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. En revanche, 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.

Autrement dit, 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.

Matériaux	Emissions de fin de vie en kg équivalent carbone par tonne
Métaux	4
PET	168
Autres plastiques	282
Verre	4
Carton	42
Papier	61

Tableau 167 : Facteurs d'émission du traitement de fin de vie des emballages.

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 Bilan Carbone® fournit, sous forme de graphique, le "Total émissions emballages", en utilisant les valeurs précédentes sommées avec celles de la fabrication (§5). Le tableau suivant récapitule cette sommation.

Matériaux	Kg équivalent carbone fabrication et fin de vie "moyenne"
Acier ou fer blanc issu de minerai	874
Acier ou fer blanc issu à 100% de recyclé	304
Aluminium issu de minerai	2 894
Aluminium issu à 100% de recyclé	674
Polyéthylène haute densité neuf	782
Polyéthylène haute densité issu à 100% de recyclé	532
Polyéthylène basse densité neuf	832
Polyéthylène basse densité issu à 100% de recyclé	512
PET neuf	1 368
PET issu à 100% de recyclé	568
Polystyrène neuf	1 052
PVC neuf	802
Plastique - moyenne	932
Composite - polyuréthane	1 482
Films plastiques polyéthylène	1 768
Verre plat	418
Verre bouteille	124
Verre flacons	404
Verre issu à 100% de recyclé	169
Verre technique	1 004
Fibre de verre	584
Cuivre	804
Zinc	804
Nickel	2 504
Plomb	574
Autres métaux courants	1 004
Carton (non imprimé)	542
Papier (non imprimé)	611

Tableau 168 : 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'amortissement 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 effectués chez des constructeurs de bâtiments et des fabricants de biens d'équipement.

9.1 Bâtiments

9.1.1 approche rudimentaire par les surfaces construites

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 dans cette étude.

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 169 : 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 ²³⁵ /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 170 : Dépense énergétique pour la construction des bâtiments par matériaux

Il reste à déterminer le facteur d'émission d'un 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 les émissions de CO₂ associées à la production de l'électricité sont négligeables (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 tep²³⁶ ce qui permet d'obtenir les émissions énergétiques,

²³⁵ kep signifie kilo équivalent pétrole, tep tonne équivalent pétrole

- 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).

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 171 : Emissions par secteur d'activité (en France) engendrées par la phase de construction d'un bâtiment.

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 172 : Facteurs d'émission au m² 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.

²³⁶ Contenu carbone découlant du mix énergétique moyen de l'industrie pour les combustibles fossiles.

Cette méthode, certes 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%.

9.1.2 Approche globale, par la consommation énergétique

Il est également possible de reconstituer les émissions de construction à partir de la consommation énergétique du bâtiment. Pour cela, nous considérons que les émissions liées à sa fabrication²³⁷ représentent une fraction des émissions de fonctionnement sur sa durée de vie, et qui dépend du type de bâtiment :

- pour le stock existant, cela ira dans une fourchette de 7 à 10 % (dont 5 % pour la part imputable à la seule fabrication des matériaux).
- pour les bâtiments neufs, la proportion est de l'ordre de 15 %,
- avec des bâtiments à très haute performance énergétique cette proportion pourrait atteindre 20 à 25 % de la consommation énergétique sur leur durée de vie.²³⁸

Dans le tableur Bilan Carbone® seules deux approches ont été conservées : l'approche par les m² (§9.1.1.) et l'approche par les quantités de matériaux mis en œuvre (§9.1.3.).

9.1.3 Approche plus détaillée, par quantité de matériaux mis en oeuvre

Une approche un peu plus précise peut être tentée, surtout dans le cas d'un bâtiment à construire, si l'on connaît la nature des matériaux utilisés, et les quantités employées. En pareil cas, on utilisera des facteurs d'émission par unité fonctionnelle (UF)²³⁹ (en pratique une tonne de ciment, un m² de toiture, etc), auxquels nous rajouterons, si cela n'est pas déjà pris en compte, les émissions de transport, de manutention et de traitement sur le chantier.

Les facteurs d'émission préconisés pour cette approche sont issus de la base de données INIES²⁴⁰. Cette base de donnée est constituée de fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) de différents produits de construction fournies par les fabricants et syndicats professionnels de la branche et qui proposent des informations sur l'analyse du cycle de vie des produits. Il est ainsi possible pour chaque matériaux d'identifier les émissions de GES dues à sa production, son transport, sa mise en oeuvre et également sa fin de vie. La base INIES recense à l'heure actuelle une quarantaine FDES et est enrichie régulièrement par de nouvelles fiches.

Quelques facteurs d'émission ont été extrait de cette base de données et sont présentés dans le tableau ci-dessous :

²³⁷ Consommation directe pour la réalisation des chantiers, la consommation indirecte pour la fabrication des matériaux, leur approvisionnement et leur transport vers les chantiers, et les consommations annexes des autres branches de l'économie imputable aux bâtiments (assurances par exemple)

²³⁸ Source : ADEME / juin 2005 / Stratégie utilisation rationnelle de l'énergie / Chapitre II : les bâtiments.

²³⁹ L' Unité fonctionnelle est définie par l'ISO 14040 comme la "Performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie"

²⁴⁰ INIES : Informations sur l'Impact Environnemental et Sanitaire. La base de données INIES est accessible gratuitement sur internet (www.inies.fr).

Matériaux / Produits	Unités utilisées	Facteurs d'émission en k éq C par unité
Mur en maçonnerie de blocs en béton	m ²	5,01
Poutrelle en béton précontraint	mL	0,92
Carreaux de plâtre	1 m ² de paroi	4,47
Bardage acier simple peau	1 m ² de paroi	2,32
Tuile béton	1 m ² de toiture	2,86
Complexe de doublage d'isol. Therm	1 m ² de paroi	1,64
Revêtement de sol PVC homogène	1 m ² de sol	1,80
Canalisations PVC	1 mL	0,70
Panneau de plafond suspendu	1 m ²	1,17
Monomur terre cuite	1 m ²	14,73

Tableau 173 : Facteurs d'émissions des matériaux et produits de construction issus de la base INIES

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 2003²⁴¹, d'où sont tirés les chiffres ci-dessous. Les facteurs détaillés au § 9.1.3 ci-dessus sont également valides si nécessaire.

9.2.1 Constituants primaires

Tout comme un bâtiment est réalisé à partir de constituants primaires tels que métaux, plastiques, béton, 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 notamment 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.

²⁴¹ Colas / 2003 / La route écologique du futur, analyse du cycle de vie.

Produit	Kg équivalent carbone par tonne
Béton bitumineux	15
Grave bitume 3	13
Enrobé à module élevé	15
Enrobé tiède	14
Grave émulsion	8
Béton bitumineux à froid	10
Grave ciment	14
Grave ciment préfissurée	14
Grave liant hydraulique	6
Grave liant routier préfissurée	6
Béton de ciment (routier)	37
Béton armé continu (routier)	55
Grave non traitée	4
Sol traité liant routier	4
Recyclage en place à chaud (REC)	11
Béton bitumineux avec 10% REC	14
Béton bitumineux avec 20% REC	12
Béton bitumineux avec 30% REC	11
Béton bitumineux avec 50% REC	10
Recyclage en place à l'émulsion	3

Tableau 174 : 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 (les émissions du siège ne sont pas réintégrées au prorata, mais comme pour toute activité industrielle il est peu probable que cela change significativement les valeurs). Incidemment 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 175 : 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), l'autre les poids lourds (PTAC > 3,5 tonnes).

La nomenclature sur laquelle s'appuie l'étude de Colas²⁴² est celle du LCPC²⁴³-SETRA²⁴⁴. 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 176 : 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 en béton armé,
- une structure semi-rigide,
- une structure bitumineuse.

²⁴² Colas / 2003 / La route écologique du futur, analyse du cycle de vie.

²⁴³ LCPC signifie Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

²⁴⁴ SETRA signifie Service d'Etudes techniques des Routes et Autoroutes (Service du Ministère des Transports)

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 susceptibles d'être incertaines de quelques % de ce fait, mais compte tenu des 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		
	Béton armé	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 177 : 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 178 : 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 TC3²⁴⁵.

²⁴⁵ Echanges avec Julien BILAL, Colas, Mai 2004

9.3 Machines & véhicules

9.3.1 Véhicules

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.

Comme nous avons pu le préciser pour d'autres facteurs d'émission, la réalisation d'un Bilan Carbone® de filière serait ici très intéressant et permettrait de préciser le facteur d'émission retenu.

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"²⁴⁶ 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.

²⁴⁶ Publié par Kluwers Academic Publishers, 2004

Fabrication des puces	Par puce	Total Monde	Par ordinateur
Consommation d'électricité (kWh)	2,9	52 000 000 000	281
Consommation directe de combustibles fossiles (GJ)	0,0016	28 000 000	0,155
Consommation globale de combustibles fossiles ²⁴⁷ (kg)	0,97	17 000 000 000	94

Tableau 179 : Type et consommation d'énergie pour la fabrication de puces informatiques

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 EIAJ²⁴⁸, 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 180 : 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.

²⁴⁷ 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

²⁴⁸ 2004 / Université des Nations Unis / Electronic Industry Association of Japan / Eric Williams et R. Kuehr / Computers and the environment ; Understanding and managing their impacts.

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 181 : 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 182 : 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 183 : 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 184 : 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), ni 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 185 : 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 bruns²⁴⁹ 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 186 : Poids moyen des différents matériaux d'un ordinateur et d'une imprimante

Pour les "petites imprimantes", 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, à savoir 30 kg équivalent carbone par unité.

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 ou une grosse imprimante coûte l'équivalent de 5 fois le prix d'une unité centrale d'ordinateur personnel, on pourra lui affecter un facteur d'émission de $5 * 140 = 700$ kg équivalent carbone.

9.3.3.6 Méthode à partir des valeurs d'achat

Sur la base d'un prix moyen d'achat d'un ordinateur à écran plat de 1400 euros HT (valeur constatée sur plusieurs Bilan Carbone®), nous pouvons en déduire un « contenu en gaz à effet de serre » de l'euro dépensé en matériel informatique de 250 grammes équivalent carbone (soit 1400 euros divisés par 350 kg équ. C).

Ce facteur d'émission sera retenu à titre conservatoire pour les approches budgétaires, avec une incertitude de 50%.

9.3.3.7 Matériel de reprographie

Considérant que le matériel de reprographie n'est rien d'autre que du matériel informatique particulier et sur la base des résultats du § précédent, il ressort qu'un photocopieur a un facteur d'émission moyen de 800 kg équivalent carbone, et un télécopieur « moderne » (qui est souvent aussi une imprimante) de 400 kg équivalent carbone.²⁵⁰

²⁴⁹ 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

²⁵⁰ Ces calculs ont été effectués sur la base des coûts moyens comparés par un service achat de grande banque.

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

Philippe BAJEAT - ADEME

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

Hilaire BEWA - ADEME

Julien BILAL - COLAS

Jean-Pierre BIRAT - ARCELOR

Félix BOCQUET - Veuve Clicquot Ponsardin

Luc BODINEAU - ADEME

Jean-Pierre BOURDIER - EDF

Bernard BRESSE - ADEME

Martin BUSSENSCHUTT - EAWAG (équivalent suisse de l'IFEN)

Sandrine CARBALLEES - ADEME

Bernard CARPENTIER - Institut du Végétal

Benoît CARROUEE - PROLEA

Marc CASAMASSIMA - ADEME

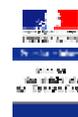
Pierre CELLIER – INRA

Bernard CHABOT – ADEME

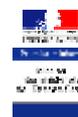
Michel CHAPPAT - Colas France

Jean-Marie CHARLES - DGEMP, Ministère de l'Industrie

Anne CHENE-PEZOT – ADEME



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
Isabelle DEPORTES – ADEME
Hubert DESPRETZ - ADEME
Benjamin DESSUS - CNRS ECODEV
Philippe DESVIGNES - Institut du Végétal
Jean-Marc DOMANGE - Ciments Calcia
Jean-Yves DOURMAD – INRA
Marlène DRESCH - ADEME
Dominique DRON - MIES
Jean-Pierre DULPHY - INRA
Yves EGAL – ORBANIS
Marie FILOTTI - ADEME
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
Joseph KLEINPETER - ASPA Alsace
Pierre-Yves KOEHRER - O2 France
François KORNMAN - Alternconsult
Richard LAVERGNE - Observatoire de l'Énergie, Ministère chargé de l'Énergie.
Nicolas LE BIGOT - Comité des Constructeurs Français d'Automobiles



Hervé LEFEBVRE - ADEME
Afsaneh LELLAHI, Institut du Végétal
Philippe LEONARDON - ADEME
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
Jérôme MOUSSET - ADEME
François MUDRY - Arcelor
Jane NOPPE – ADEME
Sylvie PADILLA - 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
Christine SCHUBETZER - ADEME
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

Francis TROCHERIE – IFEN

Régine TROTIGNON – ADEME

Dominique VEUILLET - ADEME

Eric VIDALENC - ADEME

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 énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants, ECOBILAN (pour l'ADEME et DGEMP), 2002

Bilan énergie et effet de serre des filières céréales, ADEME, 2006

Bilan environnemental des filières végétales pour la chimie, les matériaux et l'énergie, ADEME – BG – EPFL, 2004

Bilan Environnemental du chauffage collectif et industriel au bois, ADEME – Bio Intelligence Service, 2005

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

Comptes des Transports de la Nation

Computers and the environment, R. Kuehr and E. Williams, Kluwers Academic Press, 2004

Creating a standard for a corporate CO₂ indicator, PNUE, 1998

Eco-profil du stockage des déchets dangereux en sites collectifs en France, FNADE/ADEME, 2003

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

Enquête Transports INSEE de 1993

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

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 - Explicit, 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, avril 1997 ; ibid May 1998, ibid 1999

Indicateurs de développement durable, Jancovici pour IFEN, 2004

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 des émissions de HFC utilisés comme fluides frigorigènes, ADEME -ARMINES, Aout 1999

Inventaire environnemental des intrants agricoles en production végétale, Gaillard Gérard, Crettaz Pierre, Heusheer Judith, comptes rendus de la FAT, 1997

Inventaire et prévisions des fluides frigorigènes et de leurs émissions – Année 2000, ADEME -ARMINES, 2002

Inventaire et prévisions des fluides frigorigènes et de leurs émissions – Année 2001, ADEME -ARMINES, 2003

Inventaire national des émissions de gaz à effet de serre, CITEPA, format SECTEN, 2005

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'Energie et des matières premières, Observatoire de l'Energie, édition 2001.

The GHG Indicator : UNEP Guidelines for calculating greenhouse gas emissions for business and non-commercial organisations, Nations Unies, 2000

Transports, Energie, 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

ADEME (www.ademe.fr/auto-diag/transports/car_lab/carlabelling/ListeMarque.asp)

Airbus (www.airbus.com)

Agence Européenne de l'Environnement (www.eea.eu.int).

AMADEUS (www.amadeus.net)

Association européenne des producteurs de plastique - analyses de cycle de vie (lca.apme.org)

Aviation Civile française (www.aviation-civile.gouv.fr)

BOEING (www.boeing.com)

CITEPA (www.citepa.org)

Distance entre deux aéroports (www.landings.com/_landings/pages/search/rel-calc.html)

Distance entre deux villes/Pays (www.dataloy.com)

Distance entre deux villes/Pays (www.wcrl.ars.usda.gov/cec/java/lat-long.htm)

EDF (www.edf.fr)

Emissions de voitures (www.vcacarfueldata.org.uk)

Enerdata (www.enerdata.grenet.fr)

EPA (USA) (www.epa.gov)

Greenhouse Gas Initiative (www.ghgprotocol.org)

Informations sur les cochons (rechamakayajo.qc.ca/crois/croisem.htm)

Informations sur les fromages à pâtes cuites (www.gruyère.com)

Informations sur les moutons (lebulletin.com/archives/0005/0005i.cfm)

INFOTRAFIC (www.infotrafic.com/itineraires/itiselvilles.php)

INSEE (www.insee.fr)

GIEC - International Panel on Climate Change (www.ipcc.ch)

INRA (www.inra.fr)

Ministère Anglais de l'Environnement (www.environment.detr.gov.uk/envrp/gas/index.htm)

Observatoire de l'Énergie de la DGEMP (www.industrie.gouv.fr/energie/sommaire.htm).

Site de référence des viandes rouges (www.mhr-viandes.com)

10.2 Bibliographie générale

10.2.1 - Documents édités par le GIEC

Le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution 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 Press²⁵¹. 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'Étude 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.

²⁵¹ <http://uk.cambridge.org>

10.2.3 - Documents édités par l'ADEME

L'ADEME publie de nombreux documents sur les différentes thématiques abordées dans ce document (transport, industrie, agriculture, bâtiment, etc.)²⁵² et la majorité des études qu'elle réalise sont consultables dans ses centres de documentation (Sites de Paris, Angers et Valbonne²⁵³).

Les documents issus de l'ADEME et cités en bibliographie sont donc disponibles auprès de ces trois centres de documentation.

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

²⁵² Pour consulter l'ensemble des publications de l'ADEME, voir sur le site de l'ADEME :

<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=22125&ref=12441>

²⁵³ Pour les adresses des sites de documentation, voir sur le site de l'ADEME :

<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=13918>

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, tandis que la Suède et la Suisse ont une électricité provenant à peu près pour moitié du nucléaire et pour moitié de l'hydraulique.

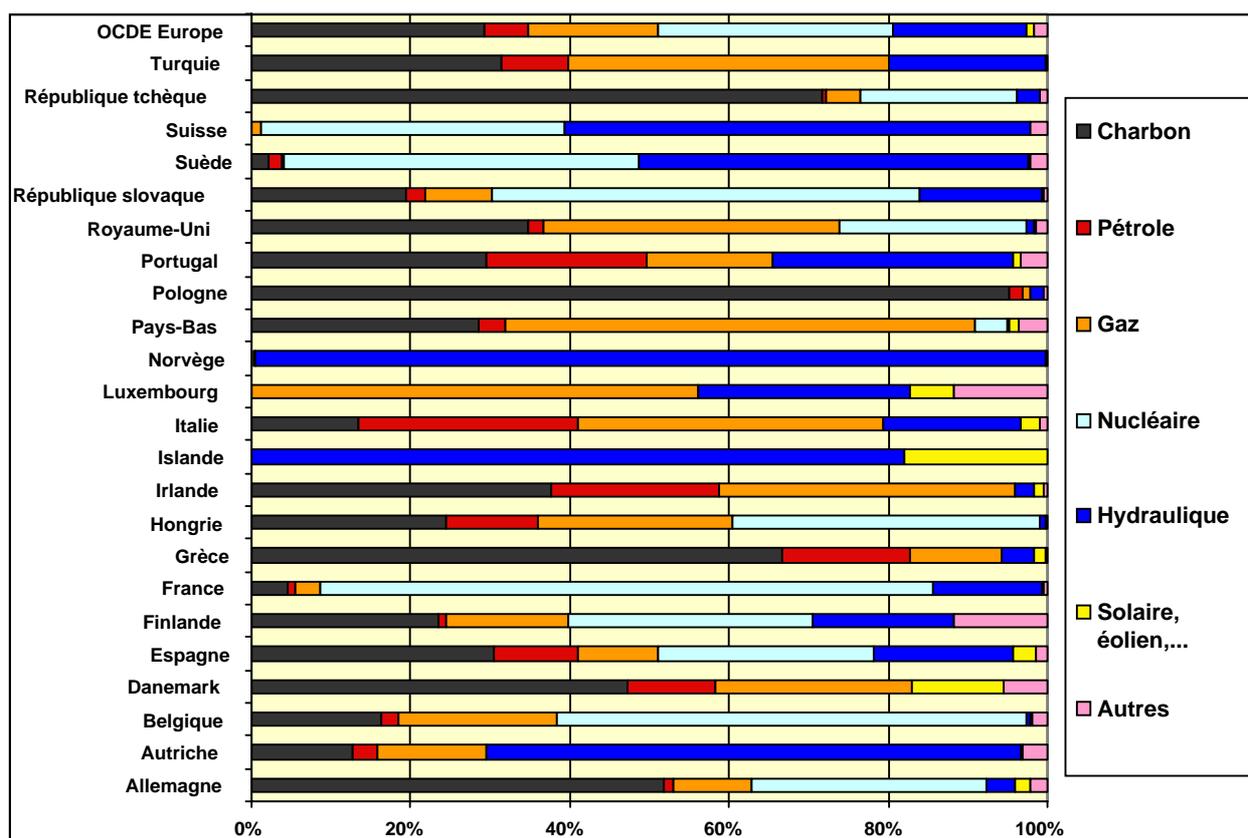


Figure 6 : Répartition par type d'énergie primaire de la production d'électricité en Europe en 2001 (Observatoire de l'Energie)

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 2004 (en kg équivalent carbone par kWh).

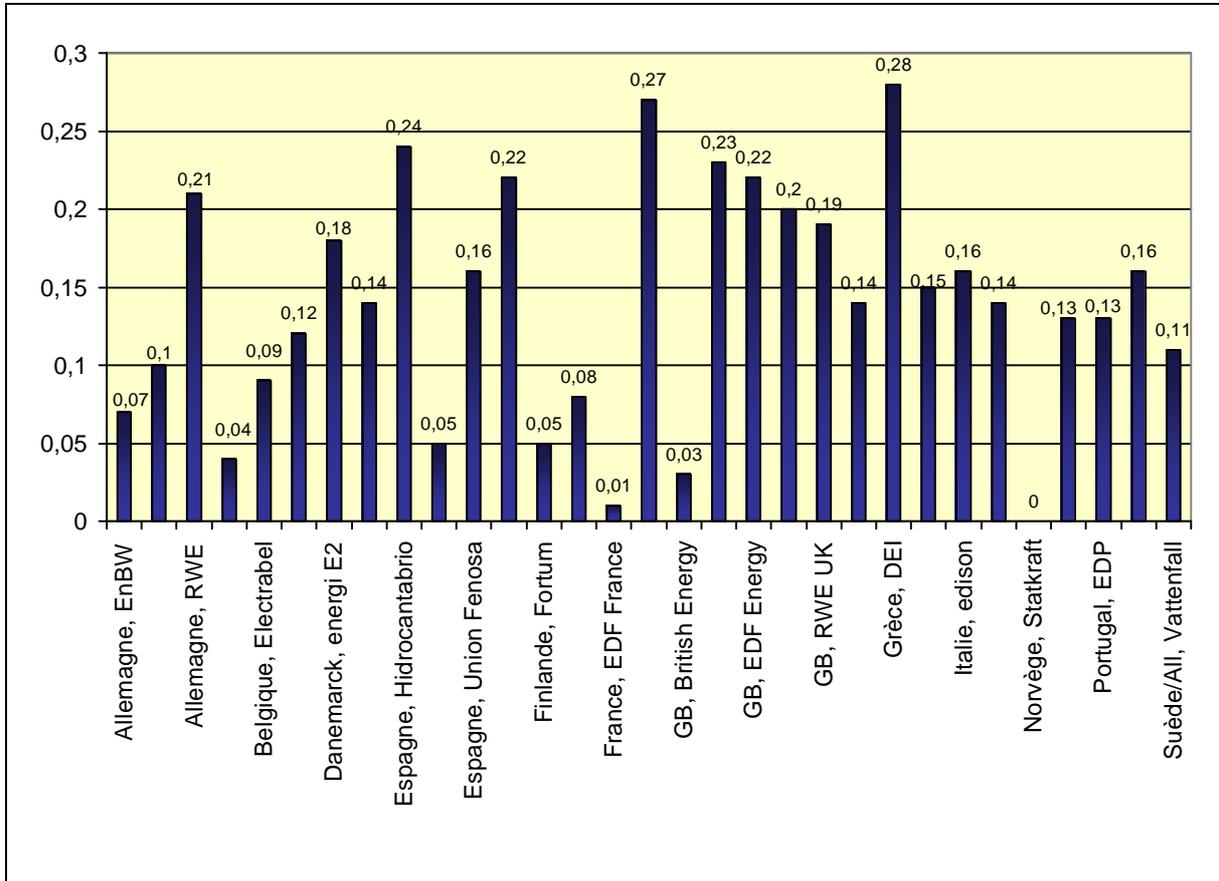


Figure 7 : facteur d'émissions de certains producteurs d'électricité européens
(source PWC_ENERPRESS 2004)

Annexe 2 - Contenu en équivalent carbone du kWh électrique produit par 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 187 : 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 2005 :

mois	g équ. CO2/kWh	g équ. C/kWh
janvier 2005	49	13,4
février 2005	73	19,9
mars 2005	69	18,8
avril 2005	52,8	14,4
mai 2005	33,2	9,1
juin 2005	41,3	11,3
juillet 2005	51,7	14,1
août 2005	28,3	7,7
septembre 2005	44,9	12,2
octobre 2005	50	13,6
novembre 2005	55,8	15,2
décembre 2005	71	19,4

Tableau 188 : Facteurs d'émission mensuels de la production d'électricité d'EDF en 2005

Annexe 3 : Facteurs d'émission de dioxyde de carbone pour les combustibles

NOTE DE L'ADEME DU 8 AVRIL 2005

Cette note présente les différents facteurs à utiliser pour convertir des consommations de combustibles en émissions de CO₂. Nous n'abordons pas l'évaluation des émissions des procédés industriels (décarbonatation de la chaux, ...) ni le contenu en CO₂ du kWh électrique qui fait l'objet d'une note spécifique ADEME/EDF (cf. site Internet effet de serre : www.ademe.fr, rubrique changement climatique).

Les facteurs d'émission de CO₂ se déterminent à partir de la composition physique du combustible consommé et de son pouvoir calorifique. Il existe aujourd'hui plusieurs sources relatives aux facteurs d'émission en CO₂ des différents combustibles consommés :

- Les facteurs d'émission publics recommandés par le GIEC (www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/public.htm),
- Les facteurs d'émission utilisés par le CITEPA²⁵⁴ pour les inventaires annuels officiels approuvés par les pouvoirs publics et transmis aux Nations Unies, élaborés à partir des facteurs du GIEC avec des corrections pour tenir compte des spécificités nationales,.
- Les facteurs d'émission utilisés dans le cadre des protocoles internationaux (GHG protocole...), du guide communautaire de reporting des émissions pour la directive quota, des travaux ISO en cours...
- Dans l'industrie pour certains secteurs, les industriels peuvent avoir leurs propres facteurs d'émission surtout pour des combustibles spécifiques.

La règle générale qui prévaut à l'établissement de bilans d'émission est la suivante :

- Utiliser en priorité (pour l'industrie), des facteurs d'émission spécifiques relatifs à des installations individuelles dès lors qu'ils peuvent être justifiés,
- Utiliser des facteurs d'émissions spécifiques nationaux : pour la France, on dispose de ceux du CITEPA pour l'élaboration des inventaires officiels,
- Dans les cas où ces facteurs d'émission ne sont pas adaptés, utiliser les facteurs d'émission des instances internationales (GIEC par exemple).

Pour assurer une certaine cohérence dans les évaluations CO₂ au sein de l'Agence et pour produire des chiffres comparables avec les inventaires CO₂ officiels réalisés par le CITEPA, nous proposons d'utiliser les facteurs d'émission nationaux du CITEPA.

²⁵⁴ CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'étude de la Pollution Atmosphérique

Les coefficients présentés ci-dessous sont issus du questionnaire de déclaration annuelle des émissions polluantes de 200 des installations classées soumises à autorisation. Les coefficients d'émission sont exprimés en kilogramme de CO₂ par giga Joule de combustible, facteur d'oxydation compris. Le CITEPA indique également le PCI de chacun des combustibles en giga Joule par tonne. A partir de ces informations, un contenu en CO₂ de la tep (et du kWh) de combustible a été déterminé.

Ces coefficients sont donnés pour les principaux combustibles ; la liste détaillée des coefficients figure en fin de cette note.

	kgCO ₂ /GJ	PCI (GJ/tonne)	kgCO ₂ /tep (PCI)	gCO ₂ /kWh
Essence	73	44	3 066	264
Gazole/FOD	75	42	3 150	271
Fuel lourd	78	40	3 276	282
Gaz naturel	57	49,6	2 394	206
Kérosène	74	44	3 108	267
Charbon	95	26	3 990	343
GPL	64	46	2 688	231
Déchets ménagers	41,3	8,8	1734,6	149

Source : MEDD, questionnaire de déclaration annuelle des émissions polluantes 2005 des installations classées soumises à autorisation

Tableau 189 : Coefficients d'émission pour les principaux combustibles

Précisions relatives à la prise en compte des émissions de CO₂ du bois et des déchets ménagers dans l'inventaire des émissions de GES au titre de la convention cadre des Nations-Unies sur le changement climatique (Format UNFCCC/CRF)

Les émissions de CO₂ liées à la combustion de la biomasse s'inscrivent dans le cycle naturel du carbone : le carbone présent dans l'atmosphère est capté par la biomasse végétale par photosynthèse, puis rejeté dans l'atmosphère par décomposition ou combustion.

Dans l'inventaire UNFCCC, on comptabilise d'abord le stock de carbone constitué par l'accroissement de biomasse au cours de l'année considérée et ensuite, on lui retranche la quantité de carbone relative aux émissions de CO₂ dues à la combustion de la biomasse.

En France et en Europe, la forêt étant gérée durablement, elle s'accroît et joue donc le rôle de puit de carbone : la fixation de CO₂ par photosynthèse (accroissement biologique de la forêt + plantations artificielles) est supérieure aux émissions dues à la décomposition et à la combustion.

Les organismes qui réalisent les inventaires utilisent les facteurs d'émission joints en fin de note pour la biomasse.

Néanmoins, le bilan étant finalement neutre pour l'effet de serre, il faut utiliser un facteur d'émission nul pour les émissions de CO₂ liées à la combustion de biomasse dans nos évaluations.

Par exemple :

1. Le contenu en CO₂ à considérer pour la combustion du bois doit être nul.

Dans le tableau qui suit vous trouverez un coefficient d'émission non nul pour le bois, coefficient utilisé pour la construction de l'inventaire.

2. L'incinération de la fraction organique des déchets ménagers étant assimilée à la combustion de biomasse, le facteur d'émission pour l'incinération des ordures ménagères mentionné dans le tableau ci-dessous ne concerne que la fraction inorganique, qui représente 43% du contenu en carbone des déchets ménagers. En fin de note, le contenu en carbone de 96 (kgCO₂/GJ) fait référence à l'ensemble du contenu en carbone des déchets ménagers (organique et inorganique).

LISTE DES COEFFICIENTS

 Source : MEDD, questionnaire de déclaration annuelle des émissions polluantes 2005
des installations classées soumises à autorisation

*Facteur d'oxydation inclus

CODE	LIBELLE	PCI (Gj/t)	FACTEUR D'EMISSION * (kgCO2/GJ)	ISSU DE LA BIOMASSE
101	Charbon à coke (PCS>23 865 kJ/kg)	26	95	NON
102	Houille (PCS>23 865 kJ/kg)	26	95	NON
103	Charbon sous-bitumineux (17 435 kJ/kg<PCS<23 865 kJ/kg)	26	96	NON
104	Agglomérés (provenant de houille ou sous bitumeux)	32	95	NON
105	Lignite (PCS<17 435 kJ/kg)	17	100	NON
106	Brique de lignite	17	98	NON
107	Coke de houille	28	107	NON
108	Coke de lignite	17	108	NON
110	Coke de pétrole	32	96	NON
111	Bois et déchets assimilés	18,2 (sec à l'air)	92	OUI
112	Charbon de bois	32,5	100	OUI
113	Tourbe	11,6	110	NON
114	Ordures ménagères	8,8 (très variable)	96	OUI
115	Déchets industriels solides	12,5 (très variable)		OUI
116	Déchets de bois (sauf déchets assimilés au bois)	18,2 (très variable)	92	NON
117A	Déchets agricoles / Farines animales	18,2	91	OUI
1170	Déchets agricoles (autres que farines animales)	14 (pailles)	99	OUI
118	Boues d'épuration des eaux	très variable	15	OUI
119	Combustibles dérivés de déchets	spécifique		NON
120	Schistes	9,4	106	NON
121A	Autres combustibles solides / Pneumatiques	26	85	NON
121B	Autres combustibles solides / Plastiques	23	75	NON
1210	Autres combustibles solides (autres que pneumatiques et plastiques)			NON
201	Pétrole brut	42	73	NON
203	Fioul lourd	40	78	NON
204	Fioul domestique	42	75	NON
205	Gazole	42	75	NON
206	Kérosène	44	74	NON
207	Carburéacteur	44	71	NON
208	Essence moteurs terrestres	44	73	NON
209	Essence aviation	44	73	NON
210	Naphta	45	73	NON
211	Huile de schiste	36	73	NON
212	Huile usée de moteur à essence		73	NON
213	Huile usée de moteur diesel		73	NON
214A	Solvant usagé / Solvant type G3000	25,6	70	NON
2140	Solvant usagé (autres que solvant type G3000)	très variable		NON
215	Liqueur noire		105	OUI
216	Mélange de fioul et de charbon			NON
217	Produit d'alimentation de raffineries	très variable		NON
218	Autres déchets liquides			NON
219	lubrifiants	40,2 (très variable)	73	NON
220	White spirit	41,9	73	NON
221	Paraffines			NON
222	Bitumes	40	40	NON
224	Autres produits pétroliers (graisses, aromatiques, etc.)	40,2	73	NON
225	Autres combustibles liquides			NON
301	Gaz naturel	49,6 (dépend du type)	57	NON
302	Gaz naturel liquéfié	49,6	57	NON
303	Gaz de pétrole liquéfié (GPL)	46 (variable)	64	NON

Bilan Carbone® « entreprises » et « collectivités »

CODE	LIBELLE	PCI (Gj/t)	FACTEUR D'EMISSION * (kgCO2/GJ)	ISSU DE LA BIOMASSE
304	Gaz de cokerie	31,5 (très variable)	47	NON
305	Gaz de haut fourneau	2,3	268	NON
306	Mélange de gaz de cokerie et de gaz de haut-fourneau			NON
307	Déchets industriels gazeux (en particulier industrie chimique)	très variable		NON
308	Gaz de raffinerie / pétrochimie (non condensable)		56	NON
309	Biogaz	14	75	OUI
310	Gaz de décharge	très variable		OUI
311	Gaz d'usine à gaz		52	NON
312	Gaz d'aciérie	6,9	183	NON
313	Hydrogène	120	0	NON
314	Autre combustible gazeux	spécifique		NON

Annexe 4 : Note de cadrage sur le contenu CO₂ du kWh par usage en France

NOTE DE L'ADEME DU 14 JANVIER 2005

1. Le contexte

L'évaluation du contenu en carbone de l'électricité représente en France un enjeu important pour l'évaluation des actions dans le domaine de la lutte contre le changement climatique. Si pour bon nombre de pays, cette question ne soulève pas de difficulté majeure, elle est complexe à démêler dans notre pays compte tenu de la spécificité du secteur électrique français.

En effet, en France, le contenu en carbone de l'électricité à la production varie fortement selon que l'on considère la moyenne annuelle sur l'ensemble des moyens de production France, les émissions des seuls parcs hydrauliques et nucléaires (sans émissions), ou la production du parc de centrales au charbon (de l'ordre de 900 gCO₂/kWh). Ceci conduit de fait, en France, à des variations hor-saisonniers importantes du contenu en CO₂ du kWh, tandis que dans les autres pays européens, cette dispersion est limitée dans la mesure où la production d'électricité à partir de centrales thermiques à combustibles fossiles représente une partie importante de la production en base.

De plus, dans la mesure où les moyens émetteurs (centrales thermiques à flamme) fonctionnent en « terme de bouclage » de l'équilibre offre-demande France, la moyenne nationale varie assez sensiblement en fonction des conditions de température et des caractéristiques de fonctionnement du parc. Après avoir tendanciellement diminué depuis 1990, le contenu en CO₂ de l'électricité évolue désormais dans une fourchette de 60 à 120 gCO₂/kWh, bien inférieure à la moyenne européenne (environ 340 gCO₂/kWh).

En conséquence, l'approche, par un seul indicateur, du contenu CO₂ moyen du kWh français s'est révélée insuffisante, et la volonté d'un certain nombre d'acteurs a été d'utiliser des contenus CO₂ différenciés par usage.

Cependant sur le réseau, les électrons sont totalement indifférenciés. Ainsi, la question consistant à rechercher la centrale de production qui alimente tel utilisateur n'a pas de sens d'un point de vue physique. Le calcul d'un contenu en CO₂ par usage relève donc nécessairement de simplifications méthodologiques et de conventions, qu'il convient de bien expliciter pour en connaître les limites et éviter d'en faire un sujet de controverses.

Cette problématique, et plus particulièrement la question du contenu en CO₂ du chauffage électrique fait partie des sujets retenus dans les conventions entre l'ADEME et EDF. Dans ce cadre, un consensus a émergé entre les deux partenaires pour élaborer conjointement une méthodologie d'évaluation du contenu CO₂ du kWh par usage ainsi que pour publier des résultats communs.

2. La méthode

Un travail commun a donc été entrepris entre l'ADEME et EDF depuis l'été 2003, qui a permis d'aboutir à des conventions, une méthodologie et des résultats partagés.

Les grands principes qui ont guidé ce travail ont été les suivants :

- Choix d'une méthode qui respecte le critère d'additivité, c'est à dire que, sur une année, la somme des émissions de CO₂ de l'ensemble des différents usages est égale (ni plus, ni moins) au total des émissions du parc de production.
- Choix d'une méthode basée sur les données historiques partagées. La période retenue (1998-2003) est volontairement longue afin de gommer les variations dues à des situations particulières, aussi bien en terme de fonctionnement du parc qu'en terme de climatologie.
- Le périmètre retenu est celui de la France continentale hors production auto consommée : il ne s'agit pas ici d'évaluer le kWh d'un acteur particulier dans l'objectif d'une démarche commerciale mais bien de définir le contenu d'un kWh consommé sur notre territoire, afin d'aider à la mise en œuvre de politiques publiques au niveau français.
- Utilisation de données au pas mensuel : d'une part la « variance » du contenu CO₂ est en grande partie expliquée par la composante saisonnière (par opposition aux variations horaires au sein d'une semaine) et d'autre part, les études à pas de temps plus fin sont moins robustes et difficilement reproductibles.

Plus précisément, la méthode a consisté pour chaque type de production (nucléaire, lac, énergies renouvelables, charbon, fuel et cogénération) à séparer la production entre une fraction en base (environ 400 TWh annuels) et une fraction saisonnalisée (environ 100 TWh), afin de calculer le contenu CO₂ de chacune de ces deux composantes de la production. Les deux valeurs correspondantes sont en moyenne respectivement de 40 et 180 gramme par kWh livré à l'utilisateur final²⁵⁵.

Concernant la consommation, l'étude a conduit à identifier un coefficient de saisonnalisation à chaque usage. Ainsi, on considère que le chauffage électrique est saisonnalisé à 100 %, mais l'industrie à 10% seulement. Afin d'affecter à chaque usage un contenu CO₂, les valeurs des deux composantes de production obtenues précédemment ont été pondérées pour chaque usage par le coefficient de saisonnalisation : pour le chauffage on obtiendra une valeur identique à la composante saisonnalisée tandis que pour l'industrie elle sera calculée en prenant 10% de la valeur saisonnalisée et 90% de la valeur en production de base, etc.

La combinaison de ces deux approches sur des données mesurées permet de tenir compte à la fois des caractéristiques intrinsèques à chaque usage, et de l'adaptation du système de production à ces usages.

3. Les résultats

Les résultats permettent de distinguer **4 niveaux d'émissions** par usages.

Ces 4 indicateurs offrent une vision facilement partageable pour les utilisations les plus courantes. Ils se fondent sur un lot d'indicateurs détaillés (cf. annexe) qui peuvent être utilisés pour des besoins plus précis.

- L'usage de l'électricité pour le **chauffage** résidentiel et tertiaire (chauffage électrique et pompes de circulation des chaudières fuel et gaz), exclusivement hivernal, se voit attribuer le contenu CO₂ de la production saisonnalisée, à savoir **180 g/kWh**
- L'**éclairage**, qu'il soit résidentiel, tertiaire, public ou industriel a un contenu CO₂ d'environ **100 g/kWh**

²⁵⁵ Les émissions de CO₂ sont ramenées à la quantité d'électricité servie par le réseau après déduction des consommations du système électrique. Le contenu en CO₂ du solde import/export (de 58 à 77 TWh) est conventionnellement affecté d'une valeur correspondant à la production en base du parc électrique français.

- Les usages résidentiels (**cuisson, lavage et produits bruns**), les usages tertiaires et industriels autres que l'éclairage ont une consommation qui suit la courbe de charge globale et se voient donc attribuer un contenu CO₂ à peu près égal à la moyenne nationale à savoir environ **60 g/kWh**
- Enfin, les autres usages de base (**froid, ECS, autres usages résidentiels, agriculture, transports, BTP et armées**), dont les variations ne suivent pas le rythme des saisons et la **climatisation dans le secteur tertiaire** (dont la saisonnalité est inversée par rapport au cycle de production électrique) se voient affecter un contenu en CO₂ d'environ **40 g/kWh**.

Ces indicateurs sont des moyennes pondérées sur la période d'analyse. Ils se situent dans des plages de variation parfois importantes, comme pour l'éclairage résidentiel où l'indicateur varie d'une valeur de 93 à 151 gCO₂/kWh pour la période 1998-2003.

Ceci retrace la variabilité du contenu en CO₂ de l'électricité produite, elle-même en rapport avec trois paramètres majeurs : les aléas climatiques, la disponibilité des modes de production (en particulier de l'hydraulique et du nucléaire) et l'équilibre de gestion dans l'appel des différents modes de production. Malgré une analyse approfondie, aucune corrélation simple n'a pu être mise en évidence entre ces facteurs et le nombre de données disponibles est trop faible pour rechercher des corrélations plus élaborées

4. L'utilisation des résultats et leur domaine de validité

Ces résultats étant désormais partagés et validés, le cadre d'application défini de manière concerté est le suivant :

- Ils ont vocation à être utilisés par l'ADEME et par EDF pour rendre compte de l'impact en termes d'effet de serre lors de *l'évaluation de projets au niveau local*.
- Ils seront notamment utilisés par l'ADEME pour l'instruction et le suivi des projets visant à promouvoir ou à mettre en œuvre des actions de maîtrise de l'énergie, de développement des énergies renouvelables et de politique énergétique locale en collaboration avec les collectivités territoriales et/ou en concertation avec les opérateurs énergétiques locaux.
- Ces résultats ont été présentés, au niveau national, aux autorités compétentes pour contribuer à l'émergence d'un référentiel national utilisable dans le cadre des *politiques publiques*
- Ces chiffres n'ont pas d'incidence sur les quotas de CO₂ attribués aux entreprises dans le cadre du PNAQ. Celui-ci ne considère en effet que les émissions directes.

Ces indicateurs, établis sur une référence historique, correspondent à la meilleure estimation existante à ce jour.

En toute rigueur, pour estimer l'impact de projets ou de programmes ayant des durées de vie ou des périodes d'action dépassant 10 ou 15 ans, il faudrait employer une méthode tenant compte des évolutions futures dans la structure de production et des changements de profils de consommation. Dans l'attente de disposer de ces évaluations prospectives, ces indicateurs seront utilisés pour le moyen terme, en veillant à les réactualiser périodiquement (tous les quatre ans).

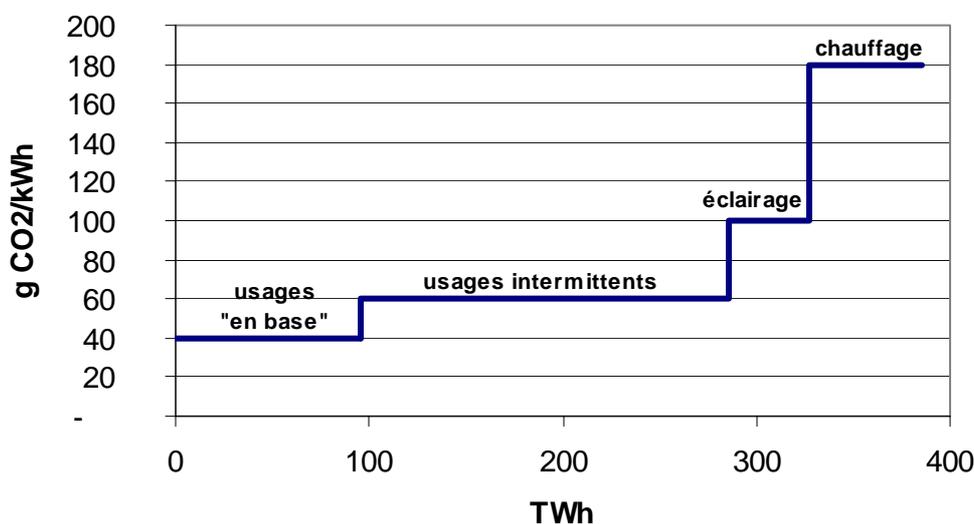
Par ailleurs, un travail méthodologique sur une évaluation prospective du contenu CO₂ des usages sera entrepris dans le cadre de la convention ADEME/EDF 2004-2007.

Enfin, une évaluation sera parallèlement réalisée pour mettre au point des indicateurs de CO₂ évité par le développement des productions d'électricité d'origines renouvelables (éolien, hydraulique, photovoltaïque, bois...).

TABLEAU DES RESULTATS DETAILLES PAR USAGE
**Indicateurs de contenu en CO₂ de l'électricité consommée en France
(en g de CO₂/kWh_e)**

indicateurs détaillés	Référence (valeur moyenne)	à titre indicatif : plages de variation	indicateurs simplifiés	
chauffage+ pompes de circ.	180	129 à 261	180	Chauffage
éclairage résidentiel	116	93 à 151	100	Eclairage
éclairage tertiaire	80	64 à 88		
éclairage public et industriel	109	85 à 134		
usages résidentiels : cuisson	82	66 à 93	60	Usages intermittents
usages résidentiels : lavage	79	63 à 88		
usages résidentiels : produits bruns	62	50 à 81		
usages tertiaires : autres	52	41 à 77		
usages industriels (hors éclairage)	55	38 à 86		
usages résidentiels : ECS	40	20 à 72	40	Usages "en base"
usages résidentiels : froid	40			
usages résidentiels : autres	39			
usages tertiaires : climatisation	37			
agriculture-transport	38			
autres (BTP, recherche, armée, etc.)	35			

source : ADEME et EDF, 2004

Indicateurs CO₂ et volumes de consommation


Annexe 5 : 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 190 : Répartition des surfaces agricoles nationales cultivées

Annexe 6 : 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	0,22
déjections	0,05
Supplément pour chauffage etc	0,02
total	0,30
Kg équ. C par kg de viande avec os	0,45

Tableau 191 : Facteur d'émission de la dinde industrielle

Ce calcul aboutit à la valeur de **450 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 "méthanogenèse" des déchets est par ailleurs 2,5 fois plus forte²⁵⁶.

Le ratio poids utile/poids vif est supposé être de 66%.

CANARDS ET PINTADES	Kg équivalent carbone par kg de poids vif
aliments	0,28
déjections	0,07
Supplément pour chauffage etc	0,02
total	0,38
Kg équ. C par kg de viande avec os	0,58

Tableau 192 : 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 **580 kg équivalent carbone par tonne de canard avec os**.

²⁵⁶ Académie d'Agriculture / 1999 / Bilan et gestion des Gaz à effet de serre dans l'espace rural / Compte rendu / vol. 85.

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. Par contre nous avons supposé l'absence de bâtiment chauffé.

Le ratio poids utile/poids vif est supposé être de 66%.

POULETS FERMIERS	Kg équivalent carbone par kg de poids vif
aliments	0,31
déjections	0,11
total	0,42
Kg équ. C par kg de viande avec os	0,64

Tableau 193 : Facteur d'émission des poulets fermiers

Cela aboutit à la valeur de **640 kg équivalent carbone par tonne de poulet fermier avec os.**

PINTADES FERMIÈRES	Kg équivalent carbone par kg de poids vif
aliments	0,38
déjections	0,11
total	0,48
Kg équ. C par kg de viande avec os	0,73

Tableau 194 : Facteur d'émission des pintades fermières

Cela aboutit à la valeur de **730 kg équivalent carbone par tonne de pintade fermière avec os.**

Annexe 7 - 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 Logement²⁵⁷. 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".

²⁵⁷ Communication personnelle avec M. Roland Curtet en novembre 2002

1 - Camionnettes de PTAC < à 1,5 t

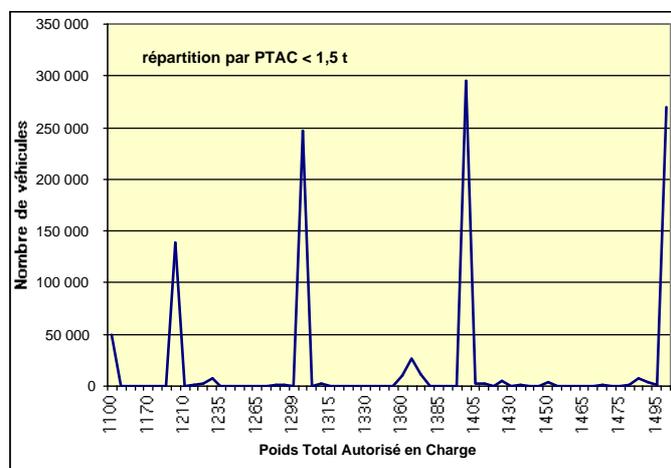


Figure 8 : Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de moins de 1.5 t de PTAC

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

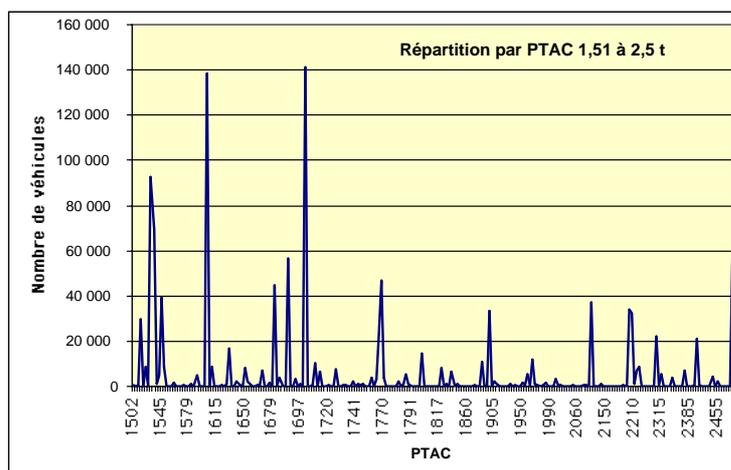


Figure 9 : Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 1.5 t à 2.5 t de PTAC

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

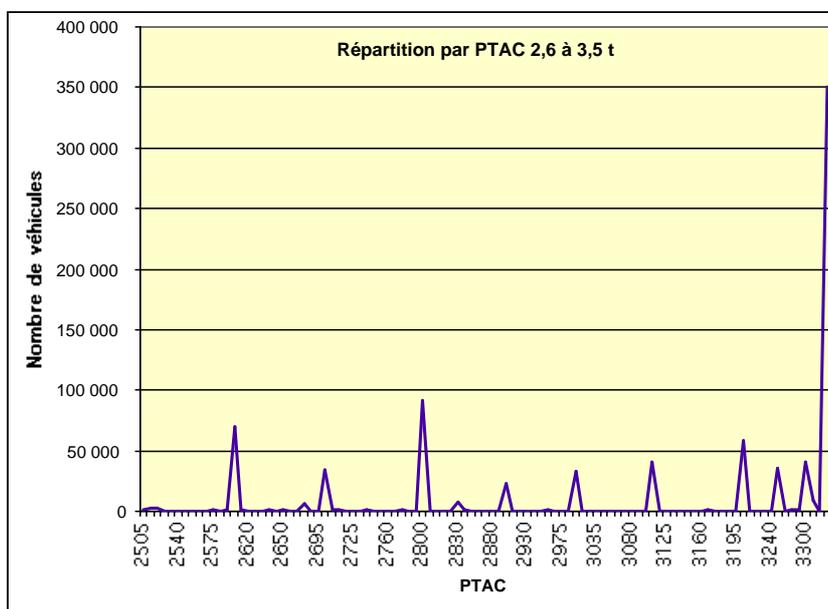


Figure 10 : Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 2.5 t à 3.5 t de PTAC

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

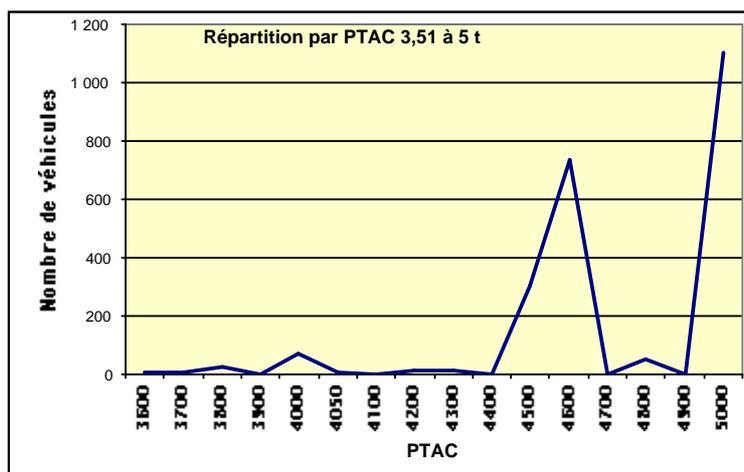


Figure 11 : Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 3.51 t à 5 t de PTAC

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

5 - Camions de PTAC compris entre 5,1 et 6 t

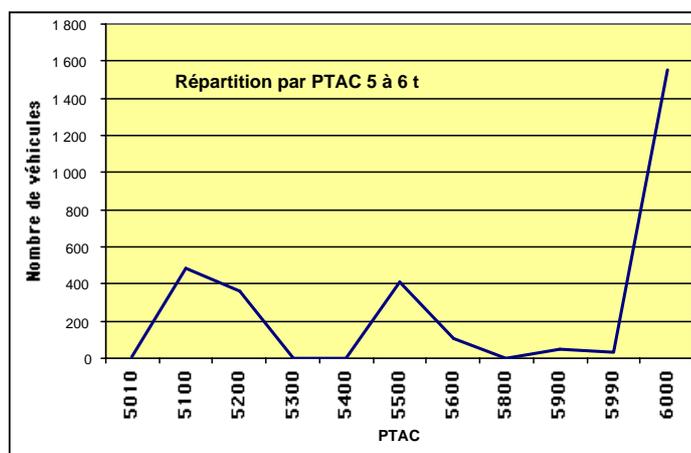


Figure 12 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 5,1 t à 6 t de PTAC

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

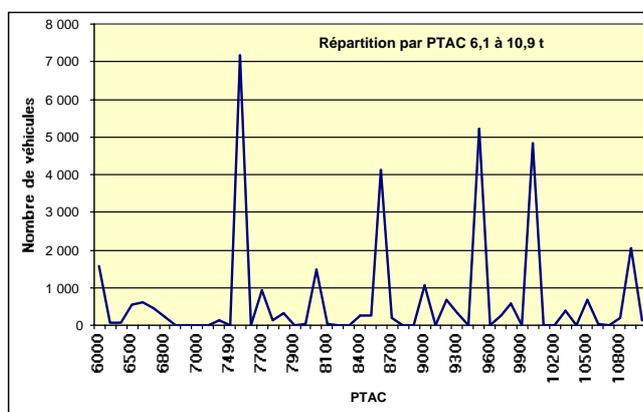


Figure 13 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 6.1 t à 10.9 t de PTAC

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

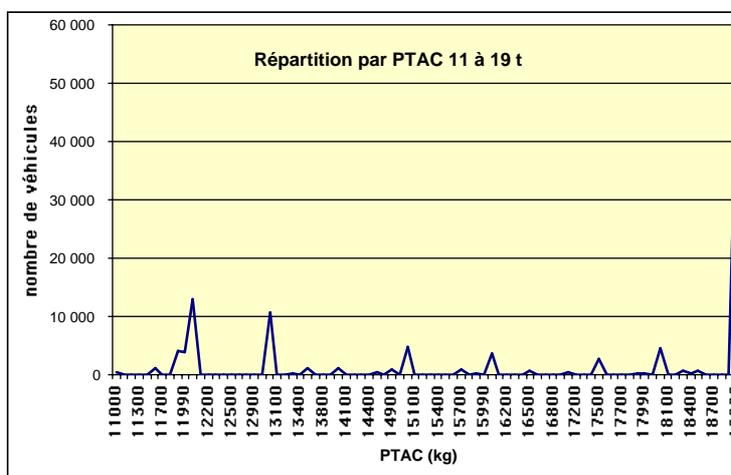


Figure 14 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 11 t à 19 t de PTAC

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

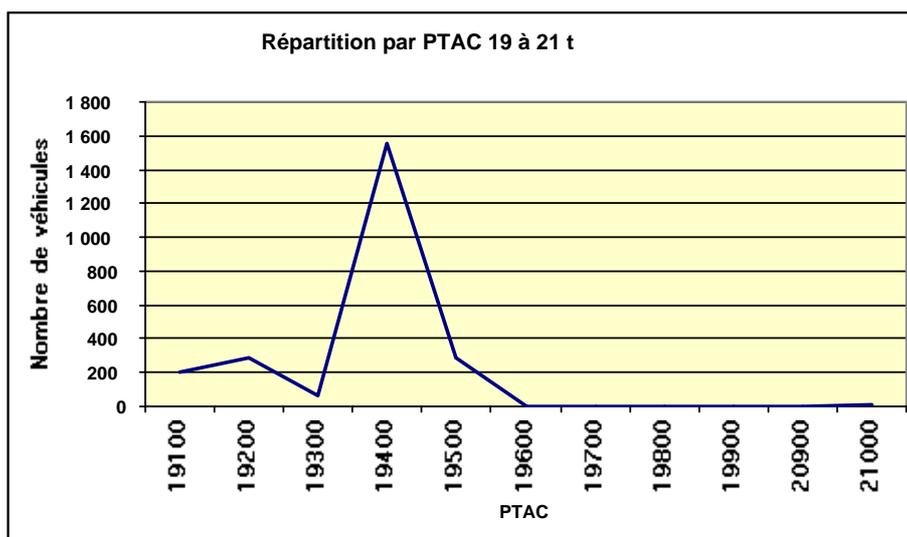


Figure 15 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 19.1 t à 21 t de PTAC

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 32,6 t

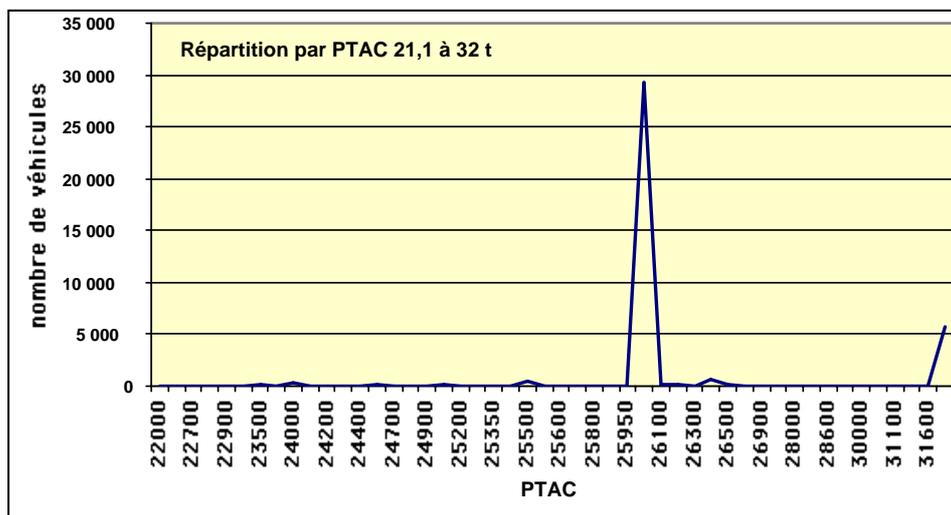


Figure 16 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 21.1 t à 32,6 t de PTAC

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

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

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 8 - 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) ²⁵⁸	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 195 : 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

²⁵⁸ Estimation personnelle de J-M. JANCOVICI

sur la moyenne, ce qui est finalement beaucoup au vu des variations sur les consommations réelles données par l'Observatoire de l'Energie) l'incertitude totale sur les émissions par km parcouru ressort à 10% environ.

Il est remarquable de noter que les émissions ainsi calculées, en agrégeant fabrication du véhicule, extraction, raffinage et transport des carburants, et en redressant les consommations pour les faire "coller" au mieux aux consommations réelles (mais sans prise en compte de l'entretien), induisent une multiplication par 1,5 des émissions "constructeur", en ordre de grandeur. Le Citroën Berlingo 1.1i, par exemple (5 CV fiscaux), est donné par le constructeur pour 160 g de CO₂ par km en parcours mixte, tandis que la moyenne calculée pour cette catégorie, pour le même type de parcours, ressort à 250 g équ. CO₂ par km (67,8 g équ. C), soit 55% de plus.

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) ²⁵⁹	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 196 : 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*.

²⁵⁹ Estimation personnelle de J-M. JANCOVICI

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) ²⁶⁰	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 197 : 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.

²⁶⁰ Estimation personnelle de J-M. JANCOVICI

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) ²⁶¹	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 198 : 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) ²⁶²	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

²⁶¹ Estimation personnelle de J-M. JANCOVICI

²⁶² Estimation personnelle de J-M. JANCOVICI

Tableau 199 : Facteurs d'émission des véhicules de 6 à 10 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué

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) ²⁶³	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 200 : Facteurs d'émission des véhicules de plus de 11 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué

²⁶³ Estimation personnelle de J-M. JANCOVICI

Annexe 9 - 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

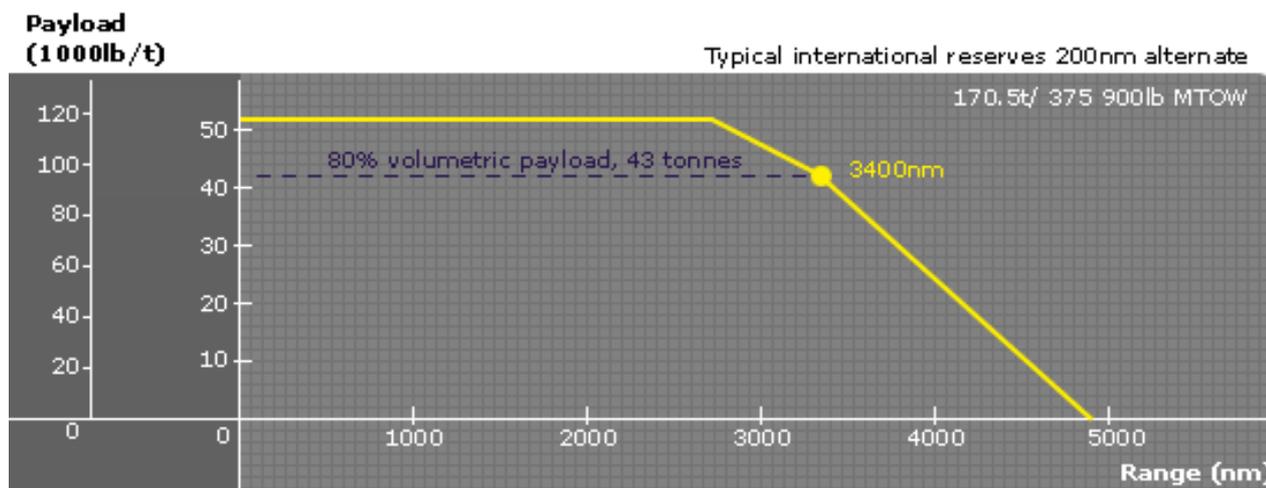


Figure 17 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A300 version fret

1.2 A310

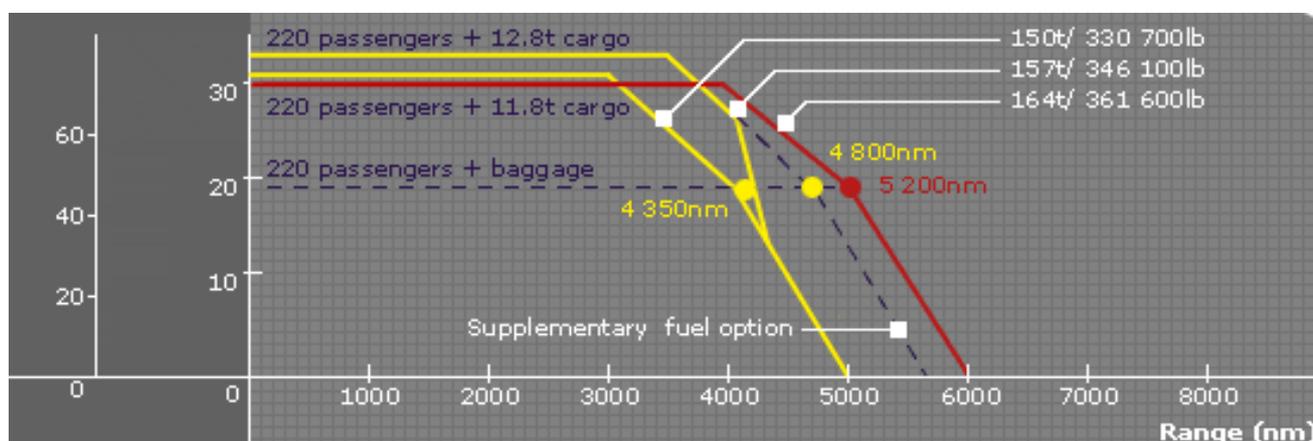


Figure 18 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A310

1.3 A318

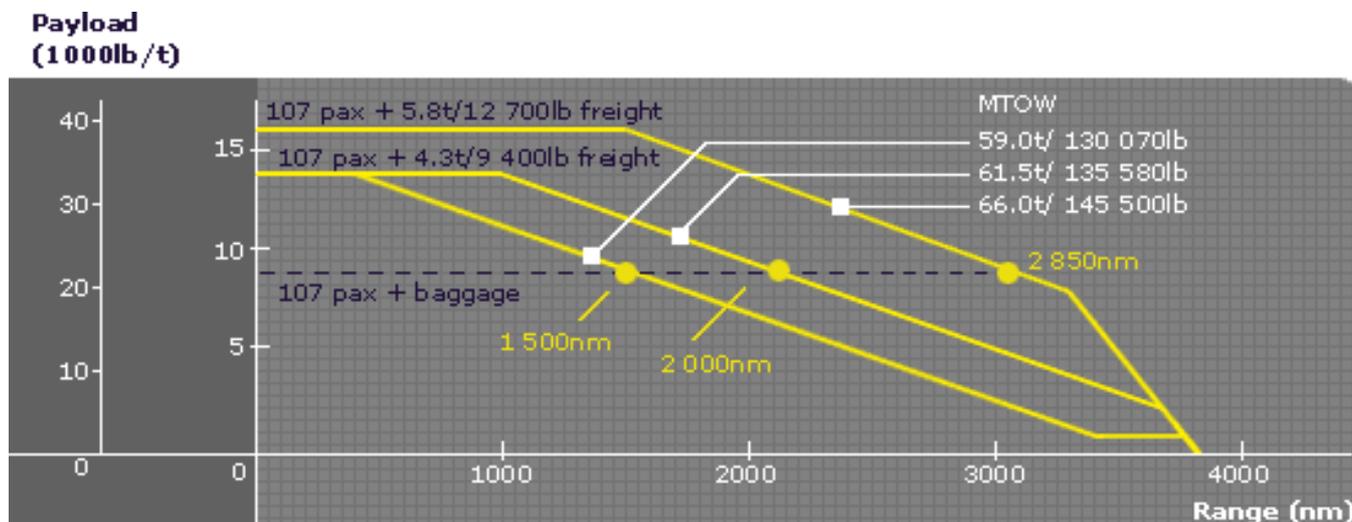


Figure 19 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A318

1.4 A319

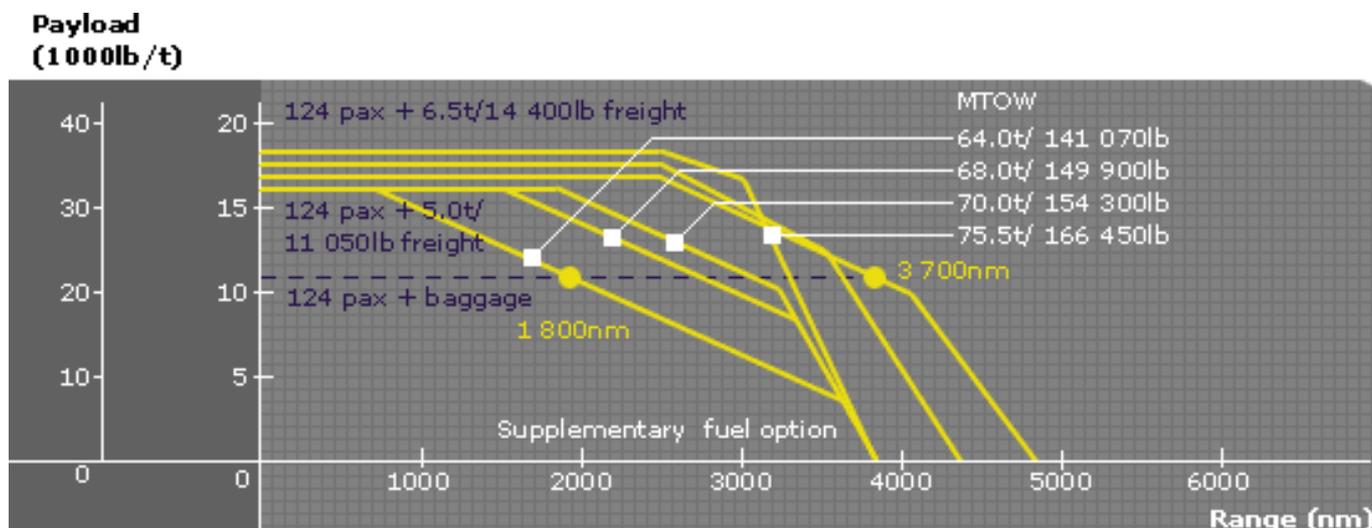


Figure 20 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A3109

1.5 A320

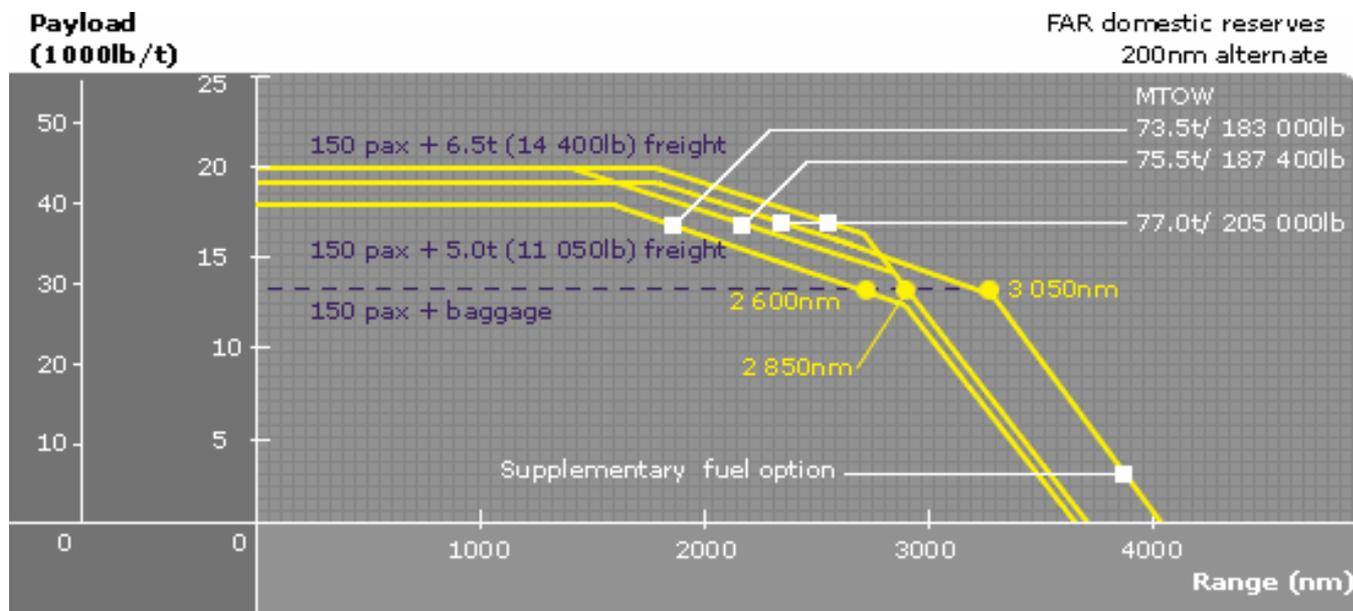


Figure 21 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A320

1.6 A330-200

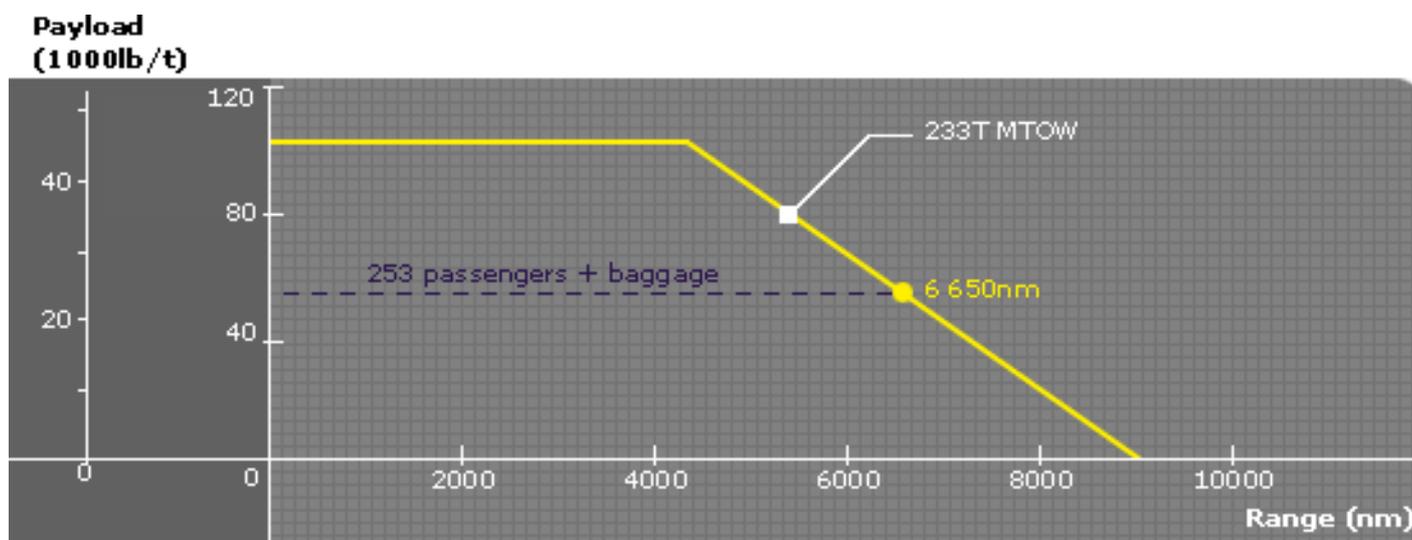


Figure 22 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A330-200

1.7 A330-300

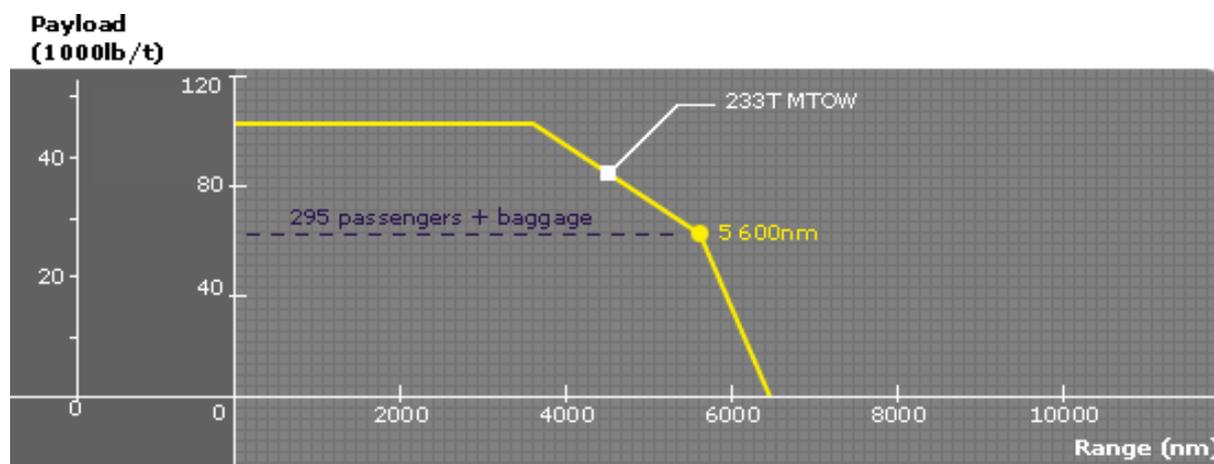


Figure 23 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A330-300

1.8 A340-200

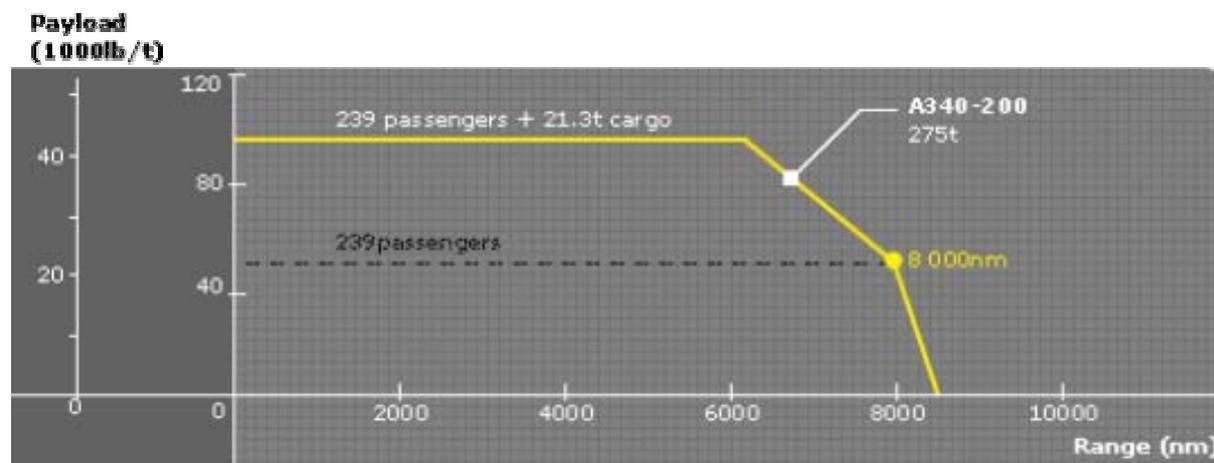


Figure 24 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-200

1.9 A340-300

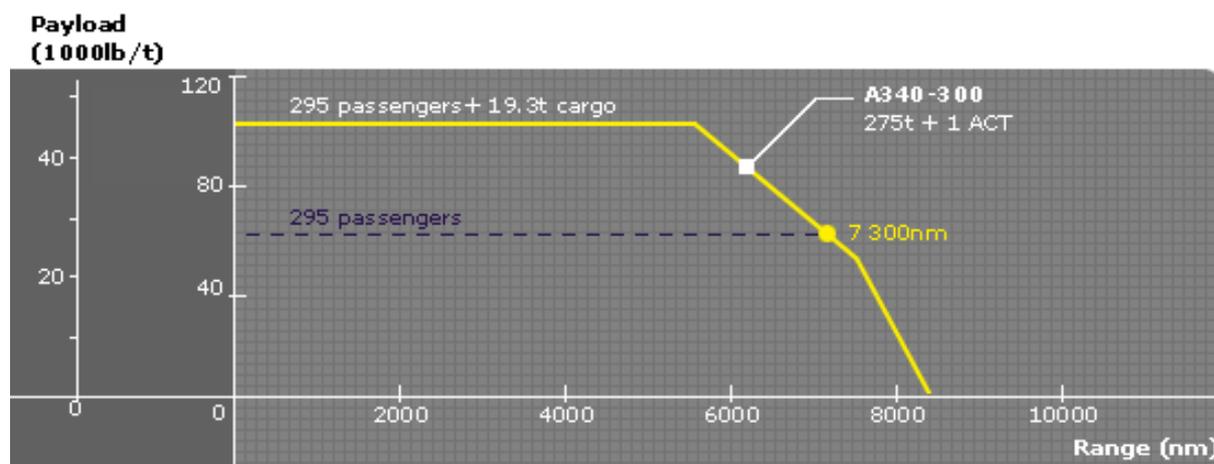


Figure 25 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-300

1.10 A340-500

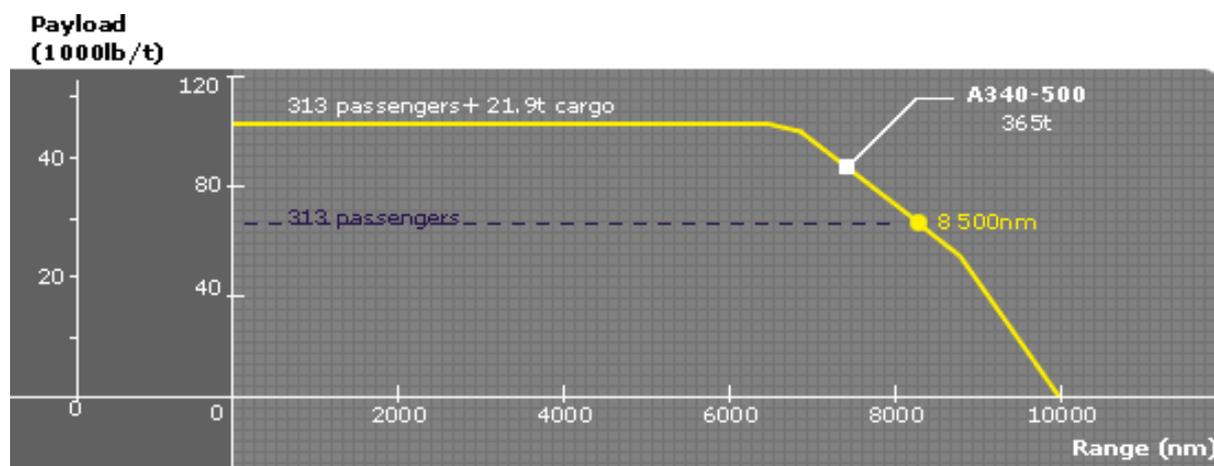


Figure 26 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-500

1.11 A340-600

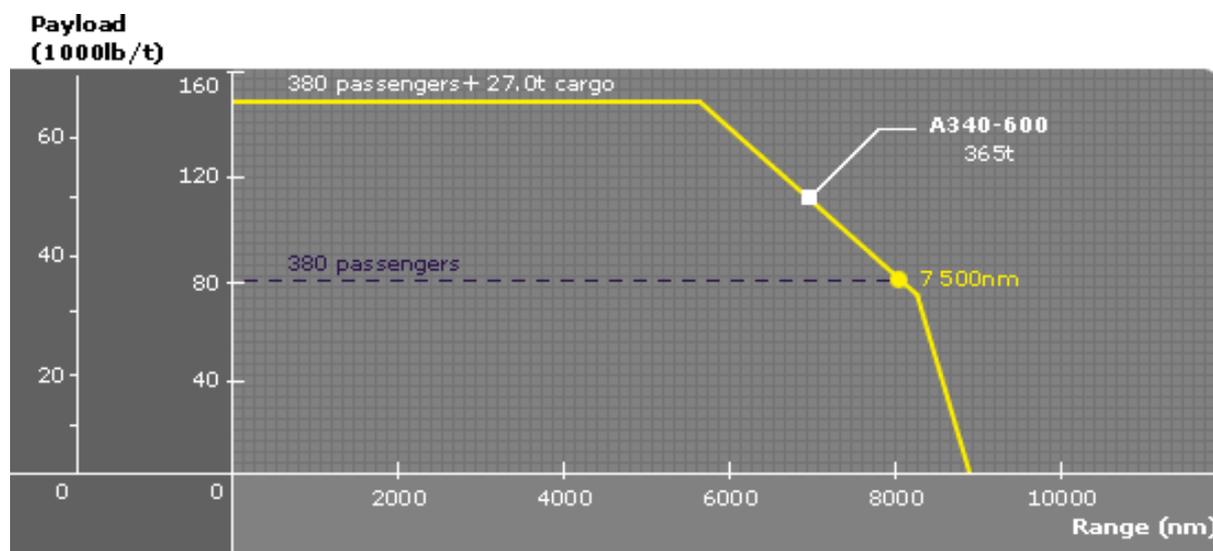


Figure 27 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-600

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

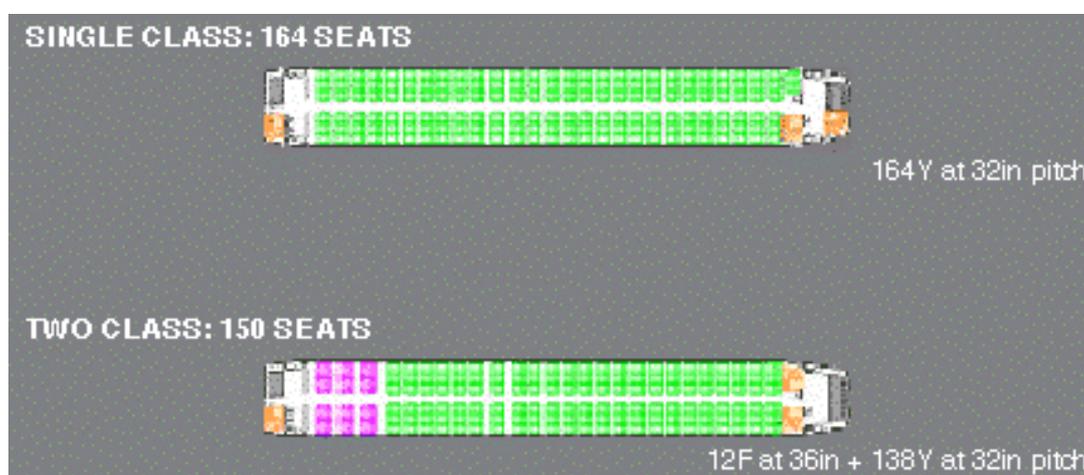


Figure 28 : Plan d'occupation d'espace de l'A320 en fonction du nombre de classe

On distingue nettement, sur le graphique ci-dessus, que 26 sièges de seconde ont été remplacés par 12 siège 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

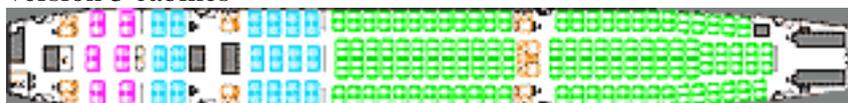


Figure 30 : Plan d'occupation de l'espace de l'A330-200, version trois cabines

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 siège "Business" occupe 2,33 fois l'espace d'un siège de seconde, puisque 56 sièges de seconde ont été remplacés par 24 sièges "business" dans la partie du milieu de l'avion en passant du schéma du haut à celui du bas.

2.3 A340-200

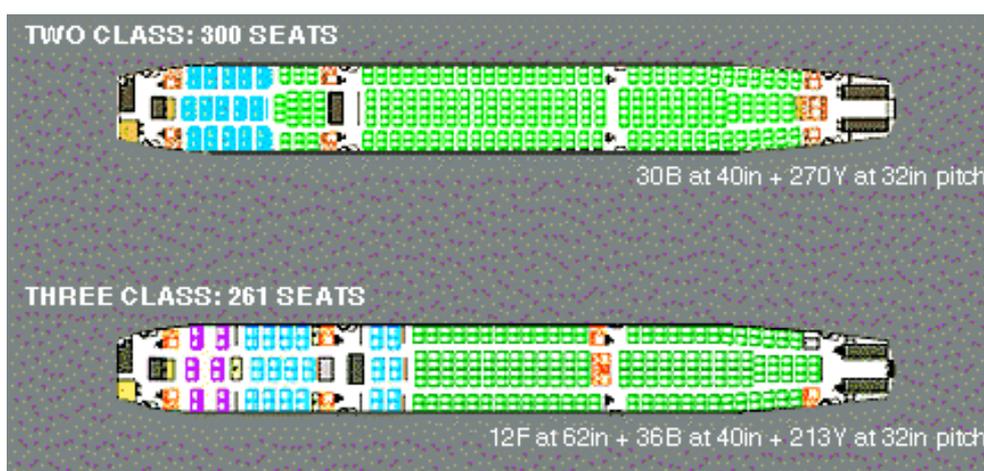


Figure 31 : Plan d'occupation de l'espace de l'A340-200 en fonction du nombre de classe

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

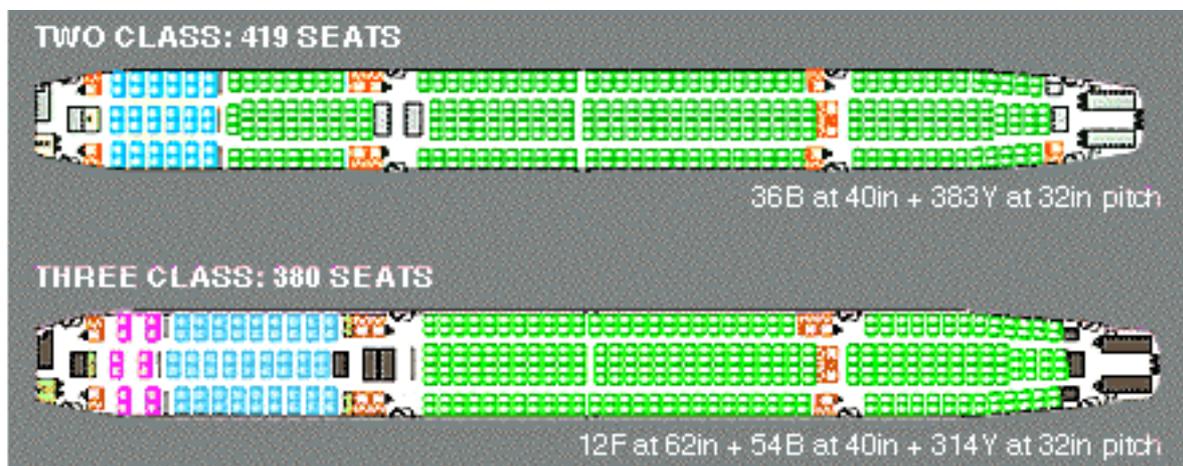


Figure 32 : Plan d'occupation de l'espace de l'A340-600 en fonction du nombre de classe

Conclusion identique à ci-dessus.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Rapport PCS/PCI pour les combustibles liquides ou gazeux.....	17
Tableau 2 : Equivalences entre les unités de mesure de l'énergie	18
Tableau 3 : Facteurs d'émission des combustibles liquides.	19
Tableau 4 : Facteurs d'émission de l'ensemble extraction + raffinage des carburants à partir de brut conventionnel (IFP 2001).....	19
Tableau 5 : Facteurs d'émission liés aux consommations d'énergie du raffinage (DGEMP – 2002).....	20
Tableau 6 : Facteurs d'émission liés à l'extraction et au transport du pétrole	20
Tableau 7 : 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 concernant le pétrole (IFP, 2001).....	21
Tableau 8 : 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 concernant les principaux carburants.	21
Tableau 9 : Conversion des facteurs d'émission globaux (amont + combustion) de différents carburants	22
Tableau 10 : Facteurs d'émission de la combustion du gaz naturel (ADEME, MEDD, 2005)	22
Tableau 11 : Facteurs d'émission des processus amont du gaz naturel (IFP-2001)	22
Tableau 12 : 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 du gaz naturel.	23
Tableau 13 : Calcul du facteur d'émission global (amont + combustion) du gaz naturel.....	23
Tableau 14: énergie massique et émissions de CO2 associées	24
Tableau 15: énergie massique et émissions de CO2 par unité d'énergie pour les combustibles fossiles solides.....	24
Tableau 16: Facteurs d'émission amont de combustibles solides.....	25
Tableau 17: Facteurs d'émission globaux (amonts + combustion) de combustibles solides, hors déchets valorisés.....	25
Tableau 18 : Les principaux biocombustibles et leurs facteurs d'émission (ADEME,2005 et ADEME,2006)	28
Tableau 19 : Facteur d'émission des biocombustibles issus de filières dédiées (ADEME,2005)	29
Tableau 20 : Facteurs d'émission des biocarburants (ADEME - DGEMP, 2002)	30
Tableau 21: Facteurs d'émission retenus pour la méthode pour les biocarburants.....	31
Tableau 22 : Facteurs d'émission de la production d'électricité par pays en 2004	34
Tableau 23 : Facteurs d'émission CO2/kWh par fournisseur d'électricité européens en 2004 (PWC – ENERPRESSE, 2005).....	36
Tableau 24: Facteurs d'émission mensuels d'EDF en 2005	37
Tableau 25 : Facteurs d'émission des différents modes de production d'électricité du mix Français	38

Tableau 26 : Facteurs d'émission du kWh électriques français par usages en gCO ₂ /kWh (ADEME, 2005)	39
Tableau 27 : Consommation standard des différents équipements électriques résidentiels	40
Tableau 28 : Facteurs d'émission des différents équipements électriques résidentiels	41
Tableau 29: Consommation électrique moyenne en 2003 par type d'activité (tous usages et usages spécifiques). (ADEME, 2005)	42
Tableau 30 : Consommation moyenne par m ² de fioul pour le chauffage selon la nature d'activité. (Observatoire de l'Energie, 2001)	45
Tableau 31 : Consommation moyenne par m ² de gaz naturel pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire selon la nature d'activité. CEREN 1990-2003	46
Tableau 32 : Coefficient de correction en fonction de la rigueur climatique.....	46
Tableau 33 : Moyenne française de consommation d'énergie au m ² par énergie fossile et par nature de logement, chauffage seul	47
Tableau 34 : Moyenne française de consommation d'énergie au m ² par nature de logement, chauffage électrique	48
Tableau 35 : Moyenne française de consommation d'énergie par énergie fossile et par nature de logement, eau chaude sanitaire seule.....	49
Tableau 36 : Moyenne française de consommation d'énergie par nature de logement, eau chaude sanitaire électrique	49
Tableau 37 : Mix énergétique français pour le chauffage des logements	49
Tableau 38 : Mix énergétique français pour l'eau chaude sanitaire des logements	50
Tableau 39 : Facteurs d'émissions non énergétiques (procédés et fuites)	52
Tableau 40 : Caractéristiques du froid commercial - Approche par les types d'équipements (ADEME-ARMINES, 1999).....	55
Tableau 41 : Caractéristiques du froid commercial - Approche par les surfaces de vente (ADEME-ARMINES, 2001).....	55
Tableau 42 : Caractéristiques du froid industriel pour l'agroalimentaire (ADEME-ARMINES, 2003).....	55
Tableau 43 : Caractéristiques des tanks à lait	56
Tableau 44 : Caractéristiques du froid industriel – Systèmes à température positive (ADEME-ARMINES, 2001).....	56
Tableau 45 : Caractéristiques du froid industriel – Systèmes à température négative (ADEME-ARMINES, 2003).....	57
Tableau 46 : Caractéristiques moyennes à utiliser lorsque le système froid n'est pas connu.	57
Tableau 47 : Caractéristiques du froid tertiaire (climatisation).....	57
Tableau 48 : Consommations énergétiques en France pour l'activité de construction des véhicules terrestres (1999)	60
Tableau 49 : Facteurs d'émissions pour l'activité de construction des véhicules terrestres	61
Tableau 50 : Facteurs d'émission de la production des différents matériaux nécessaires à la construction d'un véhicule d'une tonne	62
Tableau 51 : Emissions, au km parcouru, des véhicules essences en fonction de la zone habitée.	64
Tableau 52 : Emissions, au km parcouru, des véhicules diesels en fonction de la zone habitée	64
Tableau 53 : Consommations moyennes des véhicules en fonction de leur date de mise en circulation.....	65

Tableau 54 : Consommation moyenne des véhicules essence et diesel en fonction de leur puissance administrative	66
Tableau 55 : Consommations associées aux cycles de roulage conventionnels des véhicules essence pour des puissances administratives de 3 à 5 CV fiscaux.....	67
Tableau 56 : Distance moyenne domicile-travail en fonction du parcours.....	69
Tableau 57 : Facteurs d'émission par voiture des déplacements domicile travail en fonction du parcours	70
Tableau 58 : facteurs d'émission domicile travail en fonction du type de parcours effectué par km.....	70
Tableau 59 : distances parcourues et répartition modale pour les déplacements quotidiens ...	72
Tableau 60 : répartition des déplacements totaux par mode en 1993	73
Tableau 61 : kilométrages parcourus par personne et par an en France en 1993.....	73
Tableau 62 : Facteurs d'émission de la fabrication des minibus, autobus urbains et autocars interurbains.....	74
Tableau 63 : Facteurs d'émission par voyageur.km pour différents types d'autobus (ADEME, 2002).....	75
Tableau 64 : Facteurs d'émission par véhicule.km pour différents types d'autobus	75
Tableau 65 : Facteurs d'émission par passager.km pour différents types d'autobus	76
Tableau 66 : distance annuelle moyenne parcourue par Français en 1993 et part des transports collectifs	77
Tableau 67 : distance annuelle moyenne parcourue en transport collectif par Français en 1993	77
Tableau 68 : kilométrages hebdomadaires totaux par mode, 1993	78
Tableau 69 : kilomètres effectués par personne et par an selon le mode, 1993	78
Tableau 70 : kilomètres effectués par personne et par an selon le mode, pour les transports collectifs	78
Tableau 71 : kilomètres effectués par personne et par an en longue distance selon le mode .	79
Tableau 72 : Facteurs d'émission des deux-roues liés à la combustion (ADEME, 2002).....	81
Tableau 73 : Classes de PTAC pour les camionnettes et les camions.	82
Tableau 74 : Caractéristiques PTAC.....	84
Tableau 75 : Durée de vie moyenne des véhicules en km en fonction de la classe de PTAC	84
Tableau 76 : Facteurs d'émission de la fabrication des véhicules en fonction de leur classe de PTAC.....	85
Tableau 77 : Facteurs d'émission de la consommation des véhicules par km et par classe de PTAC.....	87
Tableau 78 : Facteurs d'émission moyens par véhicule.km par classe de PTAC.....	87
Tableau 79 : Caractéristique du transport de marchandises en fonction de la classe de PTAC.	91
Tableau 80 : Facteurs d'émission à vide et à pleine charge du transport de marchandises.	92
Tableau 81 : Facteurs d'émission moyens nationaux du transport de marchandise selon la classe de PTAC	95
Tableau 82 : t.km expédiées par la route par habitant et par an selon la région	96
Tableau 83 : t.km réceptionnées par la route par habitant et par an selon la région	97
Tableau 84 : Caractéristiques de références des principaux avions	98
Tableau 85 : Facteurs d'émission par passager.km pour les transports de personnes en avion	100

Tableau 86 : Facteurs d'émission théoriques par tonne.km pour les transports de marchandises en avion	101
Tableau 87 : Facteurs d'émission « réels » par tonne.km pour les transports de marchandises en avion	102
Tableau 88 : Facteur d'émission pour le transport de marchandises en avion pour les vols court-courriers	102
Tableau 89 : Facteur d'émission pour le transport de marchandises en avion pour les vols moyens-courriers	102
Tableau 90 : Facteur d'émission pour le transport de marchandises en avion pour les vols long-courriers	103
Tableau 91 : km par personne et par en effectués en avion en 1993.....	103
Tableau 92 : distance moyenne par passager en avion.....	104
Tableau 93 : Facteurs d'émission par voyageur.km pour les déplacements en train en France	105
Tableau 94 : Facteurs d'émission par voyageur.km pour les déplacements en train à l'étranger (UIC – INFRAS - IWW, 2004)	106
Tableau 95 : millions de voyageurs*km par semaine de déplacement longue distance en mode ferré	107
Tableau 96 : distance moyenne par personne et par an en longue distance en mode ferré....	107
Tableau 97 : Facteurs d'émission par tonne.km pour le fret ferroviaire en France	107
Tableau 98 : Facteurs d'émission par tonne.km pour le fret en train à l'étranger (UIC – INFRAS - IWW, 2004)	108
Tableau 99 : Poids à vide des principaux bateaux	109
Tableau 100 : Facteurs d'émission des porte-conteneurs.....	110
Tableau 101 : Facteurs d'émission des vraquiers.....	112
Tableau 102 : Indicateurs de consommation énergétique et facteurs d'émission. Données agrégées par type d'équipement et par bassin de navigation. (ADEME, VNF, T&L Associés, 2005)	114
Tableau 103 : Indicateurs de consommation énergétique et facteurs d'émission. Données détaillées par bassin de navigation. (ADEME, VNF, T&L Associés, 2005).....	115
Tableau 104 : Facteurs d'émission pour différents types de métaux produits en Australie. (CSIRO, 2003)	120
Tableau 105 : Facteurs d'émission pour différentes activités métallurgique. (CEREN – 1999)	120
Tableau 106 : Calcul des facteurs d'émission pour différents métaux sans tenir compte de la part minière	121
Tableau 107 : Récapitulatif des facteurs d'émission de la production de différents types de métaux.	121
Tableau 108 : Synthèse des facteurs d'émission retenues pour la production de différents types de métaux.....	122
Tableau 109 : Facteur d'émission de la production de Polystyrène. (APME, 1997).....	122
Tableau 110 : Facteur d'émission de la production de Polychlorure de vinyle. (APME, 1998)	123
Tableau 111 : Facteur d'émission de la production de Polyéthylène haute densité.....	123
Tableau 112 : Facteur d'émission de la production de Polystyrène basse densité. (APME – 1999).....	124

Tableau 113 : Facteur d'émission de la production de Polyéthylène terephthalate amorphe. (APME –1999)	125
Tableau 114 : Facteur d'émission de la production de Polyéthylène terephthalate (bouteille). (APME –1999)	125
Tableau 115 : Facteur d'émission de la production de Polyéthylène terephthalate (film). (APME –1999)	125
Tableau 116 : Facteur d'émission de la production de Nylon 66.....	126
Tableau 117 : Facteur d'émission de la production de différents produits verriers (CEREN, 1999).....	127
Tableau 118 : Facteur d'émission de la production de différents types de verres (OFEPF)..	127
Tableau 119 : Facteur d'émission de la production de verre plat et de laine de verre (MIES, 1999).....	127
Tableau 120 : Facteurs d'émission de la production d'engrais en fonction des différents GES	135
Tableau 121 : Facteurs d'émission de la production d'engrais en fonction des différents GES en kg eqC.....	135
Tableau 122 : Facteurs d'émission de différents herbicides	136
Tableau 123 : Facteurs d'émission de différents fongicides	137
Tableau 124 : Facteurs d'émission de différents insecticides	137
Tableau 125 : Facteurs d'émission de molluscides	138
Tableau 126 : Facteurs d'émission de différents régulateurs de croissance	138
Tableau 127 : Facteurs d'émission relatif à la consommation de carburant pour la culture de blé par hectare cultivé. (ADEME- ECOBILAN, 2003).....	139
Tableau 128 : Emissions des produits utilisés pour la culture du blé. (ADEME- ECOBILAN, 2003).....	139
Tableau 129 : Facteurs d'émission pour la fabrication des outils nécessaires à la culture du blé	140
Tableau 130 : Calcul des facteurs d'émission à l'hectare de blé cultivé.....	140
Tableau 131 : Facteurs d'émission pour l'énergie de culture du maïs par hectare cultivé	140
Tableau 132 : Emissions des produits utilisés à la culture du maïs.	141
Tableau 133 : Facteurs d'émission pour la fabrication des outils utilisés pour la culture de maïs.	141
Tableau 134 : Facteurs d'émission à l'hectare de maïs cultivé.....	141
Tableau 135 : Facteur d'émission de la farine de blé.....	142
Tableau 136 : Emissions annuelles du bétail (digestion, déjections et alimentation).	143
Tableau 137 : Facteurs d'émission du bétail par tête et par an	144
Tableau 138 : Facteurs d'émission des vaches allaitantes de réforme	144
Tableau 139 : Facteur d'émission du veau de lait.....	145
Tableau 140 : Facteur d'émission du lait entier	146
Tableau 141 : Facteur d'émission du bœuf (races à viande).....	146
Tableau 142 : Facteurs d'émission moyens du bœuf.	147
Tableau 143 : Facteur d'émission du fromage à pâte cuite.....	147
Tableau 144 : Facteur d'émission du porc de batterie	149
Tableau 145 : Facteur d'émission des poulets de batterie.....	149
Tableau 146 : Facteur d'émission d'un oeuf.....	150
Tableau 147 : Facteurs d'émission du mouton.....	151
Tableau 148 : Facteurs d'émission de l'agneau de lait	151

Tableau 149 : Facteurs d'émission de l'agneau à l'herbe	151
Tableau 150 : Valeurs moyennes des unités d'azote à l'hectare cultivé en fonction du type de culture.....	154
Tableau 151 : Facteurs d'émission moyens du N2O en fonction du type de culture.....	154
Tableau 152 : Facteurs d'émission de la fabrication d'engrais.....	155
Tableau 153 : Facteurs d'émission des machines agricoles (consommation, entretien, fabrication) à l'hectare cultivé.....	155
Tableau 154 : Emissions annuelles de méthane des animaux d'élevage	156
Tableau 155 : Emissions annuelles de méthane des animaux d'élevage. (en kg eqC)	157
Tableau 156 : Répartition française du traitement des déchets inertes dans les différentes filières (ADEME, 2004).....	159
Tableau 157: Facteurs d'émission résultant de la valorisation thermique de l'incinération de différents plastiques aux Etats-Unis.....	161
Tableau 158: Facteurs d'émission résultant de la valorisation thermique de l'incinération de différents plastiques en Europe.	161
Tableau 159: Calcul des facteurs d'émission de l'incinération de plastiques avec valorisation.	162
Tableau 160 : Répartition française du traitement des déchets plastiques dans les différentes filières.....	162
Tableau 161 : Facteurs d'émission des déchets papiers et cartons mis en décharge sans valorisation (EPA, 1998).....	163
Tableau 162 : Economies résultant de la valorisation thermique de l'incinération de papiers et cartons aux Etats-Unis et en France.	166
Tableau 163 : Répartition française du traitement des déchets alimentaires dans les différentes filières.....	166
Tableau 164 : Répartition française du traitement des papiers et cartons dans les différentes filières.....	167
Tableau 165 : données d'inventaire du cycle de vie du stockage d'1 tonne de déchets dangereux, par étapes du cycle de vie (ADEME – FNADE, 2003).....	168
Tableau 166 : Facteur d'émissions du traitement des eaux usées	170
Tableau 167 : Facteurs d'émission du traitement de fin de vie des emballages.	171
Tableau 168 : Facteurs d'émission de la production de matériaux d'emballage	172
Tableau 169 : Dépenses énergétiques pour la construction de bâtiment selon leur activité. .	174
Tableau 170 : Dépense énergétique pour la construction des bâtiments par matériaux	174
Tableau 171 : Emissions par secteur d'activité (en France) engendrées par la phase de construction d'un bâtiment.	175
Tableau 172 : Facteurs d'émission au m ² des bâtiment en fonction de leur type et de leur activité.....	175
Tableau 173 : Facteurs d'émissions des matériaux et produits de construction issus de la base INIES.....	177
Tableau 174 : Facteurs d'émission des matériaux de construction des routes et parking.....	178
Tableau 175 : Pourcentage supplémentaire engendré par le transport et la mise en œuvre des matériaux de construction des routes et parkings.....	178
Tableau 176 : Trafic des différentes catégories de voies routières.	179
Tableau 177 : Facteurs d'émission de la construction de routes en fonction du type de voie	180
Tableau 178 : Facteurs d'émission des glissières de sécurité en fonction du type de voie... 180	

Tableau 179 : Type et consommation d'énergie pour la fabrication de puces informatiques	182
Tableau 180 : Type et consommation d'énergie pour la fabrication de circuits imprimés....	182
Tableau 181 : Consommation d'énergie pour la fabrication de tubes cathodiques	183
Tableau 182 : Consommation d'énergie pour la fabrication d'écrans plats.....	183
Tableau 183 : Kg de combustibles fossiles utilisés pour la fabrication des matériaux annexes d'un ordinateur	183
Tableau 184 : Calcul du facteur d'émission d'un ordinateur à tube cathodique.....	184
Tableau 185 : Calcul du facteur d'émission d'un ordinateur à écran plat.....	184
Tableau 186 : Poids moyen des différents matériaux d'un ordinateur et d'une imprimante .	185
Tableau 187 : Facteurs d'émission de la production électrique par type de filière.....	197
Tableau 188 : Facteurs d'émission mensuels de la production d'électricité d'EDF en 2005	198
Tableau 189 : Coefficients d'émission pour les principaux combustibles.....	200
Tableau 190 : Répartition des surfaces agricoles nationales cultivées.....	207
Tableau 191 : Facteur d'émission de la dinde industrielle.....	208
Tableau 192 : Facteur d'émission du canard et de la pintade de batterie.....	208
Tableau 193 : Facteur d'émission des poulets fermiers	209
Tableau 194 : Facteur d'émission des pintades fermières.....	209
Tableau 195 : Facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué.....	216
Tableau 196 : Facteurs d'émission des véhicules de 6 à 10 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué.....	217
Tableau 197 : Facteurs d'émission des véhicules de plus de 11 CV fiscaux essence en fonction du type de parcours effectué	218
Tableau 198 : Facteurs d'émission des véhicules de 3 à 5 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué.....	219
Tableau 199 : Facteurs d'émission des véhicules de 6 à 10 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué.....	220
Tableau 200 : Facteurs d'émission des véhicules de plus de 11 CV fiscaux diesel en fonction du type de parcours effectué.....	220
Tableau 201 : Liste des experts Bilan Carbone® de l'ADEME	240

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Corrélation entre la durée de vie et le PTAC des camions et camionnettes.....	85
Figure 2 : Corrélation entre le PTAC et les émissions par véhicule.km	88
Figure 3 : Corrélation entre le PTAC et les émissions moyennes par véhicule.km pour les véhicules particuliers.....	88
Figure 4 : Forçage radiatif par aéronefs en 1992.	99
Figure 5 : Corrélation entre les émissions quotidiennes d'un porte conteneurs en mer et sa capacité d'emport.	111
Figure 6 : Répartition par type d'énergie primaire de la production d'électricité en Europe en 2001 (Observatoire de l'Energie).....	195
Figure 7 : facteur d'émissions de certains producteurs d'électricité européens.....	196
Figure 8 : Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de moins de 1.5 t de PTAC.....	211
Figure 9 : Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 1.5 t à 2.5 t de PTAC	211
Figure 10 : Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 2.5 t à 3.5 t de PTAC.....	212
Figure 11 : Répartition du nombre de véhicules pour les camionnettes de 3.51 t à 5 t de PTAC	212
Figure 12 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 5,1 t à 6 t de PTAC ...	213
Figure 13 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 6.1 t à 10.9 t de PTAC	213
Figure 14 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 11 t à 19 t de PTAC ..	214
Figure 15 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 19.1 t à 21 t de PTAC	214
Figure 16 : Répartition du nombre de véhicules pour les camions de 21.1 t à 32,6 t de PTAC	215
Figure 17 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A300 version fret.....	221
Figure 18 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A310	222
Figure 19 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A318	222
Figure 20 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A3109	222
Figure 21 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A320	223
Figure 22 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A330- 200.....	223
Figure 23 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A330- 300.....	224
Figure 24 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340- 200.....	224
Figure 25 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340- 300.....	225

Figure 26 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-500.....	225
Figure 27 : Rayons d'action maximaux en fonction du poids emporté au décollage de l'A340-600.....	226
Figure 28 : Plan d'occupation d l'espace de l'A320 en fonction du nombre de classe	226
Figure 29 : Plan d'occupation de l'espace de l'A330-200, version deux cabines	227
Figure 30 : Plan d'occupation de l'espace de l'A330-200, version trois cabines	227
Figure 31 : Plan d'occupation de l'espace de l'A340-200 en fonction du nombre de classe	227
Figure 32 : Plan d'occupation de l'espace de l'A340-600 en fonction du nombre de classe	228

Liste des sigles

A

ACV : Analyse du Cycle de Vie

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AIE : Agence Internationale de l'Environnement

APME : Association of Plastics Manufactures in Europe

B

BTU : British Thermal Unit

C

CET : Centre d'Enfouissement Technique

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique

CPCU : Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain

CSDU : Centre de Stockage de Déchets Ultimes

D

DASRI : Déchets d'Activités de Soins à Risques Infectieux

DBO : Demande Biochimique en Oxygène

DGEMP : Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières

DMA : Déchets Ménagers et Assimilés

E

ECCS : Electrolytic Chrome Coated Steel

ECS : Eau Chaude Sanitaire

EMHV : Ester Méthylique d'Huile Végétale

EPA : Environment Protection Agency

ETBE : Ethyl Tertio Buthyl Ether

F

FDES : Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire

FNADE : Fédération Nationale des Activités de Dépollution et de l'Environnement

G-H

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
(ou IPCC pour International Panel on Climate Change)

I-J

IFP : Institut Français du Pétrole

INIES : Informations sur l'Impact Environnemental et Sanitaire

INRETS : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

INSEE : Institut National des Statistiques et des Etudes Economiques

IPCC : voir GIEC

IRSID : Institut de Recherche de la SIDérurgie

K-L

kep : kilo équivalent pétrole

L

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

M-N

MEDD : Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

MIES : Mission Interministérielle de l'Effet de Serre

O

OE : Observatoire de l'Energie

OM : Ordures Ménagères

P-Q-R

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur

PET : PolyEthylène Terephtalate

PNUE : Programme des Nations-Unies pour l'Environnement

PRG : Potentiel de Réchauffement Global

PTAC : Poids Total Autorisé en Charge

PTRA : Poids Total Roulant Autorisé

PWC : Price Waterhouse Coopers

S

SETRA : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

T

TCR : Taillis à Courtes Rotations

tec : tonne équivalent charbon

tep : tonne équivalent pétrole

TER : Train Express Régional

TGV : Train à Grande Vitesse

TRN : Train Rapide National

U

UF : Unité Fonctionnelle

UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change

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

V-W-X-Y-Z

VNF : Voies Navigables de France



Liste des experts ADEME

Nom	Prénom	Domaines d'expertise
BAJEAT	Philippe	Bilan environnementaux filière déchets
BODINEAU	Luc	Biocombustibles, biocarburants
BEWA	Hilaire	Bioproduits
DEPORTES	Isabelle	Retour au sol des matières organiques
DRESCH	Marlène	Efficacité énergétique procédés industriels - froid
MOUSSET	Jérôme	Secteur agricole, N2O épandage
SCHUBETZER	Christine	Méthanisation déjection animale, stockage du carbone dans les sols
WENISCH	Sandrine	Valorisation énergétique - biogaz
CHENE-PEZOT	Anne	Statistiques énergies / Economie
VEUILLET	Dominique	Eco-conception
CARBALLES	Sandrine	Transport
CHABOT	Bernard	Energies renouvelables
COTTIGNIES	Marc	Transport
DESPRETZ	Hubert	URE, électricité bâtiment
VIDALENC	Eric	Transport
LEFEBVRE	Hervé	Energies dans les bâtiments / Eclairage
LEONARDON	Philippe	Matériaux et produits de construction
TROTIGNON	Régine	Bâtiments

Tableau 201 : Liste des experts Bilan Carbone® de l'ADEME